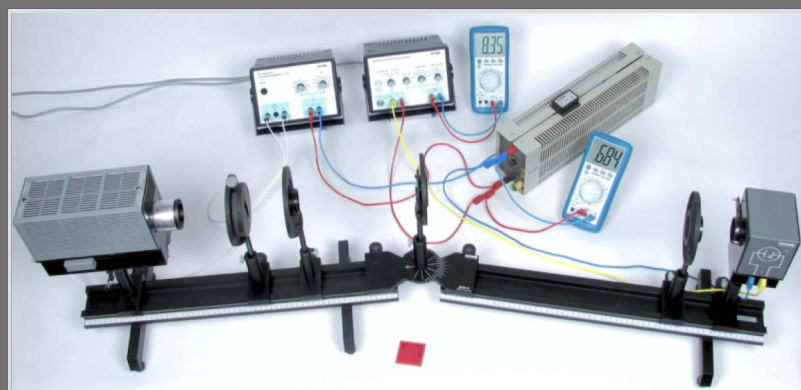
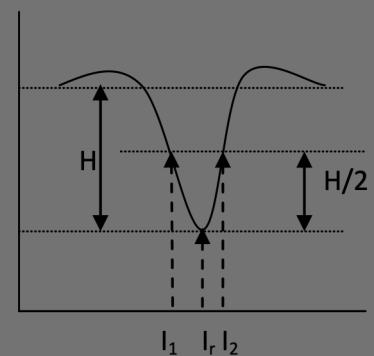
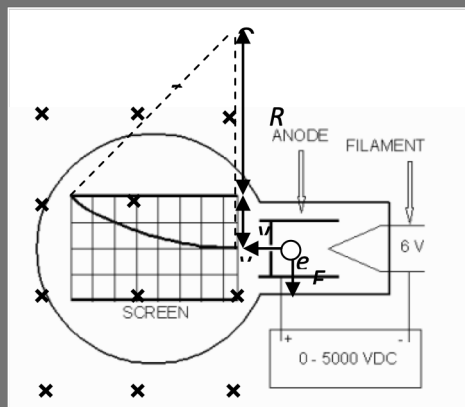


ปฏิบัติการฟิสิกส์ยุคใหม่

Laboratory in Modern Physics

01420222



ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



คำนำ

คู่มือปฏิบัติการฟิสิกส์ยุคใหม่ ฉบับปรับปรุง พ.ศ. 2562 นี้ ได้รวบรวมการทดลองต่าง ๆ ที่สอดคล้องกับเนื้อหาวิชา 01420221 (ฟิสิกส์ยุคใหม่) การทดลองนี้ได้นำเนื้อหาสาระสำคัญครอบคลุมเนื้อหาทฤษฎีการทดลองเพื่อเป็นส่วนเสริมความเข้าใจเพิ่มเติมจากการศึกษาภาคบรรยายและส่งเสริมให้นิสิตได้รับการฝึกทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์

เพื่อให้การเรียนการสอนบรรลุวัตถุประสงค์ทั้งในเชิงทฤษฎีและปฏิบัติในวิชาปฏิบัติการฟิสิกส์ยุคใหม่ นิสิตต้องศึกษาหัวข้อที่ทดลองอย่างละเอียดก่อนลงมือเรียนทำการทดลอง โดยนิสิตควรเขียนแบบรายงานหัวข้อ “ชื่อเรื่อง วัตถุประสงค์” “ทฤษฎีและสูตรที่ใช้ในการคำนวณ” “สมมติฐานการทดลอง” และ “อุปกรณ์และวิธีการทดลอง” ด้วยตัวเองให้เสร็จก่อนเข้าห้องเรียน อันเป็นส่วนหนึ่งของการเตรียมความพร้อมในการเรียน

ภาควิชาฟิสิกส์หวังเป็นอย่างยิ่งว่าเมื่อนิสิตได้ทำการทดลองตามแนวทางคู่มือฉบับนี้แล้ว นิสิตจะมีความเข้าใจในทฤษฎีทางฟิสิกส์ยุคใหม่ดีขึ้น และรู้จักเรียนรู้ตามกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการดำเนินชีวิตในปัจจุบันและการทำงานในอนาคต

คณะกรรมการปรับปรุงคู่มือปฏิบัติการฟิสิกส์ยุคใหม่

มกราคม 2562

สารบัญ

	หน้า
คำนำ	i
สารบัญ	ii
การทดลองที่ 1 การดูดกลืนรังสีของวัสดุด้วยไกเกอร์เคาน์เตอร์ที่มีความเที่ยง Geiger-Müller counter	1
การทดลองที่ 2 สมบัติคลื่นของอนุภาค Wave property of particle	11
การทดลองที่ 3 ไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ Michelson interferometer	20
การทดลองที่ 4 อิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี Electron Spin Resonance (ESR) spectroscopy	27
การทดลองที่ 5 ประจุมวลของอิเล็กตรอน Charge to mass ratio of electron	37
การทดลองที่ 6 ปรากฏการณ์ซีมานปกติ Normal Zeeman effect	45
การทดลองที่ 7 ปรากฏการณ์ฮอลล์ Hall effect	59
การทดลองที่ 8 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก Photoelectric effect	71
การทดลองที่ 9 ปรากฏการณ์คอมป์ตัน Compton effect	82
ภาคผนวก	91

การทดลองที่ 1

การดูดกลืนรังสีของวัสดุวัดโดยไกเกอร์เคาน์เตอร์ที่มีความเที่ยง

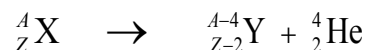
วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการดูดกลืนรังสีแกมมา และรังสีบีตา โดยแผ่นตะกั่ว อลูมิเนียม คอนกรีต และเหล็ก
2. เพื่อหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีของตะกั่ว อลูมิเนียม คอนกรีต และเหล็ก

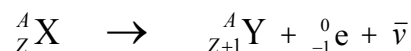
ทฤษฎี

นิวเคลียสของสารกัมมันตรังสีเป็นนิวเคลียสที่ไม่เสถียร ซึ่งจะสลายตัวโดยการปล่อยรังสีเพื่อเปลี่ยนเป็นนิวเคลียสที่มีเสถียรภาพมากขึ้น การสลายตัวของนิวเคลียสของสารกัมมันตรังสีเป็นไปได้ 3 แบบ ดังนี้

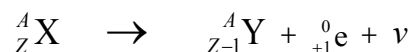
1. การสลายตัวโดยการปล่อยรังสีหรืออนุภาคแอลฟา (alpha decay) เป็นนิวเคลียสของฮีเลียม มีสัญลักษณ์ ${}^4_2\alpha$ หรือ ${}^4_2\text{He}$ เกิดจากการรวมกันของโปรตอนสองตัว และนิวตรอนสองตัวจากนิวเคลียสแม่ แล้วถูกปล่อยออกมา ดังสมการ



2. การสลายตัวโดยการปล่อยรังสีหรืออนุภาคบีตา (beta decay) อนุภาคบีตาที่ถูกปล่อยออกมามี 2 ชนิด คือ อนุภาคบีตาลบ หรืออิเล็กตรอน สัญลักษณ์ ${}^0_{-1}\text{e}$ และอนุภาคบีตาบวก หรือโพสิตรอน สัญลักษณ์ ${}^0_{+1}\text{e}$ ถ้านิวเคลียสที่ร่ำรวยนิวตรอนจะปล่อยอนุภาคบีตาลบ ดังสมการ



ส่วนนิวเคลียสที่มีโปรตอนจำนวนมากจะปล่อยอนุภาคบีตาบวก ดังสมการ



3. การสลายตัวโดยการปล่อยรังสีแกมมา (gamma decay) การสลายตัวโดยการปล่อยรังสีแอลฟาหรือบีตา ส่วนใหญ่สถานะสุดท้ายของนิวเคลียสลูกคือสถานะถูกกระตุ้น ซึ่งมีพลังงานสูงจึงมีการปลดปล่อยรังสีแกมมาเพื่อให้นิวเคลียสเหล่านั้นอยู่ในสถานะพื้นฐานมีพลังงานต่ำกว่า

พิจารณาความเข้มของรังสีทั้งสามที่ถูกส่งผ่านวัตถุหนึ่งๆ พบว่ามีอำนาจส่งผ่านลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล และพบว่ารังสีแอลฟามีอำนาจส่งผ่านน้อยที่สุด รังสีบีตาและรังสีแกมมาตามลำดับ โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีที่ถูกส่งผ่านกับระยะทางที่รังสีแผ่ไปเป็นดังนี้

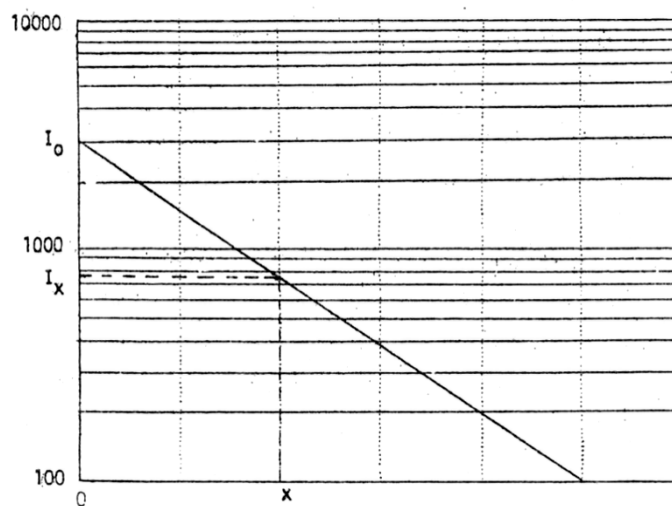
$$I_x = I_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

เมื่อ	I_0	เป็นความเข้มเดิมของรังสีก่อนส่งผ่านตัวกลาง
	I_x	เป็นความเข้มของรังสีเมื่อผ่านตัวกลางเป็นระยะ x
	μ	เป็นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีของตัวกลาง

จากสมการ (1) จะได้

$$\begin{aligned} \frac{I_0}{I_x} &= e^{\mu x} \\ \ln\left(\frac{I_0}{I_x}\right) &= \mu x \\ \mu &= \frac{\ln I_0 - \ln I_x}{x} \end{aligned} \quad (2)$$

ถ้าเขียนกราฟระหว่าง I_x กับ x บนกระดาษกราฟกึ่งลอการิทึม (semi-logarithm) โดยให้ I_x เป็นค่าบนแกนตั้ง หรือแกนลอการิทึม และ x เป็นค่าบนแกนนอน จะได้กราฟเส้นตรง ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แสดงผลความเข้มรังสีต่อระยะทางบนกระดาษกราฟกึ่งลอการิทึม

ถ้าหาความชันของกราฟในภาพที่ 1 จะได้

$$\text{ความชัน} = \frac{\ln I_{x_2} - \ln I_{x_1}}{x_2 - x_1} \quad (3)$$

ความชันตามสมการ (3) จะมีเครื่องหมายลบ เมื่อเปรียบเทียบกับสมการ (3) กับ (2) จะได้

$$\mu = | \text{ความชัน} |$$

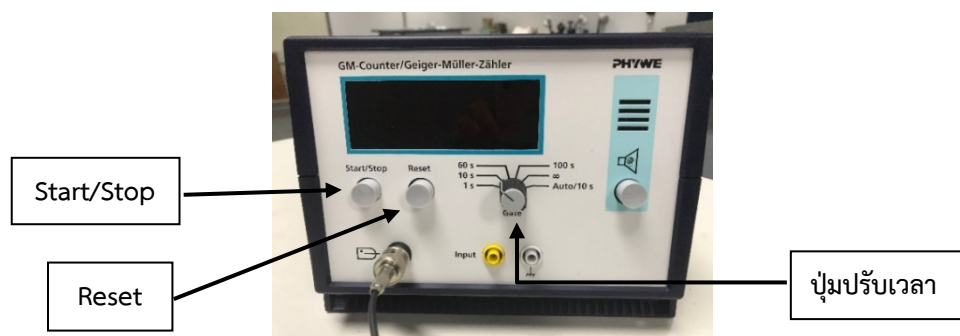
ถ้า $x_{1/2}$ เป็นความหนาครึ่งค่า (half-thickness value) ซึ่งเป็นความหนาของวัตถุที่พอดีทำให้ความเข้มของรังสีลดลงครึ่งหนึ่ง ถ้าแทน $x = x_{1/2}$ และ $I_x = I_0 / 2$ ในสมการ (1) จะได้

$$\begin{aligned}\frac{I_0}{2} &= I_0 e^{-\mu x_{1/2}} \\ e^{-\mu x_{1/2}} &= 2^{-1} \\ \mu x_{1/2} &= \ln 2 \\ \mu &= \frac{\ln 2}{x_{1/2}}\end{aligned}\quad (4)$$

ดังนั้น ถ้าทราบ $x_{1/2}$ จะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีของวัตถุได้จากสมการ (4)

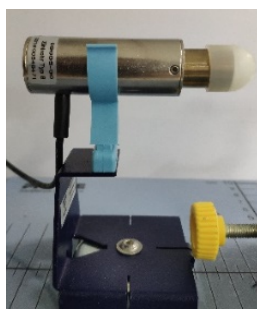
อุปกรณ์การทดลอง

1. Phywe Geiger-Müller-Counter



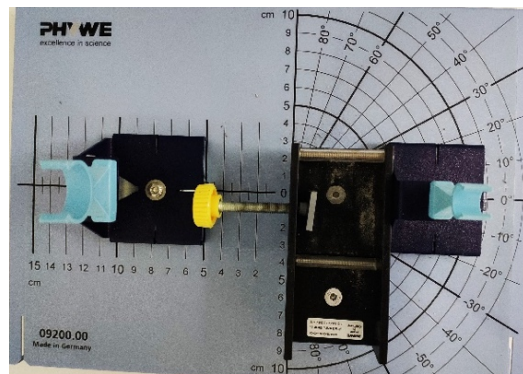
ภาพที่ 2 เครื่อง Phywe Geiger-Müller-Counter

2. Geiger-Mueller counter tube, 15 mm (type B)



ภาพที่ 3 เครื่องวัดไกเกอร์ มุลเลอร์

3. Radioactive material stand with absorber holder



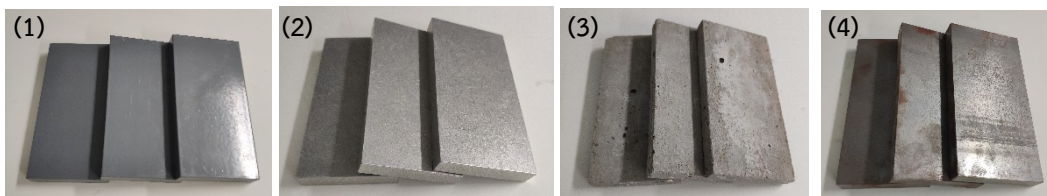
ภาพที่ 4 ชุดอุปกรณ์ Radioactive material stand with absorber holder

4. สารกัมมันตรังสี ^{60}Co บรรจุในหลอดแหล่งกำเนิดรังสี β, γ



ภาพที่ 5 หลอดแหล่งกำเนิดสารกัมมันตรังสี ^{60}Co

5. แผ่นกำบังรังสี 4 ชนิด



ภาพที่ 6 แผ่นกำบังรังสี (1) ตะกั่ว (2) อลูมิเนียม (3) คอนกรีต และ (4) เหล็ก

6. เวอร์เนียคาลิปเปอร์ 1 อัน (สเกลละเอียด 0.05 mm)



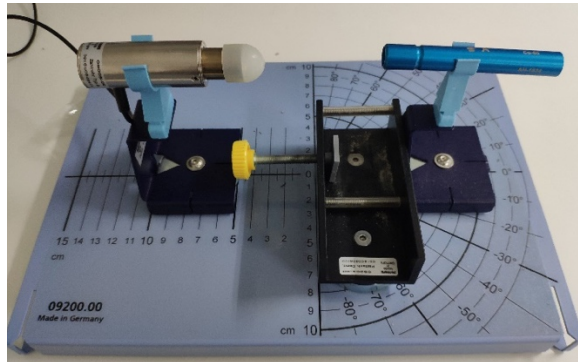
ภาพที่ 7 เวอร์เนียคาลิปเปอร์

ข้อควรระวัง

1. ห้ามถอดฝาปิดของ Geiger-Mueller counter tube
2. ให้จับบริเวณขอบหลอดแหล่งกำเนิดสารกัมมันตรังสีเท่านั้น

วิธีทดลอง

1. จัดอุปกรณ์ ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 Geiger-Mueller counter setup

2. ใช้เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ วัดความหนาของแผ่นกำบังรังสีทั้งสี่ชนิด ชนิดละสามครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย
3. เสียบปลั๊กของ Geiger-Mueller counter แล้วกดปุ่มเปิดด้านหลังเครื่อง
4. หมุนปุ่ม Gate ด้านหน้าของ Geiger-Mueller counter ไปที่ 10 วินาที และกดปุ่มเปิดเสียง
5. กดปุ่ม RESET และกดปุ่ม Start/Stop เครื่องจะนับรังสีจากสิ่งแวดล้อม บันทึกตัวเลขที่ปรากฏบนหน้าปัดเป็นรังสีจากสิ่งแวดล้อมหน่วย *Counts per 10s (cp10s)* วัดรังสีจากสิ่งแวดล้อมซ้ำอีก 2 ครั้ง โดยกดปุ่ม RESET และกดปุ่ม Start/Stop แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย
6. นำหลอดแหล่งกำเนิด Co-60 ออกจากตู้เก็บสารรังสีออกมาวางที่ฐานตั้ง
7. กดปุ่ม RESET และกดปุ่ม Start/Stop เครื่องจะนับเวลาถอยหลังจนครบ 10 วินาที พร้อมทั้งปรากฏตัวเลขปริมาณรังสี บันทึกตัวเลขที่นับได้ ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย
8. นำแผ่นตะกั่ว 1 แผ่น นำไปวางไว้ที่ absorber holder ทำการทดลองข้อ 7 ซ้ำ
9. เพิ่มแผ่นตะกั่วเป็น 2, 3 และ 4 นำไปวางไว้ที่ absorber holder แต่ละครั้งที่วางตะกั่ว ทำการทดลองข้อ 7 ซ้ำ
10. นำแผ่นตะกั่วทั้งหมดออกจาก absorber holder ทำการทดลองข้อ 7-9 ซ้ำโดยใช้แผ่นอลูมิเนียม
11. นำแผ่นอลูมิเนียมทั้งหมดออกจาก absorber holder ทำการทดลองข้อ 7-9 ซ้ำโดยใช้แผ่นคอนกรีต
12. นำแผ่นคอนกรีตทั้งหมดออกจาก absorber holder ทำการทดลองข้อ 7-9 ซ้ำโดยใช้แผ่นเหล็ก
13. นำ Co-60 ออกจาก absorber holder ไปเก็บไว้ในตู้เก็บสารรังสี
14. คำนวณ net cp10s จากความสัมพันธ์ปริมาณรังสีที่วัดได้ – ปริมาณรังสีจากสิ่งแวดล้อม
15. เขียนกราฟระหว่าง net cp10s กับความหนาของแผ่นกำบังรังสีบนกระดาษกราฟกึ่งลอการิทึม ให้ net cp10s เป็นค่าตามแนวแกนลอการิทึม และความหนาของแผ่นกำบังรังสีเป็นค่าตามแนวธรรมดา

กราฟที่ 1	net cp10s กับความหนาของแผ่นตะกั่ว
กราฟที่ 2	net cp10s กับความหนาของแผ่นอลูมิเนียม
กราฟที่ 3	net cp10s กับความหนาของแผ่นคอนกรีต
กราฟที่ 4	net cp10s กับความหนาของแผ่นเหล็ก

16. จากกราฟ จงหาความชันของกราฟ, ค่า μ จากความชันของกราฟ, ค่า $I_0 / 2$, ความหนาครึ่งค่า $x_{1/2}$, ค่า μ จากค่าความหนาครึ่งค่า และเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า μ

ชื่อผู้ปฏิบัติการ รหัสประจำตัว..... หมู่ปฏิบัติการที่.....
 ผู้ร่วมปฏิบัติการ เลขที่ หมู่ย่อยที่.....
 1. ปฏิบัติการวิชาฟิสิกส์ 01420222 ห้อง
 2. วันที่ เดือน พ.ศ.
 3. อาจารย์ผู้สอน

บันทึกผลการทดลอง

ปฏิบัติการการดูดกลืนรังสีของวัสดุวัดโดยไกเกอร์เคาน์เตอร์ที่มีความเที่ยง

สมมติฐานการทดลอง

ผลการทดลอง

- การวัดปริมาณรังสีจากสิ่งแวดล้อมและความหนาของแผ่นกัมมันต์

ปริมาณที่วัด		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
ความหนาของแผ่นกัมมันต์ [.....]	ตะกั่ว				
	อลูมิเนียม				
	คอนกรีต				
	เหล็ก				
ปริมาณรังสีจากสิ่งแวดล้อม [.....]					

2. การวัดปริมาณรังสีของกัมมันตภาพรังสีชนิดต่างๆ

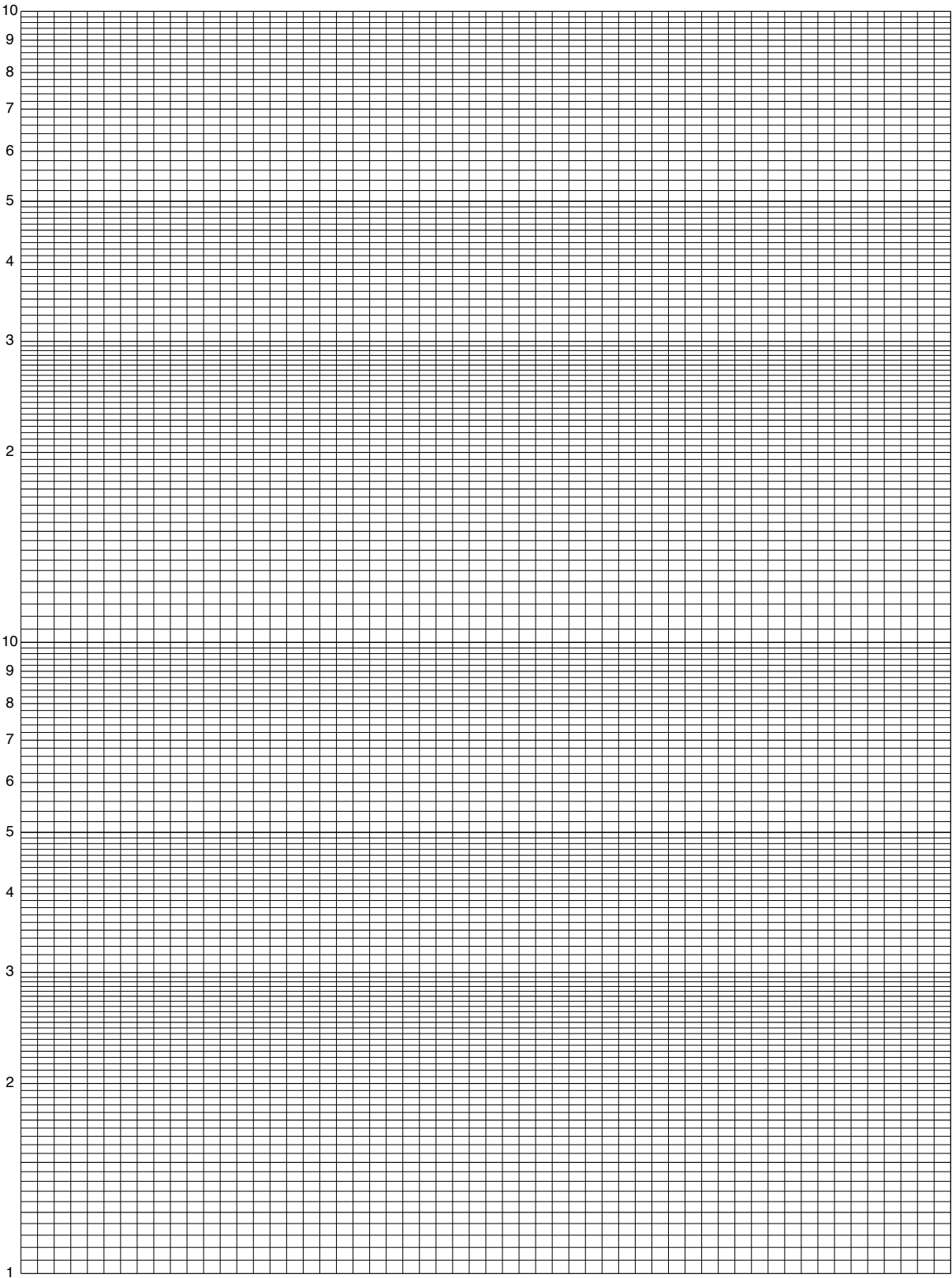
กัมมันตภาพรังสี	ชนิดแผ่นกำบัง	net cp10s				
		ไม่มีแผ่น	1 แผ่น	2 แผ่น	3 แผ่น	4 แผ่น
Co-60	ตะกั่ว					
	อลูมิเนียม					
	คอนกรีต					
	เหล็ก					

จากกราฟความสัมพันธ์จะได้

ปริมาณต่างๆ [หน่วย]	Co-60			
	ตะกั่ว	อลูมิเนียม	คอนกรีต	เหล็ก
ความชัน [.....]				
μ จากความชันกราฟ [.....]				
$I_0 / 2$ [.....]				
ค่าความหนาครึ่งค่า $x_{1/2}$ [.....]				
μ จากค่าความหนาครึ่งค่า [.....]				
% ความคลาดเคลื่อนของ μ				

แสดงวิธีคำนวณ

1. μ จากค่าความหนาครึ่งค่า2. เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของ μ



สรุปผลการทดลอง

วิจารณ์ผลการทดลอง

การทดลองที่ 2

เรื่อง สมบัติคลื่นของอนุภาค

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาความยาวคลื่นเดอบรอยล์ (de Broglie wavelength) ของอิเล็กตรอนจากหลอด Electron Beam Diffraction
2. ศึกษาความสัมพันธ์ของสมการของแบรกก์ (Bragg's equation) กับความยาวคลื่นเดอบรอยล์
3. ทหาระยะระหว่างระนาบผลึกของกราไฟต์ (interlunar spacings of graphite)

ทฤษฎี

แสงโดยทั่วไปแล้วมีคุณสมบัติเป็นคลื่น แต่มีเพียงบางปรากฏการณ์ เช่น ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก และปรากฏการณ์คอมป์ตัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแสงมีพฤติกรรมคล้ายกับอนุภาค ทั้งนี้แสงสามารถแสดงสมบัติเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้โดยมีความถี่ f และความยาวคลื่น λ และแสงแสดงสมบัติเป็นอนุภาคโฟตอนโดยมีพลังงาน E และโมเมนตัม p ซึ่งสมบัติทั้งสองที่มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$E = hf \quad \text{และ} \quad p = \frac{h}{\lambda} \quad (1)$$

ในปี พ.ศ. 2467 เดอบรอยล์ (Louis de Broglie) ได้เสนอแนวคิดจากความสัมพันธ์ของธรรมชาติ ดังนี้

1. อนุภาคสสาร เช่น อิเล็กตรอน สามารถแสดงสมบัติให้เห็นได้ทั้งเป็นคลื่นและอนุภาค
2. สำหรับอนุภาคอิสระที่มีพลังงานรวม E และเคลื่อนที่ด้วยโมเมนตัม p ความยาวคลื่น λ และความถี่ f จะแสดงสมบัติเป็นคลื่นสสาร (matter wave) ที่มีความยาวคลื่น และความถี่ดังนี้

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad \text{และ} \quad f = \frac{E}{h} \quad (2)$$

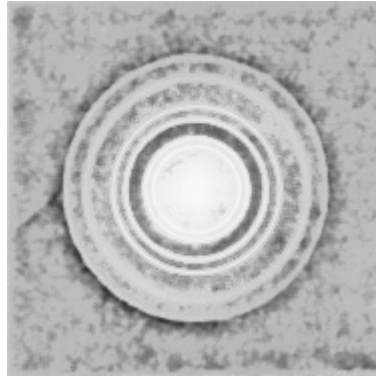
เรียก λ ว่าความยาวคลื่นเดอบรอยล์ (de Broglie wavelength) และ h เป็นค่าคงตัวของพลังค์ มีค่าเท่ากับ 6.626×10^{-34} จูล วินาที

สำหรับวัตถุในระดับมหภาค ความยาวคลื่นเดอบรอยล์นั้นมีค่าน้อยมากซึ่งไม่สามารถที่จะวัดได้โดยใช้สมบัติของคลื่นทั้งการเลี้ยวเบน และแทรกสอด สมมติ อนุภาคมวล 10^{-3} กิโลกรัม เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 1 เมตรต่อวินาที ความยาวคลื่นของอนุภาคมีค่าดังนี้

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{10^{-3} \text{ kg} \times 1 \text{ m/s}} = 6.626 \times 10^{-31} \text{ m}$$

เมื่อพิจารณาความยาวคลื่นของอนุภาคนี้นพบว่า λ มีค่าเล็กมากๆ ซึ่งเล็กกว่าขนาดของนิวเคลียสของอะตอมซึ่งมีรัศมีประมาณ 10^{-15} เมตร ทำให้ไม่สามารถวัดค่าความยาวคลื่นของวัตถุในระดับมหภาคได้ สำหรับวัตถุในระดับจุลภาค ความยาวคลื่นของเดอบรอยล์สำหรับวัตถุระดับจุลภาค เช่น อิเล็กตรอน โดยปกติมีค่าประมาณ 10^{-10} เมตร ซึ่งสอดคล้องกับความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ เพียงพอที่จะวัดได้โดยใช้สมบัติของคลื่น

ในการทดลองนี้จะศึกษาสมบัติคลื่นของอนุภาคอิเล็กตรอนโดยสมบัติการแทรกสอดของคลื่น ลำอิเล็กตรอนที่หลุดจากขั้วแคโทดจะถูกโฟกัสให้มีขนาดเล็ก เพื่อตกกระทบบนแผ่นกราฟไฟต์ โครงสร้างของกราฟไฟต์มีการจัดเรียงอะตอมคาร์บอนแบบผลึก โดยระยะห่างระหว่างระนาบของผลึกมีสมบัติเสมือนเป็นเกรตติง ผลการทดลองจะพบว่าลำอิเล็กตรอนมีการเลี้ยวเบนและเกิดริ้วการแทรกสอดเป็นวงแหวน 2 วงที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกันบนฉาก ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แสดงริ้วการแทรกสอดบนฉาก

ที่มา : www.physics.brown.edu

เส้นผ่านศูนย์กลางของวงแหวนแต่ละวงจะขึ้นอยู่กับการคำนวณค่าความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนซึ่งสอดคล้องกับสมการของแบรกก์ (Bragg's law) และเนื่องจากความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนนั้นมีความสัมพันธ์กับโมเมนตัมหรือความเร็วของอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งโดยการเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ที่ให้กับไส้หลอดอิเล็กตรอน ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V) กับความยาวคลื่นของอิเล็กตรอน (λ) สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\frac{1}{2}mv^2 = eV$$

$$v = \sqrt{\frac{2eV}{m}}$$

จาก

$$p = mv = \sqrt{2meV}$$

และ

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

นั่นคือ

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2meV}} \quad (3)$$

เมื่อ m คือ มวลของอิเล็กตรอนมีค่า 9.109×10^{-31} กิโลกรัม (kg)

e คือ ประจุของอิเล็กตรอนมีค่า 1.602×10^{-19} คูลอมบ์ (C)

จากสมการของแบรกก์ซึ่งแสดงการแทรกสอดของลำอิเล็กตรอนผ่านผลึกของกราฟิตเป็นความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของเส้นทางเดินแสงระหว่างระนาบผลึกกับจำนวนเท่าของความยาวคลื่น (ภาพที่ 2) ดังสมการ

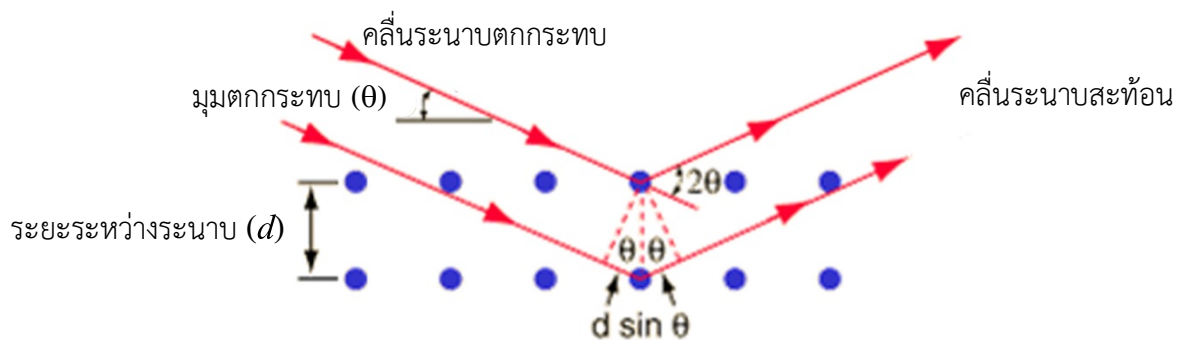
$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (4)$$

เมื่อ d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก

θ คือ มุมของการเลี้ยวเบนผ่านระนาบผลึก

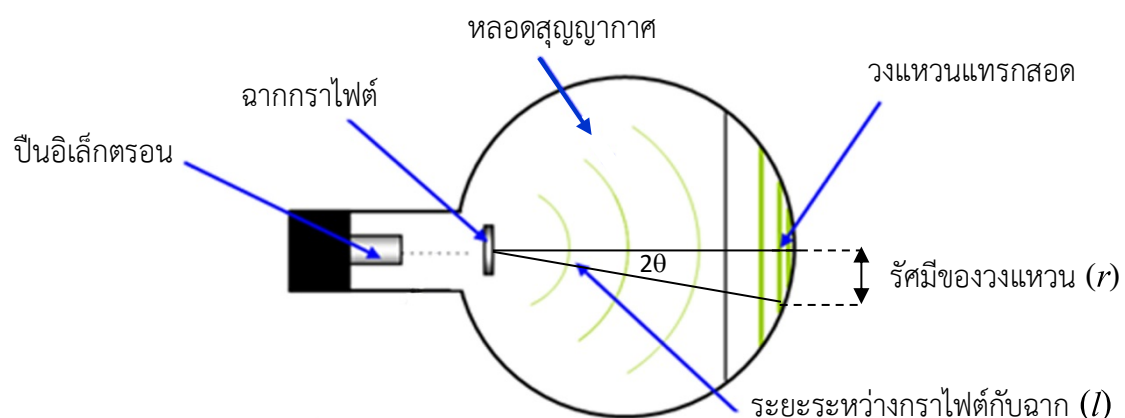
λ คือ ความยาวคลื่นเดอบรอยล์ของลำอิเล็กตรอน

มุมที่เกิดจากการเลี้ยวเบนมีหลายค่าขึ้นกับโครงสร้างภายในของผลึกและวิธีการแทรกสอดที่เกิดขึ้นจะปรากฏบนฉากเป็นริ้ววงแหวนมีลักษณะ ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 2 แสดงการแทรกสอดของลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบระยะระหว่างระนาบผลึก

ที่มา : <http://www.goiit.com/>



ภาพที่ 3 แผนภาพแสดงเส้นทางการแทรกสอดของลำอิเล็กตรอน

ที่มา : www.iop.org/activity/education

เมื่อ l คือ ระยะระหว่างกราฟิตกับฉาก

r คือ รัศมีของวงแหวนแทรกสอด

จากภาพที่ 3 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบกับ l และ r ดังสมการ

$$\tan 2\theta = \frac{r}{l} \quad (5)$$

ถ้า 2θ มีค่าน้อยมาก จะได้

$$2 \sin \theta = \frac{r}{l} \quad (6)$$

แทนค่าในสมการที่ (4) จะได้ค่าความยาวคลื่นเดอบรอยล์ของการแทรกสอดลำดับที่ 1 ดังสมการ

$$\lambda = \frac{rd}{l} \quad (7)$$

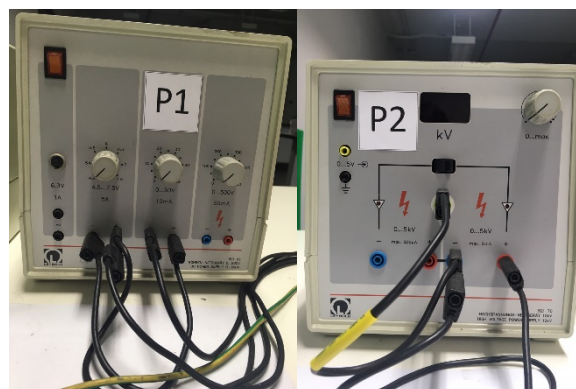
ซึ่งการปรับค่าความต่างศักย์ (V) ที่ง่ายสำหรับชั่วคราวจะทำให้ได้ค่าความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณระยะห่างระหว่างระนาบผลึก เมื่อทราบค่ารัศมีของวงแหวนที่เกิดจากการแทรกสอดที่ปรากฏบนฉากฟลูออเรสเซนต์ ดังสมการ

$$d = \frac{\lambda l}{r} \quad (8)$$

ดังนั้นในการทดลองนี้จะสามารถศึกษาสมบัติคลื่นของอิเล็กตรอน จากการหาความยาวคลื่นเดอบรอยล์ (de Broglie wavelength) ของอิเล็กตรอน และความสัมพันธ์ของสมการของแบรกก์กับความยาวคลื่นเดอบรอยล์ ตลอดจนสามารถนำไปใช้ศึกษาการหาระยะห่างระหว่างระนาบผลึกของกราฟไฟต์ได้

อุปกรณ์การทดลอง

1. แหล่งกำเนิดไฟฟ้า 2 เครื่อง



ภาพที่ 4 แหล่งกำเนิดไฟฟ้าหมายเลข 1 และ 2

2. หลอดแก้วภายในประกอบด้วยกราฟต์กับฉากร่องแสง 1 ชุด



ภาพที่ 5 หลอดแก้วภายในประกอบด้วยกราฟต์กับฉากร่องแสง

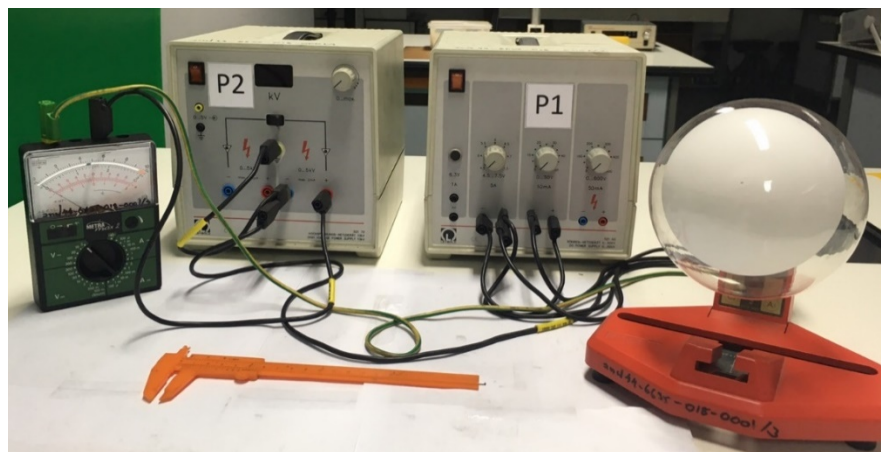
3. เวอร์เนียคาลิปเปอร์ 1 อัน



ภาพที่ 6 เวอร์เนียคาลิปเปอร์ ความละเอียด 0.05 มม.

วิธีการทดลอง

1. ให้ผู้ทดลองตรวจสอบการจัดอุปกรณ์ดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 แสดงการจัดอุปกรณ์ เรืองสมบัติคลื่นของอนุภาค

2. ปรับปุ่ม P1 ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าหมายเลข 1 อย่างช้า ๆ ไปที่ตำแหน่ง 7.5 โวลต์ เพื่อเพิ่มความต่างศักย์ที่ต่อกับไส้หลอดให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากไส้หลอด
3. ปรับปุ่ม P2 ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าหมายเลข 2 อย่างช้า ๆ ไปที่ตำแหน่ง 3.5 กิโลโวลต์ เพื่อใช้เร่งให้อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากไส้หลอดอิเล็กตรอนไปตกกระทบบนแผ่นกราฟต์

4. ใช้เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์วัดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกของวงแหวนแรก บันทึกค่า จากนั้นหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลาง และคำนวณรัศมีเฉลี่ยของวงแหวน บันทึกค่าเป็น r_1
5. วัดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกของวงแหวนที่สอง บันทึกค่า จากนั้นหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลาง และคำนวณรัศมีเฉลี่ยของวงแหวน บันทึกค่าเป็น r_2
6. ทำการทดลองซ้ำข้อ 3 - 5 โดยปรับความต่างศักย์ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าหมายเลข 2 มาเป็น $V = 4.0, 4.5$ และ 5.0 กิโลโวลต์ ตามลำดับ
7. เมื่อทดลองเสร็จแล้วปรับลดความต่างศักย์ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าหมายเลข 2 และแหล่งกำเนิดไฟฟ้าหมายเลข 1 ให้เป็นศูนย์
8. คำนวณหาค่าความยาวคลื่น λ_1 และ λ_2 ที่ความต่างศักย์ต่าง ๆ โดยใช้สมการ (7) และกำหนดให้ระยะระหว่างกราไฟต์ $d_1 = 2.13 \times 10^{-10}$ เมตร, $d_2 = 1.23 \times 10^{-10}$ เมตร และ $l = 13.5$ เซนติเมตร พร้อมทั้งหาค่าเฉลี่ยของความยาวคลื่น $\left(\frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} \right)$
9. คำนวณหาค่าความยาวคลื่นตามทฤษฎี λ_{Th} ที่ความต่างศักย์ต่าง ๆ โดยใช้สมการ (3)
10. หาเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างความยาวคลื่นจากข้อ 8 และ 9
11. คำนวณหาค่าระยะระหว่างระนาบของกราไฟต์ d_1 และ d_2 โดยใช้สมการ (8)
12. เปรียบเทียบค่าระยะระหว่างระนาบของกราไฟต์ในข้อ 11 กับค่าที่กำหนดไว้ในข้อ 8 โดยหาจากสูตรเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน
13. แสดงตัวอย่างการคำนวณมาอย่างละ 1 ค่า
14. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ชื่อผู้ปฏิบัติการ รหัสประจำตัว..... หมู่ปฏิบัติการที่.....

ผู้ร่วมปฏิบัติการ เลขที่ หมู่อ้อยที่.....

1. ปฏิบัติการวิชาฟิสิกส์ 01420222 ห้อง

2. วันที่ เดือน พ.ศ.

3. อาจารย์ผู้สอน

บันทึกผลการทดลอง

ปฏิบัติการสมบัติคลื่นของอนุภาค

สมมติฐานการทดลอง

ผลการทดลอง

ตอนที่ 1 การหาค่าความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนที่ความต่างศักย์ต่าง ๆ

V [.....]	เส้นผ่านศูนย์กลางของวงแหวนที่ หนึ่ง $2r_1$ [.....]			รัศมีเฉลี่ย r_1 [.....]	เส้นผ่านศูนย์กลางของวงแหวนที่ สอง $2r_2$ [.....]			รัศมีเฉลี่ย r_2 [.....]
	ภายใน	ภายนอก	ค่าเฉลี่ย		ภายใน	ภายนอก	ค่าเฉลี่ย	
3.5×10^3								
4.0×10^3								
4.5×10^3								
5.0×10^3								

V [.....]	$\lambda_1 = \frac{r_1 d_1}{l}$ [.....]	$\lambda_2 = \frac{r_2 d_2}{l}$ [.....]	ค่าเฉลี่ยของ λ_1 และ λ_2 [.....]	$\lambda_{Th} = \frac{h}{\sqrt{2meV}}$ [.....]	% ความแตกต่างของ λ
3.5×10^3					
4.0×10^3					
4.5×10^3					
5.0×10^3					

ตอนที่ 2 การคำนวณหาระยะระหว่างระนาบของกราไฟต์

V [.....]	λ_{Th} [.....]	$d_1 = \frac{\lambda_{Th} l}{r_1}$ [.....]	$d_2 = \frac{\lambda_{Th} l}{r_2}$ [.....]	% ความคลาด เคลื่อนของ d_1	% ความคลาด เคลื่อนของ d_2
3.5×10^3					
4.0×10^3					
4.5×10^3					
5.0×10^3					
ค่าเฉลี่ย					

แสดงวิธีคำนวณ

- ความยาวคลื่นของวงแหวนที่หนึ่ง λ_1
- ความยาวคลื่นของวงแหวนที่สอง λ_2

3. ความยาวคลื่นของอิเล็กตรอน λ_{Th}
4. ระยะห่างระหว่างระนาบของผลึกของกราฟิต d_1
5. ระยะห่างระหว่างระนาบของผลึกของกราฟิต d_2
6. เพอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความยาวคลื่นของอิเล็กตรอน
7. เพอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก

สรุปผลการทดลอง

วิจารณ์ผลการทดลอง

การทดลองที่ 3

เรื่อง ไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์

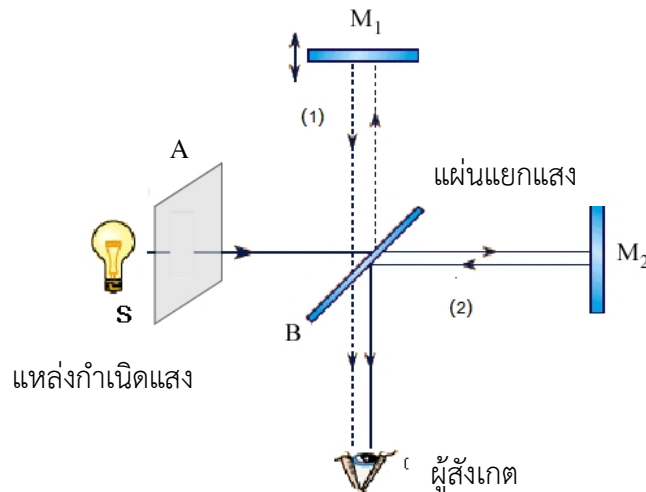
วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการเกิดการแทรกสอดของคลื่นแสงโดยใช้ไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์
2. เพื่อหาความเร็วของแสงในอากาศ
3. เพื่อหาค่าดัชนีหักเหของอากาศ

ทฤษฎี

ไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์พัฒนาขึ้นโดยนายอัลเบิร์ต ไมเคิลสันในปี 1881 อุปกรณ์นี้นับเป็นเครื่องมือทางทัศนศาสตร์ที่ใช้อย่างแพร่หลายสำหรับนักฟิสิกส์และนักดาราศาสตร์ โดยได้รับการพัฒนาให้ใช้กับความยาวคลื่นแสงหลายช่วงความยาวคลื่น และใช้ประโยชน์ได้มากมาย เช่น การวัดความยาวแบบละเอียด ใช้ในสเปกโทรสโคปที่มีความละเอียดสูง ใช้ทดสอบอุปกรณ์ทางทัศนศาสตร์อื่นๆ เป็นต้น ไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์เป็นเครื่องมือสำคัญที่ถูกพัฒนาไปใช้ในการทดลองทฤษฎีสัมพันธภาพ Michelson-Morley experiment และเป็นอุปกรณ์แรกที่ใช้ในการวัดขนาดมุมของดาวและนับเป็นเครื่องมือที่เป็นหัวใจหลักของการค้นพบ Gravitational Wave ที่ LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) ตั้งอยู่ที่มลรัฐหลุยส์เซียน่า ประเทศสหรัฐอเมริกา

เมื่อคลื่นแสงความยาวคลื่น (λ) ค่าเดียวจากแหล่งกำเนิดแสง (S) ไปตกกระทบฉากโปร่งแสง A คลื่นแสงที่ผ่าน A ออกมาจะเป็นลำแสงขนานกัน ดังภาพที่ 1 เมื่อลำแสงขนานนี้ไปตกกระทบแผ่นแก้วแยกแสง B ซึ่งเอียงทำมุม 45° กับลำแสงตกกระทบ ลำแสงส่วนหนึ่งจะสะท้อน (ลำแสงที่ (1)) และอีกส่วนหนึ่งจะหักเห (ลำแสงที่ (2)) ลำแสง (1) จะเคลื่อนที่ไปตกกระทบตั้งฉากกับกระจกเงาราบ M_1 ลำแสงนี้จะสะท้อนกลับมายังแผ่นแสง B ลำแสงส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับไปยังฉากโปร่งแสง A และลำแสงอีกส่วนหนึ่งจะหักเหเข้าสู่ตาของผู้สังเกต ส่วนลำแสง (2) จะเคลื่อนที่ไปตกกระทบตั้งฉากกับกระจกเงาราบ M_2 ลำแสงนี้จะสะท้อนกลับมายังแผ่นแยกแสง B ลำแสงส่วนหนึ่งจะหักเหไปยังฉากโปร่งแสง A และลำแสงอีกส่วนหนึ่งจะสะท้อนเข้าสู่ตาของผู้สังเกต ลำแสงที่เข้าสู่ตาของผู้สังเกตทั้งสองชุดจะแทรกสอดกัน ซึ่งจะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมหรือแบบหักล้างขึ้นกับผลต่างของทางเดินคลื่นทั้งสอง



ภาพที่ 1 แสดงแบบจำลองการทดลองของไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์

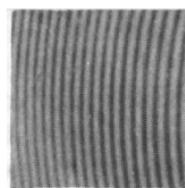
ถ้า
$$\text{ผลต่างของทางเดินคลื่น} = m\lambda \quad (1)$$

โดย $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ จะเกิดการแทรกสอดแบบเสริม เห็นเป็นริ้วสว่าง และถ้า

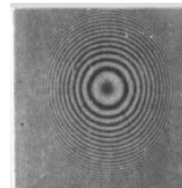
$$\text{ผลต่างของทางเดินคลื่น} = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (2)$$

โดย $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ จะเกิดการแทรกสอดแบบหักล้าง เห็นเป็นริ้วมืด

เนื่องจากคลื่นแสงที่ตกกระทบแผ่นแยกแสง B เป็นลำแสงที่ขนานกัน ดังนั้น ลวดลายการแทรกสอดที่เห็นจึงเป็นวงแหวนสว่างและวงแหวนมืดเรียงสลับกันไป เมื่อกระจก M_1 และ M_2 ตั้งฉากกันพอดี และตั้งฉากกับลำแสง (1) และ (2) ดังภาพที่ 2 (b) แต่ถ้ากระจก M_1 และ M_2 ไม่ตั้งฉากกัน ลวดลายที่เห็นจะไม่เป็นวงกลม แต่จะเป็นส่วนโค้งสว่างและมืดสลับกัน ดังภาพที่ 2 (a)



(a)



(b)

ภาพที่ 2 ลวดลายการแทรกสอดของแสง (a) เมื่อกระจก M_1 และ M_2 ไม่ตั้งฉากกัน (b) เมื่อกระจก M_1 และ M_2 ตั้งฉากกัน

ถ้าทำให้เส้นทางของแสง (2) เป็นสุญญากาศ โดยให้ลำแสง (2) เคลื่อนที่ผ่านทรงกระบอกที่สูบลากาศออกให้หมด ลำแสง (2) จะเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าลำแสง (1) โดยลำแสง (2) มีความเร็ว $c = 299,792,458$ เมตรต่อวินาทีในสุญญากาศ ผลต่างของทางเดินคลื่นของลำแสง (1) และ (2) จะเปลี่ยนไป มีผลทำให้วงแหวนสว่างและวงแหวนมืดเลื่อนไป

ถ้า d เป็นความยาวของทรงกระบอก

f เป็นความถี่ของคลื่นแสงในสุญญากาศ ซึ่งเท่ากับความถี่ของคลื่นแสงในอากาศ

λ เป็นความยาวคลื่นในสุญญากาศ

N_s เป็นจำนวนคลื่นแสงที่ผ่านทรงกระบอกสุญญากาศทั้งขาไปและขากลับ

$$N_s = \frac{2d}{\lambda} = \frac{2df}{c} \quad (3)$$

ถ้าปล่อยให้อากาศกลับเข้าไปในทรงกระบอก ลำแสง (2) จะเคลื่อนที่ช้าลง ดังนั้นจะเห็นวงแหวนสว่างและวงแหวนมืดเลื่อนในทิศตรงข้ามกับตอนที่สูบลอากาศออกและจะหยุดเลื่อนก็ต่อเมื่อลำแสง (2) มีความเร็วเท่ากับความเร็วของคลื่นแสงในอากาศ

ถ้า v เป็นความเร็วของคลื่นแสงในอากาศ

λ_a เป็นความยาวคลื่นในอากาศ

N_a เป็นจำนวนคลื่นแสงที่ผ่านทรงกระบอกที่เป็นอากาศทั้งขาเข้าและขากลับ

$$N_a = \frac{2df}{v} \quad (4)$$

เนื่องจาก $v < c$ ดังนั้น เมื่อปล่อยให้อากาศกลับเข้าไปในทรงกระบอก จำนวนคลื่นจะเพิ่มขึ้น ถ้าให้ N เป็นจำนวนคลื่นที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเท่ากับจำนวนวงแหวนสว่างหรือวงแหวนมืดที่เลื่อนไป

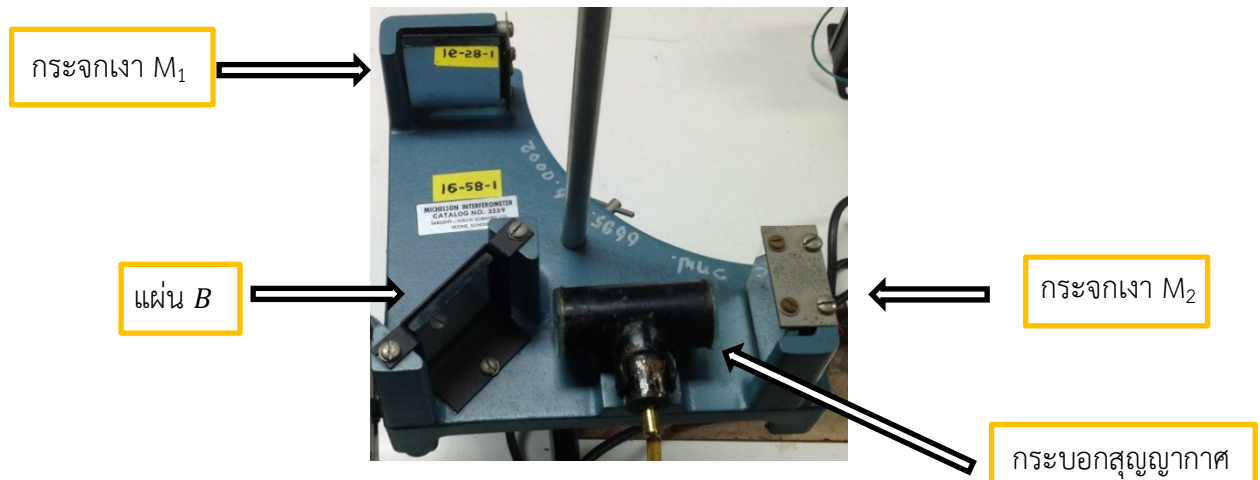
$$\begin{aligned} N &= N_a - N_s = \frac{2df}{v} - \frac{2df}{c} \\ &= 2df \left(\frac{1}{v} - \frac{1}{c} \right) \\ &= \frac{2df}{c} \left(\frac{c}{v} - 1 \right) \\ &= \frac{2df}{f\lambda} \left(\frac{c}{v} - 1 \right) \\ &= \frac{2d}{\lambda} \left(\frac{c}{v} - 1 \right) \\ \frac{c}{v} &= 1 + \frac{N\lambda}{2d} \\ v &= \frac{c}{1 + N\lambda/2d} \end{aligned} \quad (5)$$

ถ้าให้ n เป็นดรรชนีหักเหของอากาศ มีค่าเท่ากับ $\frac{c}{v}$

$$n = 1 + \frac{N\lambda}{2d} \quad (6)$$

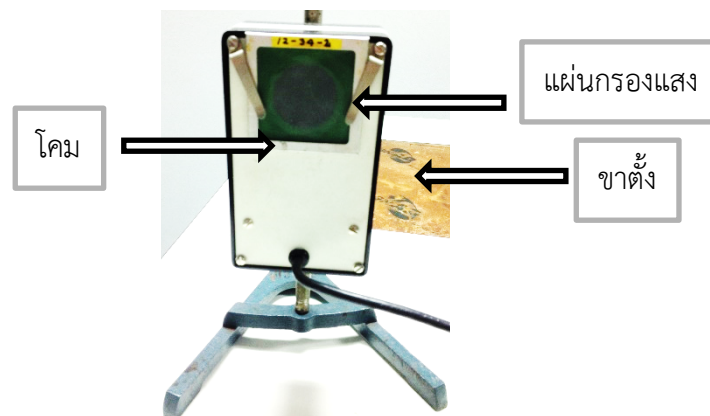
อุปกรณ์การทดลอง

- ไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ 1 เครื่อง



ภาพที่ 3 ส่วนประกอบของชุดไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ประกอบด้วย กระจกเงา 2 ด้าน (M_1 เลื่อนภาพตามแนวระดับ และ M_2 เลื่อนภาพตามแนวตั้ง) แผ่นแยกแสง (B) และกระบอกสุญญากาศ

- โคมโปรทพร้อมแผ่นกรองแสงและขาตั้ง 1 ชุด



ภาพที่ 4 ส่วนประกอบของโคมโปรทพร้อมแผ่นกรองแสงและขาตั้ง

- หม้อแปลงไฟฟ้า 220 – 110 โวลต์ 1 เครื่อง



ภาพที่ 5 หม้อแปลงไฟฟ้าจากความต่างศักย์ 220 โวลต์ เปลี่ยนเป็นความต่างศักย์ 110 โวลต์

4. เครื่องสูบอากาศพร้อมสายยางและลื่นปิด - เปิด 1 อัน



ภาพที่ 6 (ก) เครื่องสูบอากาศพร้อมสายยาง และ (ข) ลื่นปิด - เปิด

5. เวอร์เนียคาลิเปอร์ 1 อัน (สเกลละเอียด 0.05 mm)



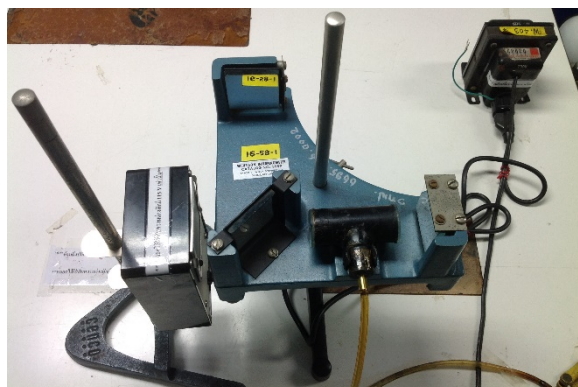
ภาพที่ 7 เวอร์เนียคาลิเปอร์ ความละเอียด 0.05 มม.

ข้อควรระวัง

1. ห้ามสัมผัสผิวกระจกและแผ่นแก้วบนไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์
2. ห้ามสัมผัสแผ่นแก้วของทรงกระบอก
3. ห้ามสัมผัสแผ่นกรองแสงบนโคมโปรท
4. ห้ามมองแสงจากโคมโปรทเมื่อไม่มีแผ่นกรองแสงบังอยู่ เพราะอาจทำให้ตาบอดได้
5. ห้าม ต่อปลั๊กโคมโปรทเข้ากับไฟฟ้า 220 โวลต์โดยเด็ดขาด

วิธีทดลอง

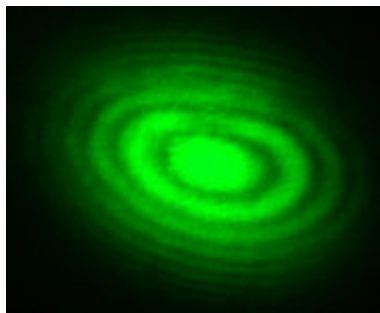
1. จัดอุปกรณ์การทดลองไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ชุดการทดลองไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์

2. ตรวจสอบอุปกรณ์โดยปลั๊กของโคมโปรทจะต้องต่อกับหม้อแปลงไฟฟ้า 220 – 110 โวลต์ เปิดสวิตช์ โดยแสงที่ผ่านแผ่นกรองแสงสีเขียวมีความยาวคลื่น 546.1 นาโนเมตร

3. มองผ่านแผ่นแยกแสง B ไปทางกระจก M1 จะเห็นภาพของเข็มแยกออกเป็น 2 ภาพ ปรับสกรูด้านหลังของกระจก M1 และ M2 เพื่อเลื่อนภาพทั้งสองให้ซ้อนกันสนิท โดยทำการปรับสกรูด้านหลังของกระจก M1 เพื่อให้ระยะภาพและระยะวัตถุของเข็มซ้อนทับกันในแนวระดับ ต่อจากนั้นทำการปรับสกรูด้านหลังของกระจก M2 ให้ระยะภาพและระยะวัตถุซ้อนทับกันในแนวแกนตั้ง จะสังเกตเห็นลวดลายการแทรกสอด เป็นวงแหวนสว่างและวงแหวนมืดอยู่ที่ภาพของปลายเข็มพอดี ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 แสดงลวดลายการแทรกสอด เป็นเส้นโค้งสว่างและมีดสลับกันไป

4. สูดอากาศออกจากทรงกระบอก พร้อมกับมองที่ปลายเข็ม สังเกตการเลื่อนของวงแหวนสว่างและวงแหวนมืดผ่านปลายเข็ม จนกระทั่งวงแหวนสว่างและวงแหวนมืดหยุดเลื่อนแสดงว่าภายในทรงกระบอกเป็นสุญญากาศ หมุนลิ้นปิด – เปิดเพื่อปิดไม่ให้อากาศเข้าทรงกระบอก

5. มองที่ปลายเข็ม ค่อยๆ คลายลิ้นปิด – เปิดเพื่อให้อากาศเข้าอย่างช้าๆ นับจำนวนวงแหวนสว่างหรือวงแหวนมืดที่เลื่อนผ่านปลายเข็มจนกระทั่งวงแหวนหยุดเลื่อน (N)

6. ทำการทดลองข้อ 4 และ 5 ซ้ำอีก 2 ครั้ง บันทึกค่าและหาค่าเฉลี่ยของ N

7. ใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์วัดความยาวของทรงกระบอก (d) 3 ครั้ง โดยไม่วัดความหนาของแผ่นแก้วที่ปิดหัว-ท้ายของทรงกระบอก บันทึกและหาค่าเฉลี่ย

8. ใช้ค่าเฉลี่ย N และ d มาคำนวณความเร็วแสงในอากาศ และค่าดัชนีหักเหของอากาศ โดยใช้สมการ (5) และ (6) ตามลำดับ

9. คำนวณเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าดัชนีหักเหของอากาศเทียบกับ $n_{\text{อากาศ}} = 1.00026$ (ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส)

10. แสดงตัวอย่างการคำนวณความเร็วแสงในอากาศ ค่าดัชนีหักเหของอากาศ และเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของดัชนีหักเหของอากาศ

11. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ชื่อผู้ปฏิบัติการ รหัสประจำตัว..... หมู่ปฏิบัติการที่.....

ผู้ร่วมปฏิบัติการ เลขที่ หมู่อ้อยที่.....

1. ปฏิบัติการวิชาฟิสิกส์ 01420222 ห้อง

2. วันที่ เดือน พ.ศ.

3. อาจารย์ผู้สอน

บันทึกผลการทดลอง

ปฏิบัติการไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์

สมมติฐานการทดลอง

ผลการทดลอง

ผลการวัดปริมาณ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
จำนวนวงแหวนที่เลื่อน (N)				
ความยาวของทรงกระบอก (d) [.....]				
ความเร็วของแสง (v) [.....]				

ค่าดัชนีหักเหของอากาศ ($n_{\text{อากาศ}}$)

ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนดัชนีหักเหของอากาศ

แสดงวิธีคำนวณ

1. ความเร็วของแสง (v) ในอากาศ

2. ดรรชนีหักเหของอากาศ ($n_{\text{อากาศ}}$)

3. เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนดรรชนีหักเหของอากาศ

สรุปผลการทดลอง

วิจารณ์ผลการทดลอง

การทดลองที่ 4

อิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาปรากฏการณ์อิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ในสารตัวอย่าง diphenylpicrylhydrazyl (DPPH)
2. เพื่อหาสัญญาณการดูดกลืนพลังงานของอิเล็กตรอน ในสารตัวอย่าง DPPH
3. เพื่อคำนวณค่าแฟกเตอร์ g ของอิเล็กตรอนอิสระใน DPPH
4. เพื่อคำนวณความหนาครึ่งค่า (half width) ของเส้นสเปกตรัมดูดกลืน

ทฤษฎี

อิเล็กตรอนในวงโคจรรอบนิวเคลียสจะมีเลขควอนตัมระดับค่าต่างๆ ถึง 4 ตัว ได้แก่ n, l, m_l, m_s
 n เป็นเลขควอนตัมหลัก (principle quantum number) ระดับพลังงานของอิเล็กตรอน $n = 1, 2, 3, \dots$
 l เป็นเลขควอนตัมออร์บิทัล (orbital quantum number) ระดับพลังงานของอิเล็กตรอน $l = 0, 1, 2, \dots, n-1$
 m_l เป็นเลขควอนตัมออร์บิทัลในแกน z หรือแนวสนามแม่เหล็ก $m_l = -l, -l+1, \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots, l-1, l$
โดย m_l มีได้ $2l+1$ ค่า m_s เป็นเลขควอนตัมของการสปิน (spin quantum number)

Schrödinger equation ประสบความสำเร็จในการทำนายระดับพลังงานของอะตอมไฮโดรเจน แต่ไม่สามารถอธิบายเรื่องราวทั้งหมดเกี่ยวกับอิเล็กตรอนในอะตอมได้ บางระดับพลังงานจะแสดงการแยกของระดับพลังงาน แม้จะไม่อยู่ในสนามแม่เหล็กก็ตาม ซึ่งคล้ายกับการแยกสเปกตรัมในปรากฏการณ์ซีมาน (Zeeman Effect) ซึ่งอยู่ในสนามแม่เหล็ก

ตัวอย่างเช่น เส้นสเปกตรัมของอะตอมไฮโดรเจนบางเส้นแยกออกเป็นเซตของเส้นที่อยู่ใกล้กัน ในทำนองเดียวกันเส้นสีเหลืองของโซเดียมซึ่งเกิดจากการเคลื่อนย้ายของอิเล็กตรอนตัวนอกสุด (valence electron) จาก $4p$ ไปยัง $3s$ เป็นเส้นคู่ที่มีความยาวคลื่น 589.0 nm และ 589.6 nm ซึ่ง Schrödinger equation ไม่สามารถอธิบายได้

ในปี ค.ศ. 1925 Samuel Goudsmidt และ George Uhlenbeck ได้เสนอแนวคิดว่า อิเล็กตรอนประพัตต์ตัวคล้ายประจุทรงกลมที่กำลังหมุนรอบตัวเอง (Intrinsic spin) อิเล็กตรอนนี้จะมีโมเมนต์เชิงมุมของการสปิน (spin angular momentum) S ดังสมการ

$$S = \sqrt{s(s+1)} \hbar \quad (1)$$

เมื่อ s เป็นสปินของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{2}$, $\hbar$ เป็นค่าคงตัวของพลังค์ (Planck's constant) h หารด้วย 2π และอิเล็กตรอนจะมีโมเมนต์แม่เหล็ก (magnetic moment) μ_s มีค่าดังสมการ

$$\mu_s = -g_s \frac{e}{2m} S \quad (2)$$

เมื่อ e เป็นประจุของอิเล็กตรอนซึ่งมีค่า $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$

m เป็นมวลของอิเล็กตรอนซึ่งมีค่า 9.109×10^{-31} kg

g_s เป็นค่าแฟกเตอร์ g (g - factor) ของอิเล็กตรอนตามทฤษฎี g_s มีค่าคงตัวเท่ากับ 1 แต่จากการทดลอง $g_s = 2.0037$

ในปี ค.ศ. 1928 P.A.M. Dirac ได้เสนอแนวคิดที่ว่า สปินของอิเล็กตรอนควรใช้ทฤษฎีควอนตัมเชิงสัมพัทธภาพ (relativistic quantum theory) อธิบาย ทำให้สามารถหาค่า g ได้เท่ากับ 2 ซึ่งต่างจากผลการทดลองเล็กน้อย ต่อมาภายหลังอธิบายโดยใช้ ควอนตัมอิเล็กโทรไดนามิกส์ (quantum electrodynamics) หรือพิจารณาจากอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับสนามของตัวเอง ก่อนหน้านั้น Otto Stern และ Walter Gerlach ได้ทำการทดลองผ่านลำแสงจากอะตอมไปยังบริเวณสนามแม่เหล็กไม่สม่ำเสมอ ปรากฏว่าลำแสงของอะตอมมีการเลี้ยวเบน Stern และ Gerlach จึงสรุปว่า สปินของอิเล็กตรอนภายในสนามแม่เหล็กมีการหมุน 2 ทิศทาง การหมุนทิศหนึ่งทำให้เกิดสปินทิศขึ้น แต่การหมุนทิศตรงข้ามทำให้เกิดสปินทิศลงหรือมีทิศเดียวกับสนามแม่เหล็กและมีทิศตรงข้ามกับสนามแม่เหล็ก

ถ้า S_z เป็นองค์ประกอบของโมเมนตัมเชิงมุมของการหมุนในแนวแกน z หรือในทิศเดียวกับสนามแม่เหล็ก S_z มีค่าดังนี้

$$S_z = m_s \hbar \quad (3)$$

เมื่อ m_s เป็นเลขควอนตัมของการสปิน (spin quantum number) m_s มี 2 ค่าดังนี้

$$\begin{aligned} m_s &= +\frac{1}{2} && \text{สปินทิศขึ้น} \\ m_s &= -\frac{1}{2} && \text{สปินทิศลง} \end{aligned}$$

สำหรับโมเมนต์แม่เหล็ก μ_s มีการจัดเรียงเช่นเดียวกับโมเมนตัมเชิงมุมของสปิน ดังนั้นองค์ประกอบในแนวแกน z ของ μ_s มีดังนี้

$$\mu_{s,z} = -g_s m_s \mu_B \quad (4)$$

เมื่อ $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m}$ เป็นค่าคงตัวเรียกว่า **บอร์แมกนีตรอน (Bohr magneton)** μ_B มีค่า 9.274×10^{-24} J/T หรืออาจกล่าวได้ว่าสปินและโมเมนต์แม่เหล็กหมุนรอบแกนสนาม ทำให้องค์ประกอบในแนวแกน z มีค่าคงที่

เมื่อให้พลังงานกับอิเล็กตรอน จะมีเงื่อนไขการดูดกลืนพลังงานดังสมการ

$$\Delta E = hf = g_s \mu_B B \quad (5)$$

โดยให้ $f = 146$ MHz (ค่าจากเครื่องมือ) และค่าคงตัวของพลังค์ $h = 6.626 \times 10^{-34}$ J·s สนามแม่เหล็กที่กึ่งกลางระหว่างขดลวด Helmholtz ที่มีจำนวนรอบ $N = 250$ รอบ รัศมี $R = 0.054$ m และมีกระแส I (หน่วย A) ผ่านมีค่า

$$B = \frac{8\mu_0 NI}{5\sqrt{5}R} \quad (\text{หน่วย T}) \quad (6)$$

โดยที่ $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m}\cdot\text{A}^{-1}$ จะหาค่าแฟกเตอร์ g_s ได้เป็น

$$g_s = \frac{hf}{\mu_B B} = \frac{0.01043}{B(\text{T})} \quad (7)$$

หรือแทนค่าสนามแม่เหล็กสมการ (6) ลงไปจะได้

$$g_s = \frac{2.507}{I_r} \quad (8)$$

โดยที่ I_r เป็นกระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งเรโซแนนซ์ของเส้นการดูดกลืน (จะกล่าวอีกครั้งในวิธีการทดลองตอนที่ 2 รูปที่ 8)

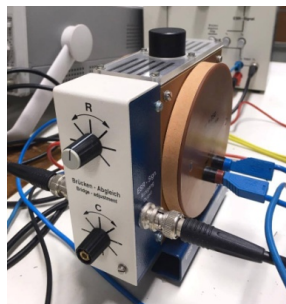
อีกปริมาณที่มีความสำคัญสำหรับการทดลอง ESR คือค่า full width at half maximum ของเส้นการดูดกลืน นิยามเป็น

$$\Delta B = |B_2 - B_1| = \frac{8\mu_0 N}{5\sqrt{5}R} \Delta I \quad (\text{หน่วย T}) \quad (9)$$

โดยที่ $\Delta I = |I_2 - I_1|$ และ I_1 และ I_2 เป็นกระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุดของเส้นการดูดกลืน (ดูรูปที่ 8)

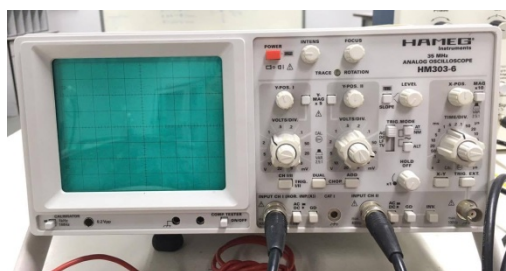
อุปกรณ์การทดลอง

1. Bridge-adjustment



ภาพที่ 1 เครื่องมือสำหรับปรับหาสัญญาณการดูดกลืน

2. Oscilloscope 1 เครื่อง



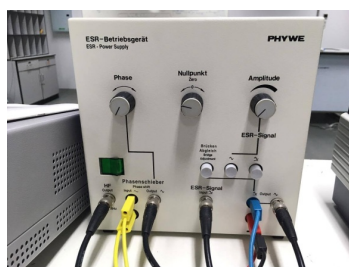
ภาพที่ 2 เครื่องออสซิลอโคป

3. Digital multimeter ใช้สำหรับวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 1 เครื่อง



ภาพที่ 3 มัลติมิเตอร์ชนิดดิจิทัล

4. ESR-Power supply



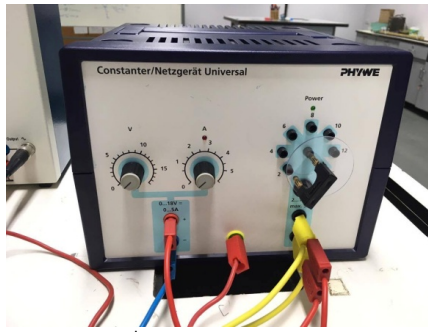
ภาพที่ 4 แหล่งจ่ายสัญญาณสำหรับการดูดกลืน

5. Digital Multimeter Peak Tech 2010 ใช้สำหรับวัดค่ากระแสไฟฟ้า 1 เครื่อง



ภาพที่ 5 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ Peak Tech 2010

6. Power Constanter



ภาพที่ 6 แหล่งจ่ายไฟฟ้าคงตัว

7. สารตัวอย่าง DPPH (diphenylpicrylhydrazyl)

ข้อห้ามและข้อควรระวัง

1. ห้ามถอดอุปกรณ์ใด ๆ โดยไม่ได้รับความเห็นชอบจากผู้สอน หากเกิดความเสียหายอันเกิดจากการไม่เชื่อฟังผู้สอน ผู้ทดลองต้องรับผิดชอบ
2. ให้ปิดเครื่องออสซิลโลสโคปหลังจากใช้เสร็จแล้วทันที

วิธีการทดลอง

ตอนที่ 1 ติดตั้งอุปกรณ์

1. ตรวจสอบการต่ออุปกรณ์การทดลองที่เตรียมไว้ดังภาพที่ 7



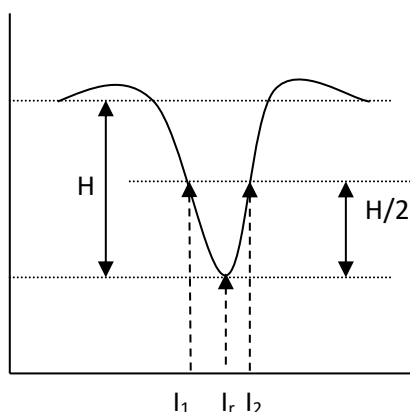
ภาพที่ 7 แสดงการต่อชุดอุปกรณ์ในการทดลอง

2. ปรับ Bridge-adjustment ให้อยู่ในภาวะเริ่มต้นทดลอง โดยการปรับปุ่ม R (หมุนได้ 270 องศา) ไว้ที่ตำแหน่งกึ่งกลาง ปรับปุ่ม C (หมุนได้มากกว่า 1 รอบ) หมุนเบาๆ ไปตำแหน่งซ้ายสุด
3. กดปุ่ม Power ของดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (DMM hp 93A) ตั้งเป็นโวลต์มิเตอร์กระแสตรง
4. ปรับ ESR-Power Supply ให้พร้อมสำหรับการตรวจหาสัญญาณการดูดกลืนพลังงานของ DPPH
 - 4.1 กดปุ่มเปิด (สีเขียว) ESR-Power Supply
 - 4.2 หมุนปุ่มปรับ Amplitude ไปขวาสุด (หมุนได้ไม่เกิน 1 รอบ)
 - 4.3 กดปุ่ม Bridge-adjustment

- 4.4 ปรับปุ่ม Zero ไปทางขวา จนกระทั่งค่าความต่างศักย์ที่อ่านได้จากดิจิตอลมัลติมิเตอร์เข้าใกล้ศูนย์มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อเป็นการปรับ Bridge ให้สมดุล
- 4.5 กดปุ่ม ESR signal
5. เปิดดิจิตอลมัลติมิเตอร์กดปุ่มสวิตช์เปิด (Peak Tech 2010 DMM) ปรับเป็นแอมมิเตอร์ฟิสิกส์ 20 A (สายสีฟ้าจะต้องเสียบอยู่ที่ com และ 20 A เท่านั้น)
6. จ่ายกระแสให้กับ Helmholtz coil เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กผ่าน DPPH โดยใช้ Power Constanter
 - 6.1 ตรวจสอบปุ่มปรับความต่างศักย์ V กระแส A ให้อยู่ในตำแหน่งศูนย์ แล้วเปิดเครื่อง Power Constanter
 - 6.2 เสียบสายเชื่อมต่อสัญญาณความต่างศักย์ AC เข้ากับความต่างศักย์ DC เลือกที่ 2 A
 - 6.3 หมุนปุ่มปรับกระแส A ไปที่ 1.2 A
 - 6.4 หมุนปุ่มปรับความต่างศักย์ V เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนอ่านกระแสจาก เครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Peak Tech 2010 DMM) ได้ 1.20 A
7. เปิดออสซิลโลสโคปให้พร้อมใช้งาน โดย
 - 7.1 กดปุ่ม Power สีแดง รอจนสัญญาณสีเขียวบนจอออสซิลโลสโคปชัดเจน
 - 7.2 ปรับ Volt/DIV ของ CH I ไปที่ 1 V
 - 7.3 ปรับ Volt/DIV ของ CH II ไปที่ 50 mV
 - 7.4 ปรับ Time/DIV ไปที่ 0.5 ms
 - 7.5 กดปุ่ม x-y บนออสซิลโลสโคปเพื่อดูสัญญาณการดุดกลืนในโหมด xy

ตอนที่ 2 หาสัญญาณการดุดกลืน

1. หมุนปุ่มปรับ C ของ Bridge-adjustment ไปทางขวาอย่างช้าๆ จนเห็นสัญญาณการดุดกลืนพลังงานของ DPPH แบบ symmetry ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 แสดงสัญญาณการดุดกลืนพลังงาน

2. หมุนปุ่มปรับเฟสของ ESR-Power supply เพื่อให้สัญญาณการดุดกลืนซ้อนทับกัน
3. บันทึกค่ากระแส I_r จากเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ Peak Tech 2010 DMM

4. วาดรูปสัญญาณและค่าสนามแม่เหล็ก half width โดยเลื่อนจุดต่ำสุดของสัญญาณการดูดกลืนจากการปรับค่าต่างศักย์ของเครื่อง Power Constanter ให้จุดต่ำสุดของสัญญาณการดูดกลืนอยู่ที่ตำแหน่ง I_1 และ I_2 จาก เครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ Peak Tech 2010 DMM และคำนวณผลต่างกระแส I_1 และ I_2
5. คำนวณค่าสนามแม่เหล็ก half width (ΔB) จากผลต่างกระแส I_1 และ I_2 โดยใช้สมการ (9)
6. คำนวณแฟกเตอร์ g_s ของอิเล็กตรอนใน DPPH จากสมการ (8) และเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน 2.0037 โดยหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน
7. หาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าสนามแม่เหล็ก half width (ΔB) ที่วัดได้กับค่ามาตรฐาน $2.8 \times 10^{-4} \text{ T}$
8. แสดงการคำนวณแฟกเตอร์ g_s ของอิเล็กตรอนใน DPPH
9. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ตอนที่ 3 วิธีการปิดอุปกรณ์ต่าง ๆ เมื่อทดลองเรียบร้อยแล้ว

1. ปิดเครื่อง Power Constanter
 - 1.1 ปรับปุ่มหมุนความต่างศักย์ V ลงเป็นศูนย์ และหมุนกระแส A ลงเป็นศูนย์ ตามลำดับ
 - 1.2 ดึงสายเชื่อมต่อสัญญาณความต่างศักย์ AC เข้ากับความต่างศักย์ DC ออกจากกัน
 - 1.3 กดปุ่มปิดสวิตช์เครื่อง Power Constanter
2. กดปุ่มสียฟ้าปิด Peak Tech 2010 DMM
3. ตั้งค่า Bridge-adjustment กลับไปค่าเริ่มต้น
 - 3.1 หมุนปุ่ม R ไว้ตำแหน่งกลาง
 - 3.2 หมุนปุ่ม C ไว้ตำแหน่งซ้ายสุด
4. ตั้งค่า ESR-Power Supply กลับไปค่าเริ่มต้น
 - 4.1 หมุนปุ่มปรับ Amplitude, ปุ่มปรับ Zero และปุ่มปรับ Phase ไปซ้ายสุด ตามลำดับ
 - 4.2 กดปุ่มปิดสวิตช์ ESR-Power Constanter
5. กดปุ่มปิด hp 973A DMM
6. ปลออยปุ่ม x-y ออกแล้วกดปุ่มปิดเครื่องออสซิลโลสโคป

ชื่อผู้ปฏิบัติการ รหัสประจำตัว..... หมู่ปฏิบัติการที่.....
 ผู้ร่วมปฏิบัติการ เลขที่ หมู่ย่อยที่.....
 1. ปฏิบัติการวิชาฟิสิกส์ 01420222 ห้อง
 2. วันที่ เดือน พ.ศ.
 3. อาจารย์ผู้สอน

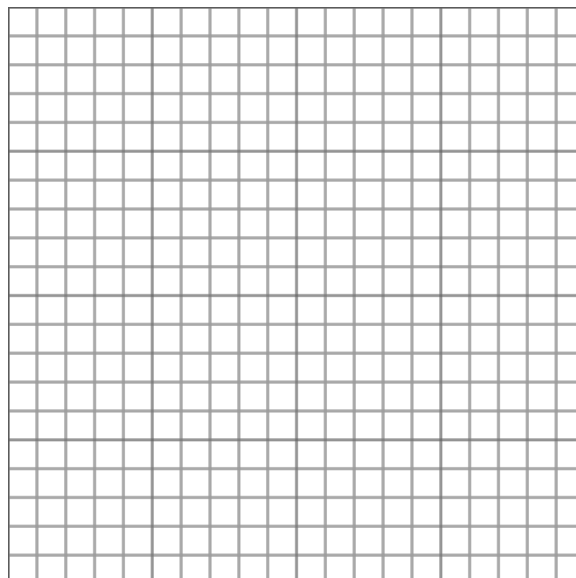
บันทึกผลการทดลอง
ปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์บนเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี

สมมติฐานการทดลอง

ผลการทดลอง

ค่ากระแส I_r จาก Peak Tech 2010 DMM

วาดรูปสัญญาณจากออสซิลโลสโคป



ค่ากระแส $I_1 =$

ค่ากระแส $I_2 =$

ผลต่างกระแส I_1 และ I_2 (ΔI) =

ค่าแฟกเตอร์ $g_s = \dots\dots\dots$

เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของแฟกเตอร์ $g_s = \dots\dots\dots$

ค่าสนามแม่เหล็ก Half width $\Delta B = \dots\dots\dots$

เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าสนามแม่เหล็ก Half width = $\dots\dots\dots$

แสดงการคำนวณ

- ค่าแฟกเตอร์ g_s

- ค่าสนามแม่เหล็ก Half width ΔB

สรุปผลการทดลอง

วิจารณ์ผลการทดลอง

การทดลองที่ 5

ประจุต่อมวลของอิเล็กตรอน

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของประจุในสนามไฟฟ้า
2. เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของประจุในสนามแม่เหล็ก
3. เพื่อหาค่าประจุต่อมวลของอิเล็กตรอน

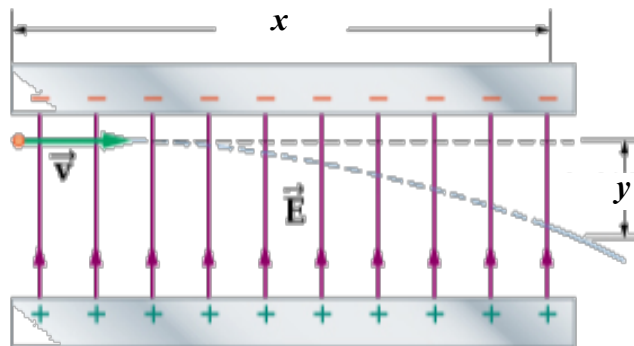
ทฤษฎี

ถ้าเร่อิเล็กตรอนมวล m ประจุ e ผ่านความต่างศักย์ V พลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับคือพลังงานศักย์ไฟฟ้ามีค่าดังนี้

$$\frac{1}{2}mv^2 = eV \quad (1)$$

ดังนั้นจากสมการ (1) อิเล็กตรอนจะถูกเร่งจนมีความเร็ว v ซึ่งเท่ากับ

$$v = \sqrt{\frac{2eV}{m}} \quad (2)$$



ภาพที่ 1 แสดงอนุภาคเคลื่อนที่ผ่านสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

ที่มา www.cramster.com

การเคลื่อนที่ของประจุในสนามไฟฟ้า

ถ้าอิเล็กตรอนที่มีความเร็ว v เคลื่อนที่ผ่านสนามไฟฟ้า E ที่มีทิศพุ่งขึ้น มีอิเล็กตรอนจะได้รับแรงจากสนามไฟฟ้า F_E มีทิศตรงข้ามกับ E ทำให้เส้นทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนโค้งลงเป็นรูปพาราโบลา ดังภาพที่ 1

- ถ้า
- y เป็นระยะเบี่ยงเบนในสนามไฟฟ้า (m)
 - x เป็นระยะทางในแนวระดับที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้า (m)
 - a_y เป็นความเร่งแนวดิ่ง (m/s^2)

แรงที่อิเล็กตรอนได้รับจากสนามไฟฟ้ามีค่าดังนี้

$$\vec{F}_E = e\vec{E} = m\vec{a}_y \quad (3)$$

และเนื่องจากอิเล็กตรอนมีความเร่งในแนวดิ่ง จะได้

$$y = u_y t + a_y t^2$$

ซึ่งถ้าความเร็วต้นแนวกว้าง y คือ u_y มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้น

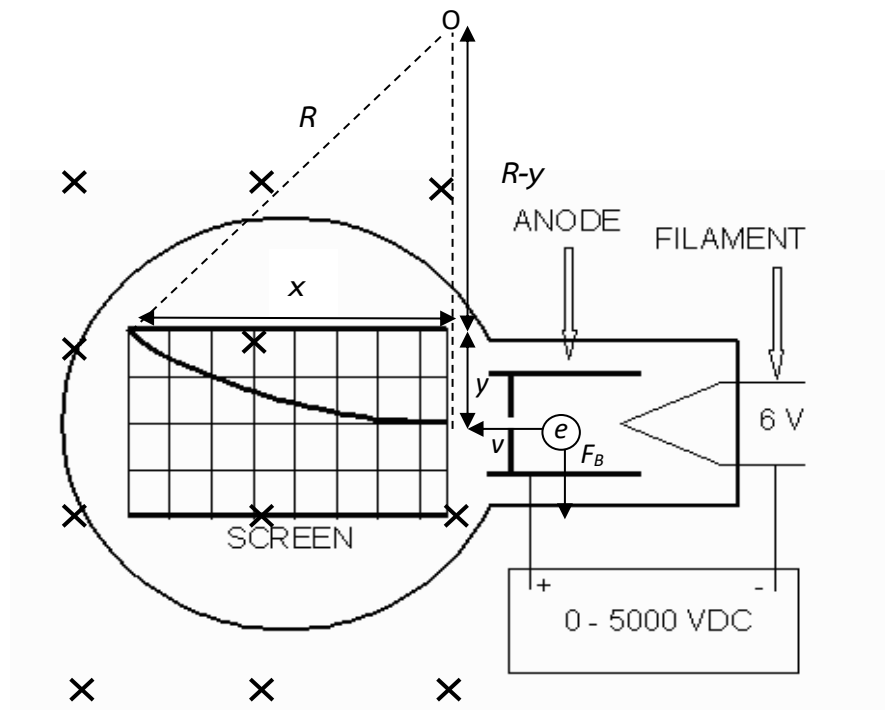
$$a_y = \frac{2y}{t^2} = \frac{2y}{(x/v)^2} = \frac{2yv^2}{x^2}$$

แทนค่า a_y ในสมการ (3) จะได้

$$eE = m \frac{2yv^2}{x^2}$$

$$y = \frac{1}{2} \left(\frac{e}{m} \right) \left(\frac{x^2}{v^2} \right) \quad (4)$$

การเคลื่อนที่ของประจุในสนามแม่เหล็ก



ภาพที่ 2 แสดงทิศทางเมื่อเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนผ่านความต่างศักย์

ที่มา webphysics.davidson.edu

เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ ซึ่งมีทิศพุ่งเข้าหน้ากระดาษด้วยความเร็ว $\vec{v}$ ซึ่งสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ และความเร็ว $\vec{v}$ มีทิศตั้งฉากกัน ดังนั้นอิเล็กตรอนจะได้รับแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็ก $\vec{F}_B$ ทำให้เส้นทางการเคลื่อนที่เป็นส่วนโค้งของวงกลมรัศมี R ดังภาพที่ 2 แรงที่ได้รับเนื่องจากสนามแม่เหล็กคือแรงสู่ศูนย์กลาง

นั่นก็คือ

$$F_B = e|\vec{v} \times \vec{B}| = \frac{mv^2}{R} \quad (5)$$

หรือ

$$v = \frac{eBR}{m} \quad (6)$$

แทนค่า v ในสมการ (2) จะได้

$$\frac{eBR}{m} = \sqrt{\frac{2eV}{m}}$$

ยกกำลังสองทั้ง 2 ข้าง จะได้

$$\begin{aligned} \frac{e^2 B^2 R^2}{m^2} &= \frac{2eV}{m} \\ \frac{e}{m} &= \frac{2V}{B^2 R^2} \end{aligned} \quad (7)$$

สำหรับรัศมี R สามารถหาได้จากระยะทางแนวแกน x และระยะทางแนวแกน y ของส่วนโค้งของวงกลมในภาพที่ 2 ดังนี้

$$\begin{aligned} R^2 &= x^2 + (R-y)^2 \\ R^2 &= x^2 + R^2 - 2Ry + y^2 \\ R &= \frac{x^2 + y^2}{2y} \end{aligned} \quad (8)$$

เนื่องจากการทดลอง แนวของสเกลของแกน x และลำอิเล็กตรอนมีความเบี่ยงเบนจากแนวราบเป็นมุม θ จึงกำหนดให้

$$R = \frac{x'^2 + y'^2}{2y'}$$

เมื่อ

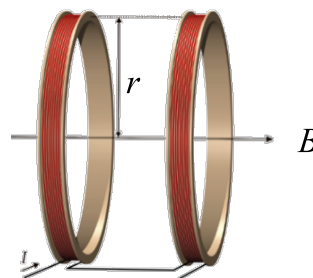
$$x' = (x + y \tan \theta) \cos \theta$$

$$y' = (y - x \tan \theta) \cos \theta$$

$$\tan \theta = 0.125$$

$$\cos \theta = 0.992$$

ส่วนสนามแม่เหล็กที่ใช้เบี่ยงเบนลำอิเล็กตรอนคือสนามแม่เหล็กในแนวผ่านจุดศูนย์กลางของขดลวดเฮล์มโฮลทซ์ ซึ่งเป็นขดลวดวงกลมสองขดลวดที่มีระนาบขนานกันในแนวตั้ง ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 แสดงขดลวดเฮล์มโฮลทซ์

ที่มา de.academic.ru

ถ้า N เป็นจำนวนรอบของขดลวดเฮล์มโฮลทซ์ (รอบ)

r เป็นรัศมีของขดลวดเฮล์มโฮลทซ์ (m)

I เป็นกระแสไฟฟ้าตรงที่ผ่านขดลวด (A)

$\vec{B}$ เป็นสนามแม่เหล็กบริเวณที่กลางขดลวด (T)

สามารถหาขนาดของ $\vec{B}$ ในหน่วยเวกเตอร์/เมตร² หรือเทสลา ได้ดังสมการที่ (9)

$$B = \frac{8\mu_0 NI}{5\sqrt{5} r} \quad (9)$$

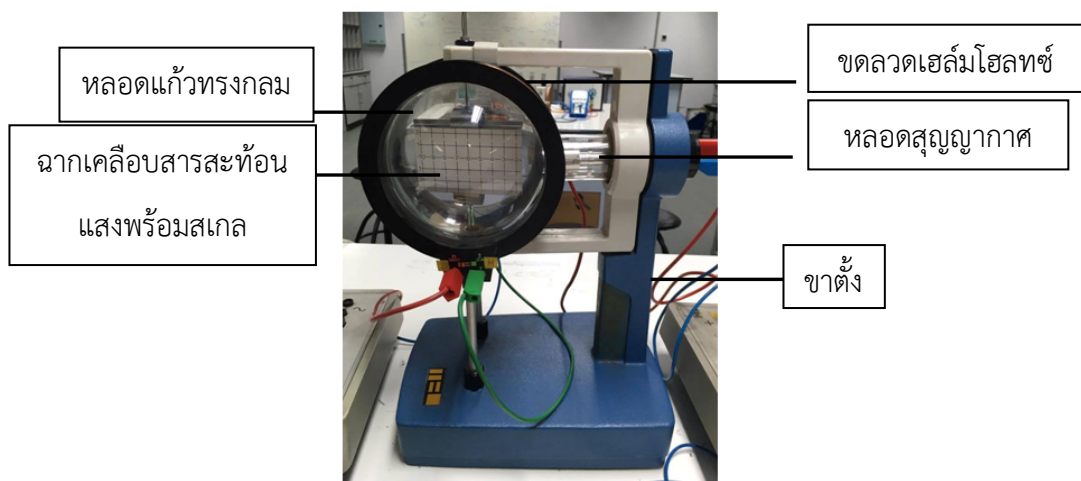
โดย $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m}\cdot\text{A}^{-1}$ จำนวนรอบของขดลวดเฮล์มโฮลทซ์ $N = 320$ และรัศมีของขดลวดเฮล์มโฮลทซ์ $r = 0.068$ เมตร

ถ้า H เป็นความเข้มของสนามแม่เหล็กหน่วยแอมแปร์/เมตร

จะได้
$$H = \frac{8NI}{5\sqrt{5} r} \quad (10)$$

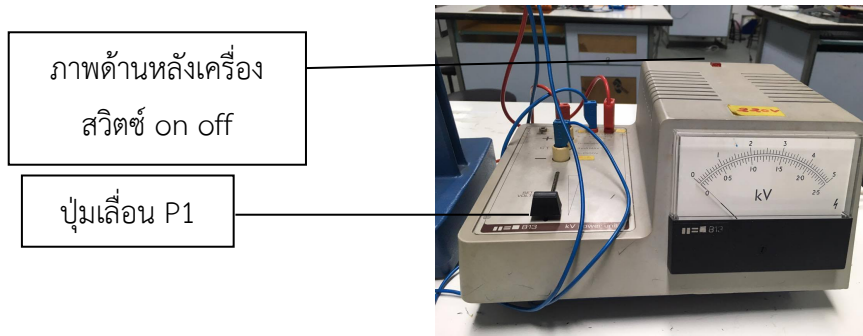
อุปกรณ์การทดลอง

- ชุดอุปกรณ์หลอดแก้วทรงกลมสุญญากาศภายในมีฉากเคลือบสารสะท้อนแสงพร้อมสเกลหน่วยเซนติเมตรและขดลวดเฮล์มโฮลทซ์



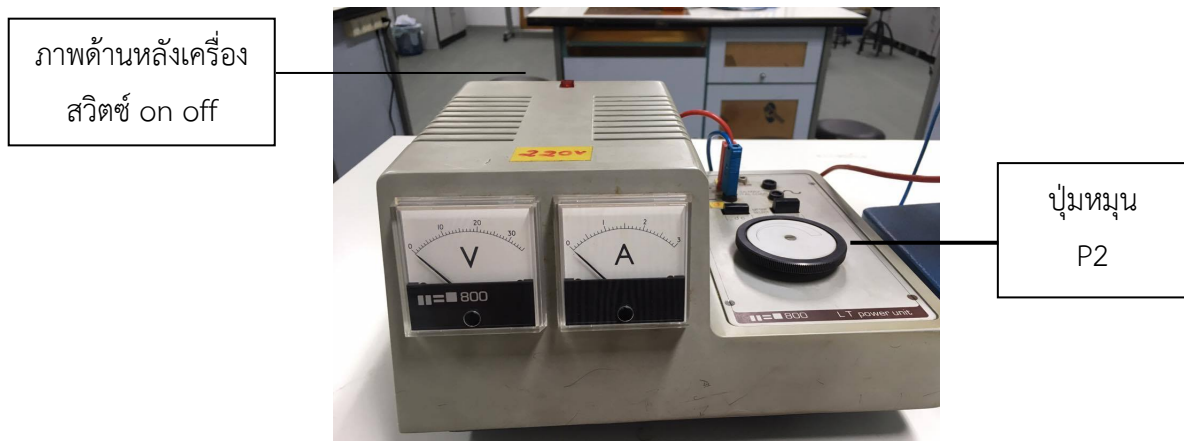
ภาพที่ 4 ชุดอุปกรณ์การทดลองประจุ่มวลของอิเล็กตรอน

- แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 0-5000 โวลต์ กระแสสูงสุด 3 แอมแปร์ เพื่อเร่งอิเล็กตรอน



ภาพที่ 5 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง กระแสสูงสุด 3 แอมแปร์

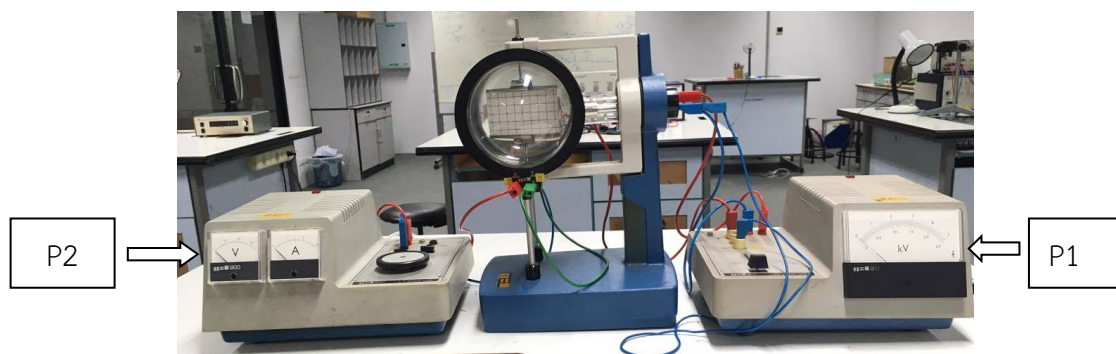
- แหล่งจ่ายไฟฟ้า กระแสสูงสุด 3 แอมแปร์ให้กับขดลวดเฮล์มโฮลทซ์



ภาพที่ 6 แหล่งจ่ายไฟฟ้า กระแสสูงสุด 3 แอมแปร์

วิธีการทดลอง

- ตรวจสอบอุปกรณ์ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 แสดงการต่ออุปกรณ์การทดลองประจุต่อมวลของอิเล็กตรอน

- กดสวิตช์ ON ที่ด้านหลังของแหล่งความต่างศักย์ หมายเลข 1
- ค่อยๆ เลื่อนปั๊ม P1 เพื่อเพิ่มความต่างศักย์ระหว่างแผ่นคู่ขนาน (V) ซึ่งมีค่าเท่ากับความต่างศักย์ที่ใช้เร่งอิเล็กตรอน ให้ความต่างศักย์ที่มีค่า 1.5 kV (อ่านสเกลด้านบน) จะเห็นลำอิเล็กตรอนเป็นเส้นตรง

4. กดสวิตช์ทางด้านหลังของ LT power unit (หมายเลข 2) ไปที่ ON ค่อยๆ หมุนปุ่มปรับกระแสไฟฟ้า P2 ให้กระแสผ่านขดลวดเฮล์มโฮลทซ์ไม่เกิน 1.5 แอมแปร์ จะสังเกตเห็นเส้นทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะเป็นส่วนโค้งของวงกลม
5. ค่อยๆ หมุนปุ่มปรับกระแส P2 ให้พอดีส่วนโค้งของวงกลมมีระยะตามแนวแกน x เป็น 4.0 เซนติเมตร และระยะตามแนวแกน y เป็น 2.0 เซนติเมตร อ่านค่ากระแส
6. ทำการทดลองข้อ 5 ซ้ำโดยให้

$$x = 3.0 \text{ เซนติเมตร } y = 2.0 \text{ เซนติเมตร}$$

$$x = 2.0 \text{ เซนติเมตร } y = 2.0 \text{ เซนติเมตร}$$
7. ค่อยๆ หมุนปุ่มปรับกระแส P2 ให้เป็นศูนย์
8. ค่อยๆ ลดปุ่ม P1 ให้ความต่างศักย์ V เป็นศูนย์ แล้วดึงปลั๊กทั้งสองลงออกจากเต้าเสียบ
9. คำนวณ R โดยใช้สมการ (8)
10. คำนวณ B โดยใช้สมการ (9)
11. คำนวณ e/m โดยใช้สมการ (7) แล้วหาค่าเฉลี่ยของ e/m
12. เปรียบเทียบ e/m เฉลี่ยกับค่า e/m ถูกต้องคือ 1.76×10^{11} คูลอมป์/กิโลกรัม โดยการหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน
13. สรุปและวิจารณ์การทดลอง

ชื่อผู้ปฏิบัติการ รหัสประจำตัว..... หมู่ปฏิบัติการที่.....

ผู้ร่วมปฏิบัติการ เลขที่ หมู่อ้อยที่.....

1. ปฏิบัติการวิชาฟิสิกส์ 01420222 ห้อง

2. วันที่ เดือน พ.ศ.

3. อาจารย์ผู้สอน

บันทึกผลการทดลอง

ประจุ่มวล

สมมติฐานการทดลอง

ผลการทดลอง

ความต่างศักย์ที่ใช้เร่งอิเล็กตรอน $\Delta V = \dots\dots\dots$ kV

ค่าแกน X (cm)	ค่าแกน Y (cm)	ความต่างศักย์ (Volt)	กระแส (A)	รัศมี R (m)	สนามแม่เหล็ก B (T)	e/m (C/kg)
4	2					
3	2					
2	2					

ค่าประจุ่มวลของอิเล็กตรอนเฉลี่ย

เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน

แสดงการคำนวณ

สรุปผลการทดลอง

วิจารณ์ผลการทดลอง

การทดลองที่ 6

ปรากฏการณ์ซีมานปกติ

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการแยกเป็นสามเส้นของปรากฏการณ์ซีมานปกติแบบตามขวาง
2. เพื่อศึกษาการแยกเป็นสองเส้นของปรากฏการณ์ซีมานปกติแบบตามยาว
3. เพื่อหาสถานการณ์โพลาไรซ์ขององค์ประกอบของการแยกเป็นสามและสองเส้นของปรากฏการณ์ซีมานปกติแบบตามขวางและตามยาว
4. เพื่อคำนวณหาค่าประจุมวลของอิเล็กตรอนที่เปล่งแสง

ทฤษฎี

ปรากฏการณ์ซีมาน (Zeeman Effect) คือ ปรากฏการณ์การแยกออกของเส้นสเปกตรัม หรือระดับชั้นพลังงานในอะตอม เนื่องจากอะตอมอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กภายนอก ปรากฏการณ์นี้ได้ถูกทำนายเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1895 โดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อว่า ลอเรนซ์ (H.A. Lorentz) ซึ่งการทำนายนี้เป็นส่วนหนึ่งในทฤษฎีเกี่ยวกับอิเล็กตรอนแบบดั้งเดิมของเขา และต่อมาซีมาน (P. Zeeman) ได้ทำการทดลองเพื่อยืนยันปรากฏการณ์นี้ได้สำเร็จ ซีมานได้ค้นพบการแยกของเส้นสเปกตรัมเป็นสามเส้นในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก และการแยกเป็นสองเส้นของเส้นสเปกตรัมในแนวขนานกับสนามแม่เหล็ก ซึ่งการแยกของเส้นสเปกตรัมทั้งสองแบบนี้ ถูกเรียกว่า ปรากฏการณ์ซีมานปกติ (Normal Zeeman Effect) และต่อมาพบว่าการแยกออกของเส้นสเปกตรัมที่ซับซ้อนกว่าปรากฏการณ์ซีมานปกติ ดังนั้นจึงเรียกปรากฏการณ์ที่ซับซ้อนว่า ปรากฏการณ์ซีมานประหลาด (Anomalous Zeeman Effect) ในการที่จะอธิบายปรากฏการณ์การแยกออกของเส้นสเปกตรัมเหล่านี้ ได้มีการเสนอสมมติฐานของอิเล็กตรอนสปินโดยนักวิทยาศาสตร์สองคนชื่อว่า กราวสมิต (Goudsmit) และอูเลนเบค (Uhlenbeck) ในปี 1925 ซึ่งสมมติฐานนี้สามารถอธิบายทั้งปรากฏการณ์ซีมานปกติ (Normal Zeeman Effect) และปรากฏการณ์ซีมานประหลาด (Anomalous Zeeman Effect) ได้เป็นอย่างดี

ปรากฏการณ์ซีมานปกติเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนชั้นสถานะอิเล็กตรอนในอะตอมที่มีโมเมนตัมเชิงมุมของสปิน (Spin angular momentum: $(\vec{S}=0)$) รวมเป็นศูนย์ โดยที่โมเมนตัมเชิงมุมรวม (Total angular momentum: $\vec{J}$) คือ $\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$ ซึ่งเมื่อ $\vec{S} = 0$ แสดงว่า โมเมนตัมเชิงมุมรวมเป็นสถานะที่มีเพียงโมเมนตัมเชิงมุมของออร์บิตอล (Orbital angular momentum: $\vec{L}$) นั่นคือ $\vec{J} = \vec{L}$ ดังนั้นสำหรับโมเมนต์แม่เหล็ก (Magnetic moment: $\vec{\mu}$) ของสถานะสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$\vec{\mu} = \frac{\mu_B}{\hbar} \vec{J} \quad (1)$$

โดยที่

$$\mu_B = \frac{\hbar}{2m_e} \quad (2)$$

เมื่อ μ_B คือ บอห์รแมกนีตรอน (Bohr's magnetron)

m_e คือ มวลของอิเล็กตรอน

e คือ ประจุของอิเล็กตรอน

$\hbar$ คือ ค่าคงตัวของพลังค์ (Planck's constant, h)หารด้วย 2π

เมื่อพิจารณาในสนามแม่เหล็กภายนอก $\vec{B}$ โมเมนต์แม่เหล็กจะมีค่าพลังงาน คือ

$$\vec{E} = -\vec{\mu} \cdot \vec{B} \quad (3)$$

และจะได้องค์ประกอบของโมเมนต์เชิงมุมในทิศทางของสนามแม่เหล็ก คือ

$$J_z = M_J \hbar \quad (4)$$

โดยที่

$$M_J = J, J-1, \dots, 0, \dots, -J+1, -J$$

ดังนั้น ค่าโมเมนต์เชิงมุม จะแยกออกเป็นองค์ประกอบซีมาน (Zeeman components) จำนวน $2J+1$ และจะมีค่าที่แตกต่างกันโดยขึ้นอยู่กับค่าของ M_J ช่วงพลังงานขององค์ประกอบซีมานที่อยู่ติดกัน เช่น M_J และ M_{J-1} คือ

$$\Delta E = \mu_B B \quad (5)$$

และความถี่ของการหมุนควง (Precession frequency) ของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กจะมีค่า

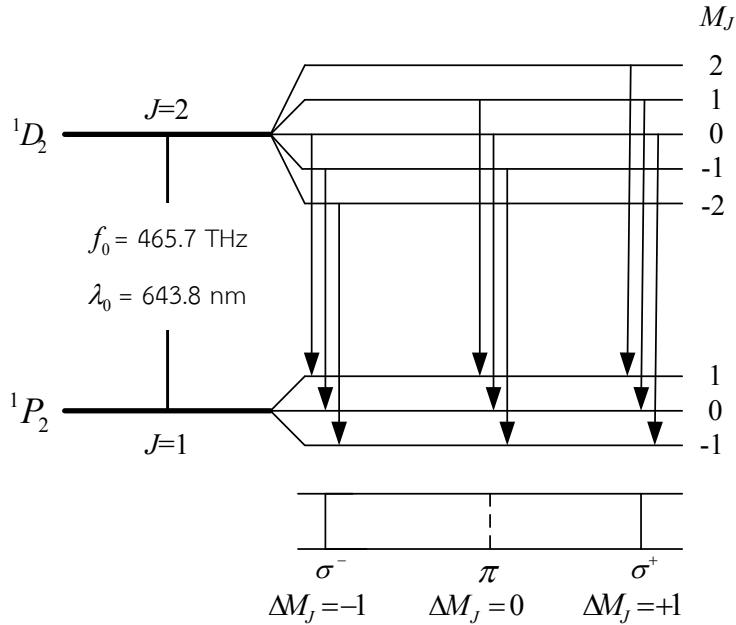
$$f = \frac{1}{4\pi} \frac{e}{m} B \quad (6)$$

โดยเรียก f นี้ว่า ความถี่ลามอร์ (Larmor frequency) ซึ่งการหมุนควงของอิเล็กตรอนจะทำให้เกิดการแยกของเส้นสเปกตรัมในสนามแม่เหล็ก

สำหรับปรากฏการณ์ซีมานปกติเราสามารถพบได้ในเส้นสเปกตรัมสีแดงของแคดเมียม ($\lambda_0 = 643.8$ nm ความถี่ $f_0 = 465.7$ THz) ซึ่งจะสัมพันธ์กับการเปลี่ยนระดับพลังงานจาก $^1D_2 (J=2, S=0)$ ไปยัง $^1P_1 (J=1, S=0)$ ของอิเล็กตรอนชั้นที่ห้า ดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งจากรูปเมื่ออะตอมอยู่ในสนามแม่เหล็ก ระดับ 1D_2 แยกเป็น 5 ระดับพลังงาน หรือ 5 องค์ประกอบซีมาน และระดับ 1P_1 แยกเป็น 3 ระดับพลังงาน โดยระยะห่างของพลังงานของแต่ละระดับขึ้นพลังงานสามารถคำนวณดังสมการ (5)

การเปลี่ยนระดับพลังงานเหล่านี้ พลังงานจะปลดปล่อยในรูปของการแผ่รังสีไดโพลไฟฟ้า และเป็นไปตามกฎการเลือก (Selection rule) สำหรับเลขควอนตัมแม่เหล็ก M_J นั่นคือ

$$\Delta M_J = \begin{cases} -1 & \text{องค์ประกอบ } \sigma^- \\ 0 & \text{องค์ประกอบ } \pi \\ +1 & \text{องค์ประกอบ } \sigma^+ \end{cases} \quad (7)$$



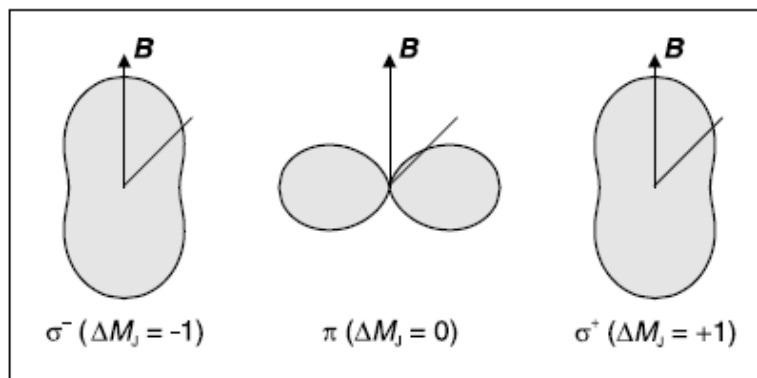
ภาพที่ 1 แสดงการแยกและการเปลี่ยนระดับพลังของปรากฏการณ์ซีแมนปกติในแคดเมียม

จากภาพที่ 1 จะได้เห็นว่ามีส่วนประกอบจำนวน 3 เส้น สำหรับองค์ประกอบ π ความถี่ไม่เปลี่ยน ส่วนองค์ประกอบ σ ทั้งสอง ความถี่เปลี่ยนไปตามสมการ

$$\Delta f = \pm \frac{\Delta E}{h} \quad (8)$$

Δf เป็นผลต่างของความถี่เมื่อเปรียบเทียบกับความถี่ตอนเริ่มต้น (f_0) ในสมการนี้ ΔE คือพลังงานในการแยกที่คำนวณได้ในสมการ (5)

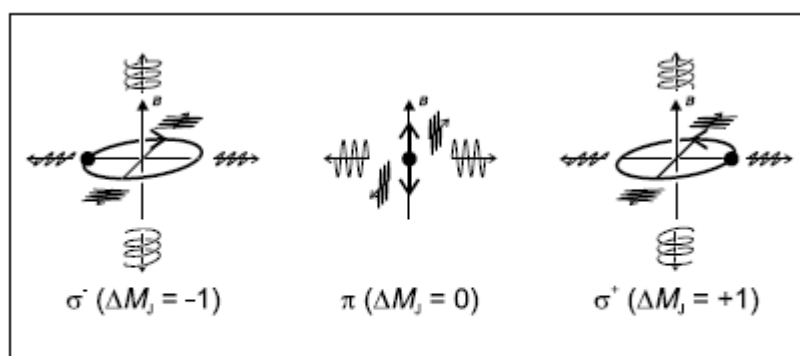
โฟตอนหรือแสง (Photons) ที่ปลดปล่อยออกมาเมื่ออะตอมอยู่ในสนามแม่เหล็ก จะแสดงการกระจายเชิงมุม (Angular distribution) ที่แตกต่างกัน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของโมเมนต์เชิงมุม ΔM_J ในทิศของสนามแม่เหล็ก โดยการกระจายเชิงมุมในรูปแบบของไดอะแกรมเชิงขั้วสองมิติสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 การกระจายเชิงมุมของการแผ่รังสีไดโพลไฟฟ้า (Electrical dipole radiation) (ΔM_J : องค์ประกอบของโมเมนต์เชิงมุมสำหรับโฟตอนที่ปลดปล่อยในทิศทางของสนามแม่เหล็ก)

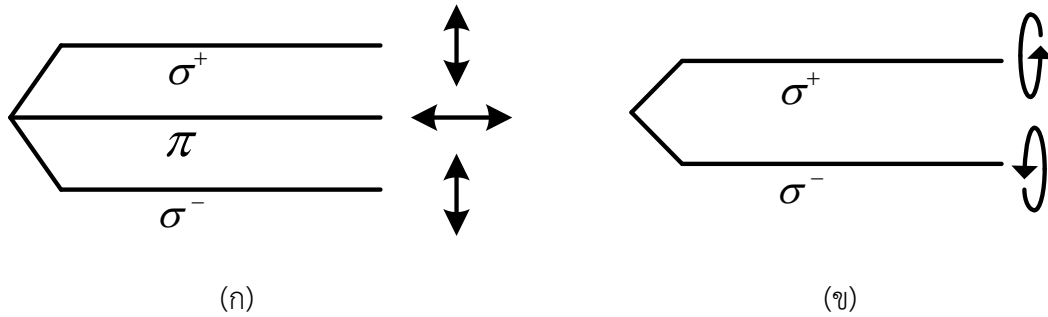
จากทฤษฎีแบบดั้งเดิม ในกรณีที่ $\Delta M_J = 0$ จะมีความสัมพันธ์กับการสั่นน้อย ๆ ของไดโพลในทิศทางขนานกับสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะพบว่าไม่มีโฟตอนซึ่งปลดปล่อยออกมาในทิศทางของสนามแม่เหล็ก ดังจะเห็นได้จากภาพที่ 2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไม่พบองค์ประกอบ π ในทิศทางที่ขนานกับสนามแม่เหล็ก และจะพบเพียงแสงซึ่งถูกปลดปล่อยในทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กเป็นแสงโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น (Linearly polarized light) โดยมีเวกเตอร์ E สั่นในทิศของไดโพลและขนานกับสนามแม่เหล็กดังแสดงในภาพที่ 3

ในทางกลับกัน กรณีที่ $\Delta M_J = \pm 1$, โฟตอนส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ในทิศของสนามแม่เหล็ก ซึ่งในกรณีนี้จะมีสองไดโพลขนานซึ่งสั่นแบบมีเฟสต่างกัน 90 องศา จากการรวมกันของสองไดโพลนี้จะทำให้เกิดกระแสวิงกลม (Circulating current) ดังนั้นในทิศทางของสนามแม่เหล็กจะพบแสงโพลาไรซ์แบบวงกลม (Circularly polarized light) ถูกปลดปล่อยออกมา โดยถ้าสังเกตจากในทิศทางแกนบวก จะพบการหมุนวนแบบตามเข็มนาฬิกาสำหรับ $\Delta M_J = +1$ และพบการหมุนวนแบบทวนเข็มนาฬิกาสำหรับ $\Delta M_J = -1$ ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 แผนผังแสดงโพลาไรเซชันขององค์ประกอบซีมาน

ดังนั้นโดยสรุปเราสังเกตจากทิศตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กจะพบปรากฏการณ์ซีมานปกติแบบตามขวาง (the Zeeman effect in the transverse Configuration) มีเส้นสเปกตรัมสามเส้น โดยสเปกตรัมสองเส้นจะเกิดจากองค์ประกอบ $\sigma^\pm$ หรือก็คือกรณีที่ $\Delta M_J = \pm 1$ และมีสเปกตรัมอีกหนึ่งเส้นเกิดจากองค์ประกอบ π หรือก็คือกรณีที่ $\Delta M_J = 0$ ซึ่งสเปกตรัมที่เกิดจากองค์ประกอบ $\sigma^\pm$ จะเป็นแสงโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นซึ่งตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก และสเปกตรัมที่เกิดจากองค์ประกอบ π จะเป็นแสงโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นซึ่งตั้งขนานกับสนามแม่เหล็ก และเมื่อเราสังเกตจากทิศตั้งขนานกับสนามแม่เหล็กจะพบปรากฏการณ์ซีมานปกติแบบตามยาว (the Zeeman effect in the longitudinal configuration) ซึ่งจะพบเส้นสเปกตรัมเพียงสองเส้น โดยสเปกตรัมทั้งสองเส้นจะเกิดจากองค์ประกอบ $\sigma^\pm$ และเป็นแสงโพลาไรซ์แบบวงกลม (Circularly polarized light) โดยจะพบการหมุนวนแบบตามเข็มนาฬิกาเมื่อเป็นแสงซึ่งเกิดจากองค์ประกอบ σ^+ และพบการหมุนวนแบบทวนเข็มนาฬิกาเมื่อแสงเกิดจากองค์ประกอบ σ^- ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 โพลาริเซชันของการแยก (ก) สามเส้น และ (ข) สองเส้นของปรากฏการณ์ซีมานปกติ

ปรากฏการณ์ซีมานสามารถสังเกตการแยกของแสงที่มีองค์ประกอบโพลาริเซชันแตกต่างกัน เพื่อที่จะแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างเส้นสเปกตรัม เราจำเป็นต้องใช้เครื่องมือสเปกตรัมที่มีความละเอียดสูง ตัวอย่างเช่นสำหรับองค์ประกอบ σ ของเส้นสีแดงของแคดเมียมที่มีความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก $B = 1$ เทสลา (T) จะมีความถี่แตกต่างกัน $\Delta f = 14$ GHz หรือความยาวคลื่นแตกต่างกัน $\Delta \lambda = 0.02$ nm ดังนั้นแผ่น Lummer-Gehrcke ที่ใช้ในการทดลองนี้จะต้องมีความแม่นยำสูงทั้งในความขนานและความราบเรียบของพื้นผิว แสงที่กระจายในแนวตั้ง ผ่านเข้าไปในสลิตแนวราบ และทะลุเข้าไปในแผ่นแก้วขนานที่ติดอยู่กับปริซึม ดังภาพที่ 5 ในแผ่นแก้วขนาน แสงจะสะท้อนไป และกลับเข้าไปมาด้วยเส้นทางของมันที่เข้ามาแต่ละเวลา เมื่อเราสังเกตที่มุม $\alpha \approx 90^\circ$ จะพบว่าการสะท้อนในแผ่นแก้วขนานมีการสะท้อนกลับหมดเกือบสมบูรณ์ในมุมจำกัดของการสะท้อนรวม ซึ่งทำให้แสงสามารถแทรกสอดกันในแผ่นแก้วขนานเมื่อแผ่นแก้วนี้มีความยาวเพียงพอ ซึ่งคลื่นเหล่านี้สามารถสังเกตได้จากด้านหลังของแผ่นแก้วโดยใช้ เทเลสโคปที่มีความยาวโฟกัสอนันต์ สำหรับแสงที่มีความยาวคลื่น λ สองภาพเสมือนที่เหมือนกันของเส้นแนวราบสามารถสังเกตได้จากทั้งข้างบนและข้างล่างของแผ่นแก้วขนาน และสำหรับเส้นการแทรกสอดสามารถกำหนดได้จากมุม α ขององค์ประกอบแสงจากแผ่น Lummer-Gehrcke และมุมตกกระทบ β ที่ปริซึม

แสงที่ออกมาที่มุม α แทรกสอดแบบเสริมกัน จะเป็นไปตามเงื่อนไขสำหรับ “curve of equal inclination” ดังภาพที่ 5 และสมการต่อไปนี้

$$\Delta = 2d \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha_k} = k \cdot \lambda \quad \text{เมื่อ} \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (9)$$

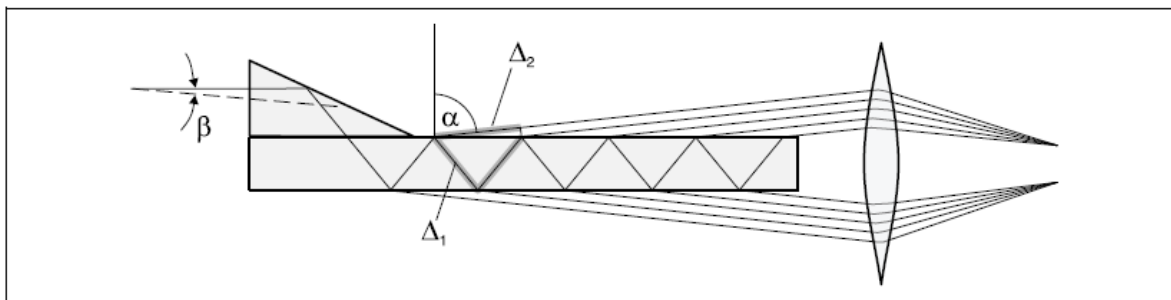
เมื่อ Δ = ความแตกต่างของเส้นทางแสง

d = ความหนาของแผ่นแก้ว

n = ดัชนีหักเหของแก้ว

k = ลำดับของการแทรกสอด

การเปลี่ยนของความยาวคลื่นไปเป็นระยะ $\delta \lambda$ จะเห็นได้จากการเลื่อนของเส้นการแทรกสอดไปด้วยมุม $\delta \alpha$ และถ้าเส้นสเปกตรัมประกอบด้วยองค์ประกอบความยาวคลื่นแตกต่างกัน $\delta \lambda$ เส้นการแทรกสอดแต่ละเส้นจะมีการแยกออกซึ่งสัมพันธ์กับระยะของมุม $\delta \alpha$ ดังนั้นเราจึงสามารถแยกแยะเส้นสเปกตรัมคู่จากโครงสร้างการแทรกสอดแบบคู่ และเส้นสเปกตรัมแบบสามเส้นจากโครงสร้างแบบสามเส้นได้

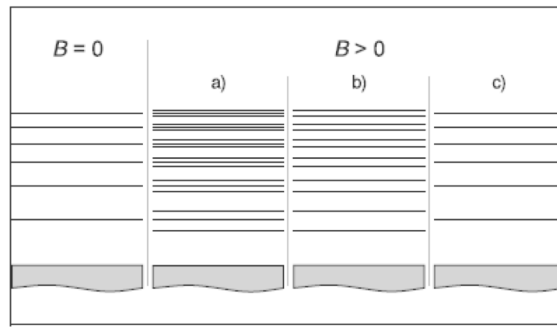


ภาพที่ 5 แผ่น Lummer-Gehrcke ซึ่งเป็นเครื่องมือสเปกสเปกตรัมแทรกสอด (เส้นทางเดินแสงสำหรับมุมตกกระทบ $\beta = 0^\circ$ วาดโดยเส้นตรงแบบไม่ประะ) ความแตกต่างของเส้นทางเดินแสงระหว่างสองเส้นติดกันคือ $\Delta = \Delta_1 - \Delta_2$

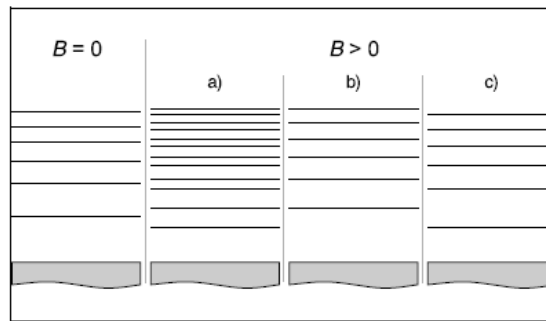
การทดลองการแยกของเส้นสเปกตรัมในสนามแม่เหล็ก

ในการศึกษาการแยกของเส้นสเปกตรัมเนื่องจากอะตอมอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กภายนอก ต้องใช้สเปกโตรมิเตอร์ที่มีกำลังขยายสูงประมาณ $\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = 500,000$ ซึ่งการแยกของเส้นสเปกตรัมจะเกิดขึ้นแบบสามเส้นหรือสองเส้นนั้นจะขึ้นอยู่กับทิศทางในการสังเกต ดังภาพที่ 6 และภาพที่ 7 ซึ่งแสดงรูปแบบการเกิดเส้นสเปกตรัมเป็นสามเส้นในปรากฏการณ์ซีมานปกติแบบตามขวาง และเส้นสเปกตรัมแบบสองเส้นในปรากฏการณ์ซีมานปกติแบบตามยาว ตามลำดับ

ในการสังเกตการเกิดเส้นสเปกตรัมแบบสามเส้นในปรากฏการณ์ซีมานปกติแบบตามขวาง เราสามารถสังเกตสมบัติโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นได้โดยการมองผ่านแผ่นกรองโพลาไรซ์ ซึ่งเมื่อปรับแผ่นกรองโพลาไรซ์ในทิศตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก เราจะพบเส้นสเปกตรัมปรากฏเป็นสองเส้นซึ่งจะสัมพันธ์กับองค์ประกอบ $\sigma^\pm$ ($\Delta M_J = \pm 1$) และเมื่อปรับแผ่นกรองโพลาไรซ์ในทิศขนานกับสนามแม่เหล็กจะพบเส้นสเปกตรัมปรากฏเป็นหนึ่งเส้นซึ่งจะสัมพันธ์กับองค์ประกอบ π ($\Delta M_J = 0$) แสดงดังภาพที่ 6 เมื่อเราการสังเกตการเกิดเส้นสเปกตรัมแบบสองเส้นในปรากฏการณ์ซีมานปกติแบบตามยาว เราสามารถสังเกตสมบัติโพลาไรซ์แบบวงกลมได้โดยการมองผ่านแผ่น quater-wavelength และแผ่นกรองโพลาไรซ์ เราจะพบเส้นสเปกตรัมปรากฏเป็นเส้นสองที่มีการหมุนแบบทวนเข็มนาฬิกา และการหมุนแบบตามเข็มนาฬิกา ซึ่งจะสัมพันธ์กับองค์ประกอบ $\sigma^\pm$ ($\Delta M_J = \pm 1$) แสดงดังภาพที่ 7



ภาพที่ 6 แสดงรูปแบบการเกิดเส้นสเปกตรัมแบบสามเส้นในปรากฏการณ์ซีมานปกติแบบตามขวางโดยที่ (a) สังเกตโดยไม่มีแผ่นกรองโพลาไรซ์ (b) สังเกตโดยมีแผ่นกรองโพลาไรซ์ในทิศตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก (c) สังเกตโดยมีแผ่นกรองโพลาไรซ์ในทิศขนานกับสนามแม่เหล็ก



ภาพที่ 7 แสดงรูปแบบการเกิดเส้นสเปกตรัมแบบสองเส้นในปรากฏการณ์ซีมานปกติแบบตามยาวโดยที่ (a) สังเกตโดยไม่มีแผ่น quarter-wavelength และแผ่นกรองโพลาไรซ์ (b), (c) สังเกตโดยมีแผ่น quarter-wavelength และแผ่นกรองโพลาไรซ์ เพื่อแสดงให้เห็นการหมุนทวนเข็มนาฬิกา และการหมุนตามเข็มนาฬิกาของโพลาไรเซชันแบบวงกลม

การแยกของเส้นสเปกตรัมในสนามแม่เหล็กในปรากฏการณ์ซีมานปกติแบบตามขวาง เมื่อไม่สังเกตผ่านแผ่นโพลาไรซ์ เราพบการแยกออกของสเปกตรัมเป็นสามเส้นรูปที่ 8 โดยระยะเลื่อนของเส้นสเปกตรัม ($\Delta\lambda$) ซึ่งเป็นแยกออกจากแนวเดิมเมื่อเทียบกับกรณีไม่มีสนามแม่เหล็ก จะทำให้เราสามารถหาการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่น และความถี่ได้ โดยสเปกตรัมจะมีความถี่เปลี่ยนไปเป็น $f + \Delta f$ หรือ $f - \Delta f$ เมื่อความถี่ที่เปลี่ยนไป (Δf) มีค่าตามสมการ

$$\Delta f = \frac{1}{4\pi} \frac{e}{m} B \quad (10)$$

จะได้

$$\frac{e}{m} = \frac{4\pi}{B} \Delta f \quad (11)$$

เมื่อ B คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (เทสลา, T) และ Δf คือ ความถี่ที่เปลี่ยนไป (Hz) Δf หาได้จากความละเอียดของแผ่น Lummer-Gehrcke และจากการเปลี่ยนความยาวคลื่นที่ค่าฟลักซ์แม่เหล็กคงที่

ความแตกต่างของความยาวคลื่นเมื่อใช้แผ่น Lummer-Gehrcke จะหาได้จาก

$$\Delta\lambda = \frac{\delta a}{\Delta a} \frac{\lambda^2 \sqrt{n^2 - 1}}{2d(n^2 - 1)} \quad (12)$$

เมื่อ δa คือ ระยะของเส้นสเปกตรัมที่แยกออกจากแนวเดิม เมื่อมีสนามแม่เหล็ก

Δa คือ ระยะของเส้นสเปกตรัมที่แยกออกจากการแทรกสอด

จากการใช้วิธีการประมาณค่าที่เหมาะสมจะได้อัตราส่วน $\frac{\delta a}{\Delta a} = \frac{1}{4}$ ที่ความแรงของสนามแม่เหล็ก

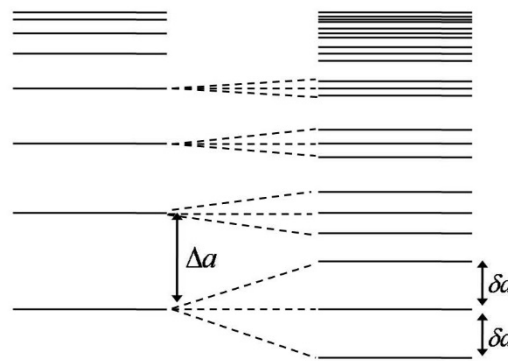
ขนาด 0.7 เทสลา

λ คือ ความยาวคลื่นสีแดงของแคดเมียม = 643.8 นาโนเมตร

n คือ ค่าดัชนีหักเหของแก้วในแผ่น Lummer-Gehrcke = 1.4567

d คือ ความหนาของแผ่น Lummer-Gehrcke = 4.04 มิลลิเมตร

c คือ ความเร็วแสง 299,792,458 เมตรต่อวินาที



ภาพที่ 8 ลักษณะของเส้นสเปกตรัมในปรากฏการณ์ซีมานปกติแบบตามขวาง ที่มองผ่าน Telescope ขณะไม่มีสนามแม่เหล็ก และมีสนามแม่เหล็ก

ประจุเฉพาะของอิเล็กตรอนที่เปล่งแสง

ความถี่ที่เปลี่ยนไปสามารถคำนวณได้จากการเปลี่ยนความยาวคลื่น ในการคำนวณจะใช้สมการความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่น ความถี่และความเร็วของแสง ตามสมการ

$$c = \lambda f \quad (13)$$

จากสมการ (13) หาอนุพันธ์จะได้

$$dc = \lambda df + f d\lambda \quad (14)$$

เมื่อ c เป็นค่าคงที่ จะได้

$$0 = \lambda df + f d\lambda$$

เปลี่ยนจาก $d \rightarrow \Delta$ และแทนค่า $f = \frac{c}{\lambda}$ จะได้สมการ

$$\Delta f = -\frac{c\Delta\lambda}{\lambda^2}$$

และ
$$\Delta f = \frac{c}{\lambda^2} \Delta\lambda \quad (15)$$

นั่นคือ ความถี่ที่เปลี่ยนไปเป็นได้ทั้งค่าบวกและค่าลบ

พิจารณาการแยกเป็นสองเส้นของเส้นสเปกตรัมภายในสนามแม่เหล็กขนาด 0.7 เทสลา จากสมการ

(12) แทนค่า $\frac{\delta a}{\Delta a} = \frac{1}{4}$, $d = 0.404 \text{ cm}$ และ $n = 1.4567$ จะได้

$$\Delta\lambda = \frac{1}{4} \frac{\lambda^2 \sqrt{1.4567^2 - 1}}{2(0.404)(1.4567^2 - 1)}$$

$$\Delta\lambda = 0.31\lambda^2$$

แทนค่า $\lambda = 6.438 \times 10^{-5} \text{ cm}$ จะได้

$$\Delta\lambda = 1.28 \times 10^{-8} \text{ cm}$$

เมื่อแทนค่า $\Delta\lambda = 0.31\lambda^2$ ลงในสมการ (15) จะได้

$$\Delta f = 9.3 \times 10^9 \text{ Hz}$$

พิจารณาที่สนามแม่เหล็ก 0.7 เทสลา จากสมการ (11) แทนค่า จะได้

$$\frac{e}{m} = 1.67 \times 10^{11} \frac{C}{kg}$$

โดยสามารถคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของประจุต่อมวลของอิเล็กตรอน จากค่าจริง คือ

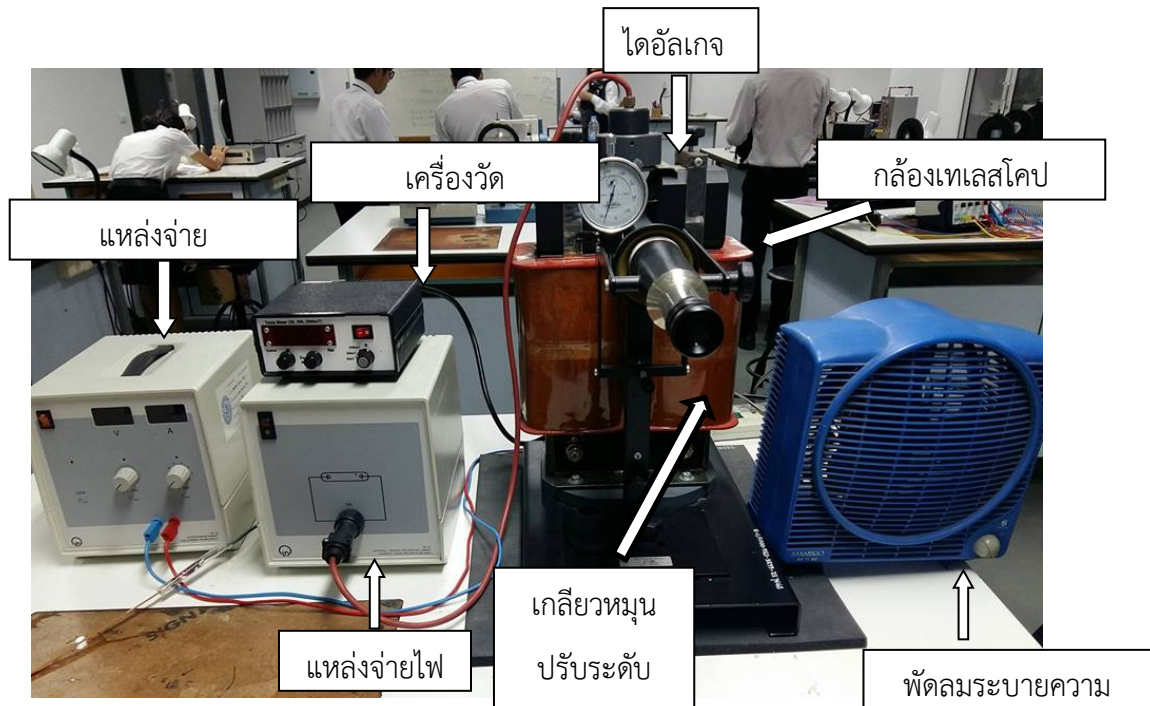
$$\frac{e}{m} = 1.76 \times 10^{11} \frac{C}{kg}$$

จะได้ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของประจุต่อมวลของอิเล็กตรอน คือ

$$\left| \frac{1.67 \times 10^{11} - 1.76 \times 10^{11}}{1.76 \times 10^{11}} \right| \times 100 = 5.11\%$$

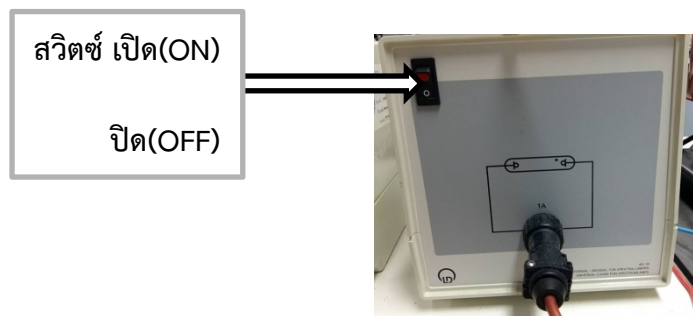
อุปกรณ์การทดลอง

- ชุดอุปกรณ์การทดลองปรากฏการณ์ซีมานแบบปกติ ประกอบด้วย



ภาพที่ 9 ชุดอุปกรณ์การทดลองปรากฏการณ์ซีมานปกติ

- แหล่งจ่ายไฟ ให้กับหลอดของแคดเมียม



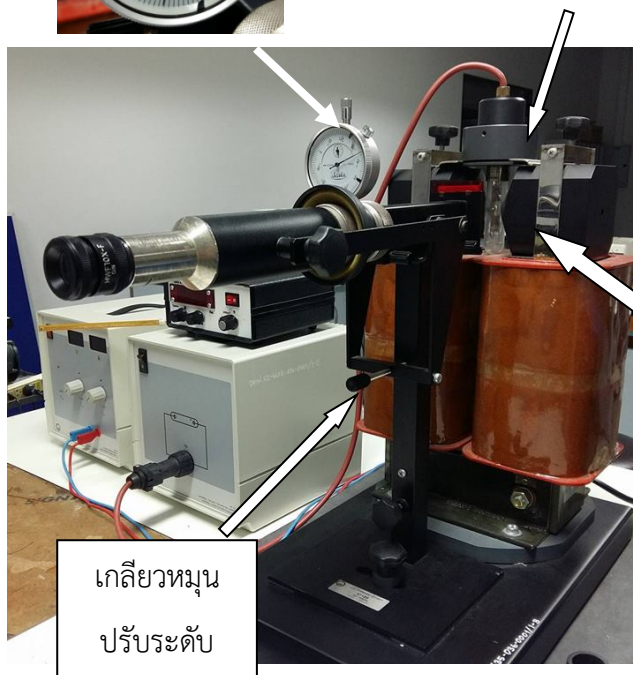
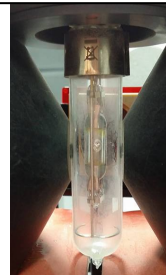
ภาพที่ 10 แหล่งจ่ายไฟ

3. ชุดอุปกรณ์ Telescope

ไดอัลเกจ ความละเอียด 0.01



หลอดแคดเมียม



แผ่นกรอง

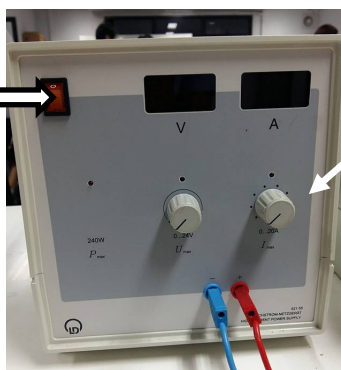


เกลียวหมุน
ปรับระดับ

ภาพที่ 11 ชุดอุปกรณ์ Telescope หลอดแคดเมียม และแผ่นกรองแสง

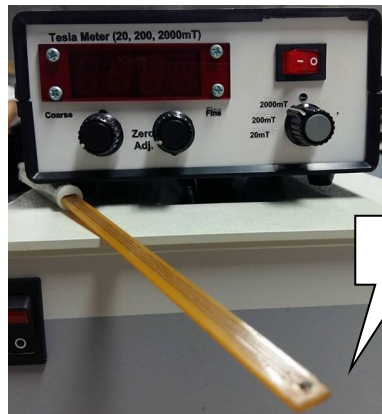
4. แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าตรง

สวิตช์ เปิด(ON)
ปิด(OFF)



ภาพที่ 12 แหล่งจ่ายไฟ

5. เครื่องวัดสนามแม่เหล็ก



ภาพที่ 13 เครื่องวัดสนามแม่เหล็ก Teslameter

6 พัฒนาระบายความร้อน



ภาพที่ 14 พัฒนาระบายอากาศ

ข้อควรระวัง

ถอดแผ่นกรองแสงและเลนส์ออก จากนั้นเปิดระบบระบายอากาศ (พัดลม) เปิดแหล่งจ่ายไฟให้หลอดแคดเมียม บันทึกสีของเส้นสเปกตรัมที่เกิดขึ้น และลักษณะของโฟลาไรเซชัน

วิธีการทดลอง

1. ถอดแผ่นกรองแสงและเลนส์ออก จากนั้นเปิดระบบระบายความร้อน (พัดลม) เปิดแหล่งจ่ายไฟให้กับหลอดของแคดเมียม บันทึกสีของเส้นสเปกตรัมที่เกิดขึ้น และลักษณะของโฟลาไรเซชัน
2. ใส่แผ่นกรองแสงและเลนส์
3. หมุนปุ่มเส้นแนวระดับ (column base) ของ Telescope ให้ทับกันกับเส้นสเปกตรัมสีแดงเส้นแรก ดังภาพที่ 11 ปรับค่าไดอัลเกจไว้ที่ตำแหน่ง “0”
4. วัด $\Delta\alpha$ ระยะของเส้นสเปกตรัมที่แยกออกจากการแทรกสอด โดยปรับปุ่มระดับและอ่านค่าจากไดอัลเกจ

5. เปิดแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขดลวดหมุนปุ่ม I และปรับ V ไปไว้ที่ลูกศร ดังภาพที่ 12
6. ปรับค่า V ไปที่ 10 V แล้วบันทึกค่า กระแส ศักย์ไฟฟ้า
7. วัดค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น โดยนำหัววัดใส่เข้าไประหว่างแท่งเหล็กที่ให้กำเนิดสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก โดยการตั้งพิสัยของเครื่องวัดสนามแม่เหล็ก (Tesla meter) ที่ 2000 mT
8. วัด $\delta\alpha$ ระยะระหว่างเส้นสเปกตรัมสองเส้นที่แยกเนื่องจากสนามแม่เหล็ก ทั้งด้านบนและด้านล่าง คำนวณค่า $\delta\alpha$ ดังภาพที่ 8
9. ปรับค่าไดอัลเกจไว้ที่ตำแหน่ง “0” ทำซ้ำในข้อ 6 – 8 โดยเพิ่มค่าความต่างศักย์ 11 V, 12 V, 13 V และ 14 V
10. คำนวณหาค่า $\Delta\lambda$ ความแตกต่างของความยาวคลื่น จากสมการที่ (12)
11. คำนวณหาค่า Δf ความถี่เปลี่ยนไป จากสมการที่ (15)
12. คำนวณหาค่า $\frac{e}{m} = \frac{4\pi}{B} \Delta f$
13. แสดงตัวอย่างการคำนวณ
14. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ชื่อผู้ปฏิบัติการ

รหัสประจำตัว..... หมู่ปฏิบัติการที่.....

ผู้ร่วมปฏิบัติการ

เลขที่ หมู่อ้อยที่.....

1.

ปฏิบัติการวิชาฟิสิกส์ 01420222 ห้อง

2.

วันที่ เดือน พ.ศ.

3.

อาจารย์ผู้สอน

บันทึกผลการทดลอง

ปฏิบัติการปรากฏการณ์ซีมานปกติ

สมมติฐานการทดลอง

ผลการทดลอง

สีของเส้นสเปกตรัม.....ลักษณะของโฟลาไรเซชัน.....

 $\Delta a = \dots\dots\dots[.....]$

ครั้งที่	I	V	$\Delta a_{\text{บน}}$	$\Delta a_{\text{ล่าง}}$	$\Delta a_{\text{เฉลี่ย}}$	B	$\Delta \lambda$	Δf	e/m
	[.....]	[.....]	[.....]	[.....]	[.....]	[.....]	[.....]	[.....]	[.....]
1									
2									
3									
4									
5									

ค่าประจุต่อมวลของอิเล็กตรอนเฉลี่ย =

ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของประจุต่อมวลของอิเล็กตรอน =

แสดงวิธีคำนวณ (ยกตัวอย่างการคำนวณ 1 ตัวอย่าง)

1. ค่าความแตกต่างของความยาวคลื่น
2. ค่าความถี่ที่เปลี่ยนไป
3. ค่าประจุต่อมวลของอิเล็กตรอน
4. ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของประจุต่อมวลของอิเล็กตรอน

สรุปผลการทดลอง

วิจารณ์ผลการทดลอง

การทดลองที่ 7

ปรากฏการณ์ฮอลล์

วัตถุประสงค์

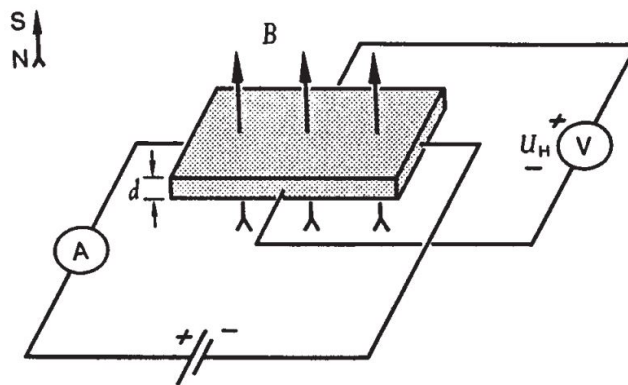
1. ศึกษาการเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำ n-doped Germanium
2. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ฮอลล์กับกระแสไฟฟ้า เมื่ออุณหภูมิและสนามแม่เหล็กคงตัว
3. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ฮอลล์กับสนามแม่เหล็ก เมื่ออุณหภูมิและกระแสไฟฟ้าคงตัว
4. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ฮอลล์กับอุณหภูมิ เมื่อสนามแม่เหล็กและกระแสไฟฟ้าคงตัว

ทฤษฎี

เมื่อมีกระแสไฟฟ้า I_p ไหลผ่านแผ่นสารกึ่งตัวนำทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า และถ้าแผ่นสารกึ่งตัวนำจัดเรียงตัวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กภายนอก B ดังภาพที่ 1 แรงทางแม่เหล็กจะทำให้ประจุพาหะของกระแสไฟฟ้าเบนไปอยู่ที่ด้านใดด้านหนึ่งของแผ่นสารกึ่งตัวนำ ทำให้ด้านดังกล่าวมีศักย์ไฟฟ้าแตกต่างจากด้านตรงข้าม ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างทั้งสองด้านเรียกว่า ความต่างศักย์ฮอลล์ U_H และจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้า E_H ขึ้น ผลของสนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดแรงทางไฟฟ้าต้านการเบี่ยงเบนของประจุพาหะที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก เมื่อเวลาผ่านไป (ประมาณ 10^{-14} วินาที) แรงทั้งสองจะสมดุลกัน จะได้ความสัมพันธ์

$$qE_H = q(v \times B) \quad (1)$$

โดยที่ v แทนความเร็วของประจุพาหะ และ q แทนขนาดของประจุพาหะ



ภาพที่ 1 ปรากฏการณ์ฮอลล์บนแผ่นสารกึ่งตัวนำทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

จากความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ฮอลล์ U_H กับสนามไฟฟ้า E_H และนิยามของกระแสไฟฟ้า $I_p = nqvA$ จะได้ค่าคงตัวฮอลล์ R_H :

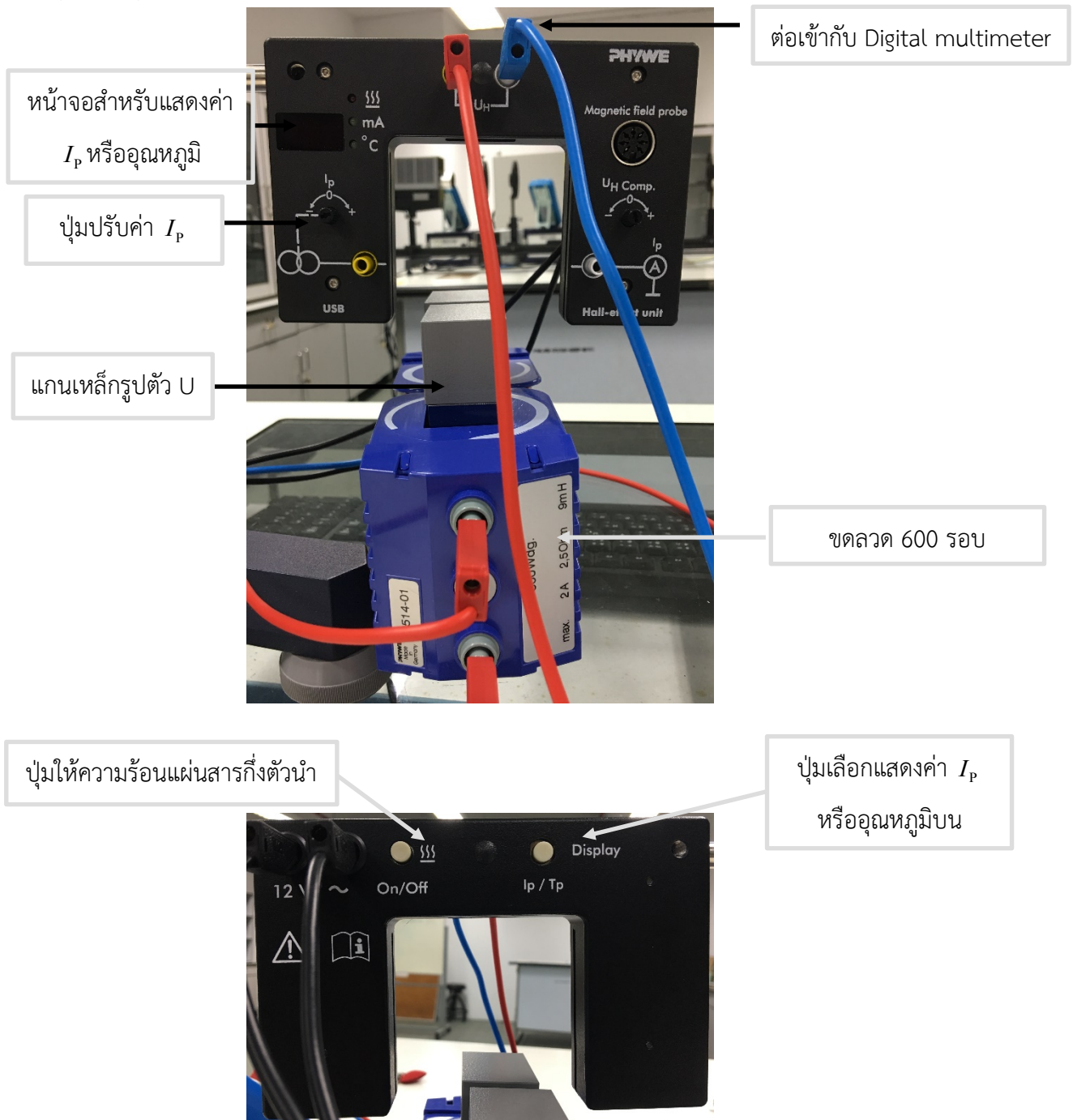
$$R_H = \frac{1}{nq} = \frac{U_H d}{BI_p} \quad (2)$$

เมื่อ d เป็นความหนาของแผ่นสารกึ่งตัวนำ (ภาพที่ 1) และ n เป็นความหนาแน่นประจุพาหะ หรือจำนวนประจุพาหะต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร

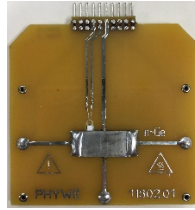
แผ่นสารกึ่งตัวนำที่จะใช้ในการทดลองทำมาจาก n-doped Germanium (n-Ge) ซึ่งมีความหนา $d = 1.00 \text{ mm}$ ความยาว 2.00 cm ความกว้าง 1.00 cm ความต้านทาน 37.3Ω และมีประจุพาหะเป็นอิเล็กตรอน ($q = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$)

อุปกรณ์

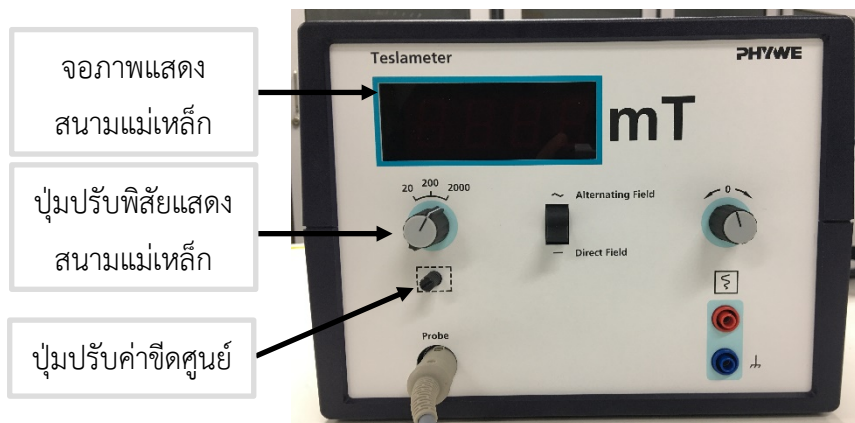
1. PHYWE Hall-effect unit
2. ชุดแสดงอุปกรณ์การทดลอง



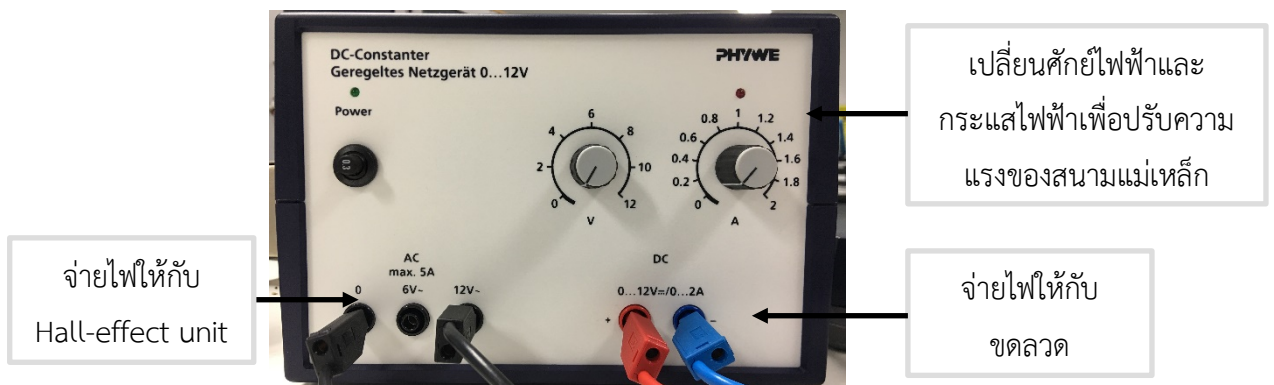
3. n-doped Germanium (n-Ge) carrier board



4. Digital teslameter – ใช้สำหรับวัดขนาดของสนามแม่เหล็กที่ถูกสร้างจากขดลวด B ในหน่วย mT



5. DC constanter – จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับ Hall-effect unit และขดลวดเพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก



6. Digital multimeter – เพื่ออ่านค่า U_H 

ปรับไปที่ฟิสัย
200 mV

วิธีทดลอง

ตอนที่ 1 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง U_H กับ I_p เมื่ออุณหภูมิและ B คงที่

- กดปุ่ม “ I_p / T_p display” ด้านหลัง Hall-effect unit เพื่อเลือกให้หน้าจอแสดงค่ากระแสไฟฟ้า I_p หมุนปุ่มปรับกระแสไฟฟ้าด้านล่างหน้าจอเพื่อให้ $I_p = 0$
- หมุนปุ่ม “ U_H Comp” เพื่อปรับความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ที่แสดงบน multimeter ให้เป็นศูนย์
- ปรับฟิสัยเครื่อง Teslameter ไปที่ 2000 หมุนปุ่มศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าบนเครื่อง DC constanter ไปด้านซ้ายสุด หมุนปุ่มปรับค่าขีดศูนย์เพื่อให้ $B = 0$
- หมุนปุ่มศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าบนเครื่อง DC constanter เพื่อให้ได้ $B = 200$ mT
- เปลี่ยนกระแสไฟฟ้า I_p จาก -30 mA จนถึง 30 mA เพิ่มขึ้นทุกๆ 10 mA โดยในแต่ละครั้งให้อ่านค่า U_H และบันทึกผล
- ทำการทดลองซ้ำข้อ 4. โดยเปลี่ยนขนาดของสนามแม่เหล็กเป็น $B = 300$ mT
- เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_p กับ U_H สำหรับสนามแม่เหล็กทั้งสองบนกราฟเดียวกัน และวิจารณ์ว่า (i) ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับสมการ (2) หรือไม่อย่างไร และ (ii) ความสัมพันธ์ทางเครื่องหมายของระหว่าง I_p กับ U_H บ่งบอกถึงชนิดประจุพาหะของ n-Ge ได้อย่างไร

ตอนที่ 2 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง U_H กับ B เมื่ออุณหภูมิและ I_p คงที่

หมายเหตุ: ตั้งค่าอุปกรณ์ต่างๆ ตอนเริ่มต้นเหมือนกับตอนที่ 1 ข้อ 1 – 3

- ตั้งค่า $I_p = 30$ mA
- เปลี่ยนขนาดของสนามแม่เหล็ก B จาก 0 จนถึง 300 mT เพิ่มขึ้นทุกๆ 50 mT

3. เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ U_H และวิจารณ์ว่าผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับสมการ (2) หรือไม่อย่างไร
4. หาความชันของกราฟ และคำนวณหาความหนาแน่นประจุพาหะ n ค่าที่ได้ควรประมาณ 10^{21} m^{-3}

ตอนที่ 3 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง U_H กับอุณหภูมิ เมื่อ B และ I_p คงที่

หมายเหตุ: ตั้งค่าอุปกรณ์ต่างๆ ตอนเริ่มต้นเหมือนกับตอนที่ 1 ข้อ 1 – 3

1. ตั้งค่า $I_p = 30 \text{ mA}$ และ $B = 300 \text{ mT}$
2. กดปุ่ม “ I_p / T_p display” ด้านหลัง Hall-effect unit เพื่อเลือกให้หน้าจอแสดงค่าอุณหภูมิ
3. กดปุ่ม “On/Off” ด้านหลัง Hall-effect unit เพื่อเพิ่มอุณหภูมิแผ่นสารกึ่งตัวนำจนกระทั่งถึงค่าประมาณ $145 - 150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ หลังจากนั้น Hall-effect unit จะหยุดเพิ่มอุณหภูมิโดยอัตโนมัติ
4. อุณหภูมิบนแผ่นสารกึ่งตัวนำจะค่อยๆ ลดลงมาจนกระทั่งถึงอุณหภูมิห้อง บันทึก U_H สำหรับอุณหภูมิจาก $140 \text{ }^{\circ}\text{C}$ จนถึง $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ลดลงทุกๆ $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$
5. เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับ U_H
6. จงอธิบายพฤติกรรมของประจุพาหะที่ทำให้ได้ลักษณะของกราฟข้อ 5. (คำแนะนำ: อุณหภูมิมีผลต่อความเร็วลอยเลื่อน v ของประจุพาหะ)

สรุปผลการทดลองที่ได้จากตอนที่ 1 – 3

ชื่อผู้ปฏิบัติการ

รหัสประจำตัว..... หมู่ปฏิบัติการที่.....

ผู้ร่วมปฏิบัติการ

เลขที่ หมู่อ้อยที่.....

1.

ปฏิบัติการวิชาฟิสิกส์ 01420222 ห้อง

2.

วันที่ เดือน พ.ศ.

3.

อาจารย์ผู้สอน

บันทึกผลการทดลอง

ปฏิบัติการปรากฏการณ์ฮอลล์

สมมติฐานการทดลอง

ผลการทดลอง

ตอนที่ 1 หาความสัมพันธ์ระหว่าง U_H และ I_p เมื่อ T และ B คงที่

I_p (mA)	U_H (mV)	
	$B = 200$ mT	$B = 300$ mT
-30		
-20		
-10		
0		
10		
20		
30		

ตอนที่ 2 หาความสัมพันธ์ระหว่าง U_H และ B เมื่อ I_p และ T คงที่ เมื่อ $I_p = 30$ mA

B (mT)	U_H (mV)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
0			
50			
100			
150			
200			
250			
300			

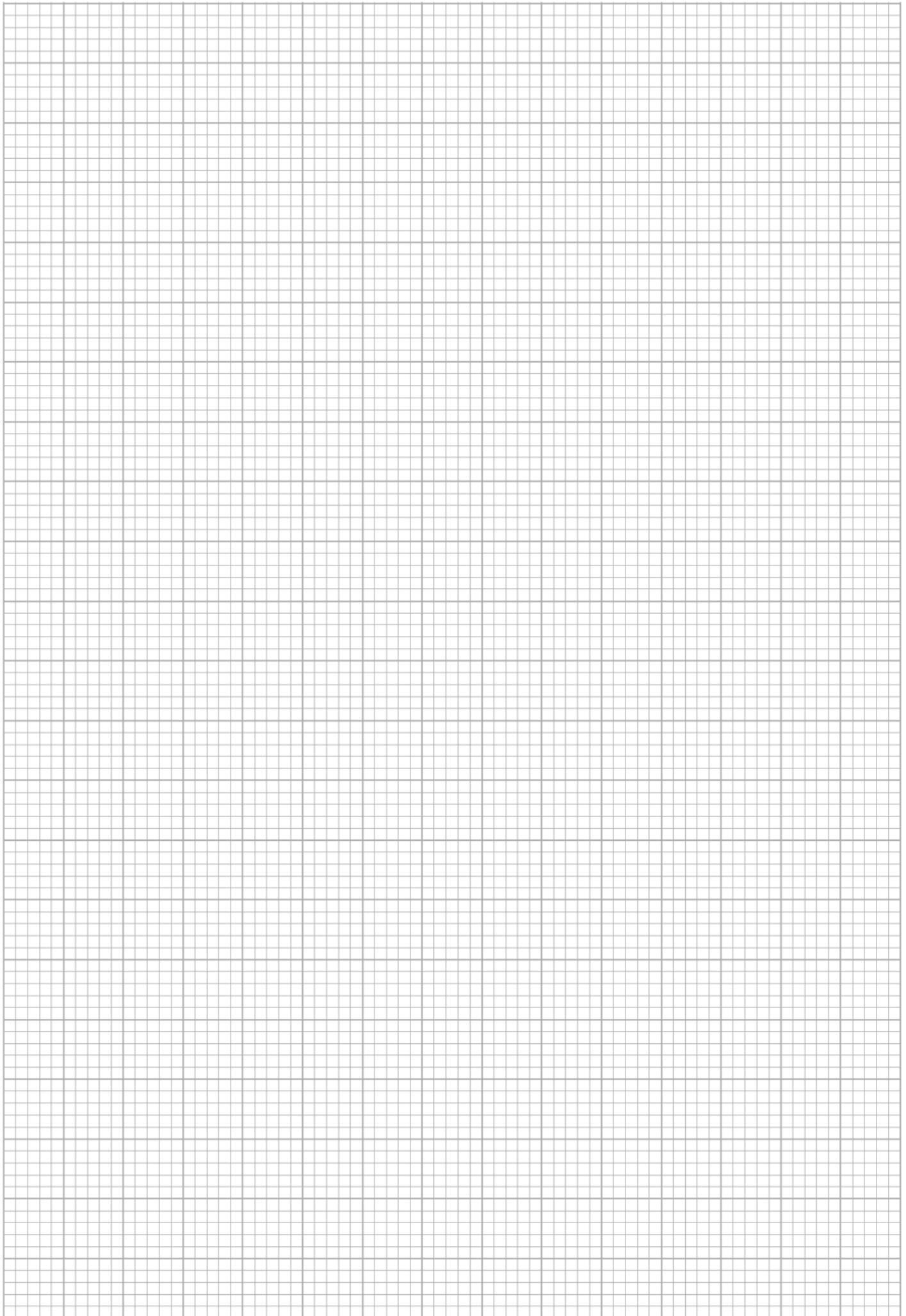
ตอนที่ 3 หาความสัมพันธ์ระหว่าง U_H และ T เมื่อ I_p และ B คงที่ โดยให้ $I_p = 30$ mA และ $B = 300$ mT

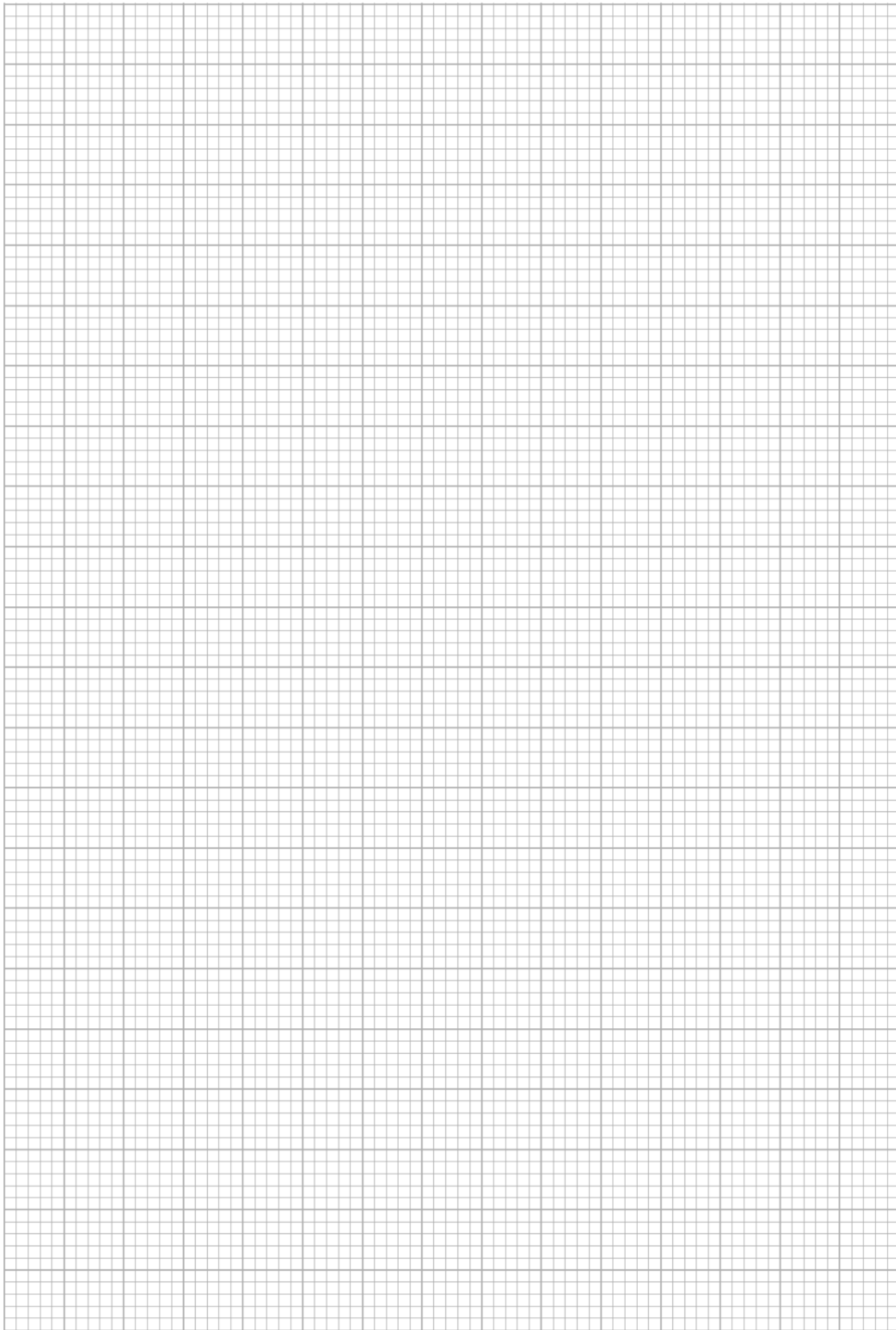
T (°C)	U_H (mV)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
140			
130			
120			
110			
100			
90			
80			
70			
60			
50			
40			
30			

แสดงการคำนวณหา ความหนาแน่นประจุพาหะ

สรุปผลการทดลอง

วิจารณ์การทดลอง







การทดลองที่ 8

ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก
2. เพื่อศึกษาความถี่ของแสงที่ขึ้นอยู่กับมุมกระเจิงแสง
3. เพื่อหาค่าศักย์หยุดยั้งสำหรับแสงที่มีความถี่ต่าง ๆ กัน
4. เพื่อหาค่าคงที่ของพลังค์จากปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกระหว่างศักย์หยุดยั้ง U_0 และความถี่ f

ทฤษฎี

ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อแสงความถี่สูงตกกระทบบนผิวโลหะจะมีอิเล็กตรอนหลุดออกมาจากผิวโลหะ ซึ่งอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาเรียกว่า โฟโตอิเล็กตรอน (photoelectron) ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกค้นพบครั้งแรกโดย เฮิรทซ์ (Hertz) ในปี ค.ศ. 1887 ขณะที่เขาทำการทดลองเพื่อสนับสนุนทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกซ์เวลล์ (Maxwell) และในปี ค.ศ. 1905 ไอน์สไตน์ (Einstein) ได้เสนอสมการเพื่ออธิบายปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก โดยใช้สมมติฐานของแพลงค์ มาประยุกต์กับการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ต่อมา ในปี ค.ศ. 1916 มิลลิแกน (Millikan) ได้ทำการทดลองปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกอย่างสมบูรณ์ ซึ่งผลการทดลองปรากฏว่าสอดคล้องกับสมการของไอน์สไตน์ โดยสมบูรณ์

ไอน์สไตน์อธิบายปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกว่าเกิดจากคลื่นแสงที่ตกกระทบบนผิวโลหะประกอบด้วยควอนตัมของพลังงาน (Quantum energy) ซึ่งมีพลังงานเท่ากับ hf เมื่อ h เป็นค่าคงที่ของแพลงค์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.626×10^{-34} จูล.วินาที และ f เป็นความถี่ของคลื่นแสง โดยเรียกควอนตัมของพลังงานนี้ว่า โฟตอน (Photon) เมื่อโฟตอนตกกระทบบนผิวโลหะจะถ่ายทอดพลังงานทั้งหมดให้แก่อิเล็กตรอนในโลหะ โดยพลังงานส่วนหนึ่งจะใช้ในการทำให้อิเล็กตรอนหลุดมาอยู่ที่ผิวโลหะพอดี เรียกพลังงานส่วนนี้ว่า พลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy) หรือเวิร์คฟังก์ชัน (Work function) พลังงานส่วนที่เหลือจะติดตัวอิเล็กตรอนไปในรูปของพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) ทำให้โฟโตอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ออกจากผิวโลหะไปได้

ถ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่มายังผิวโลหะโดยไม่มีการสูญเสียพลังงาน พลังงานจลน์ที่ติดตัวอิเล็กตรอนจะมีค่ามากที่สุด ดังนั้นจากหลักการทรงพลังงาน (Conservation of energy)

ถ้า	hf	เป็นพลังงานคลื่นแสงตกกระทบบนผิวโลหะ	
	W	เป็นพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน หรือเวิร์คฟังก์ชัน	
	$(E_k)_{\max}$	เป็นพลังงานจลน์ที่มีค่ามากที่สุดของอิเล็กตรอน	
จะได้	$hf = W + (E_k)_{\max}$ และ $(E_k)_{\max} = hf - W$		(1)

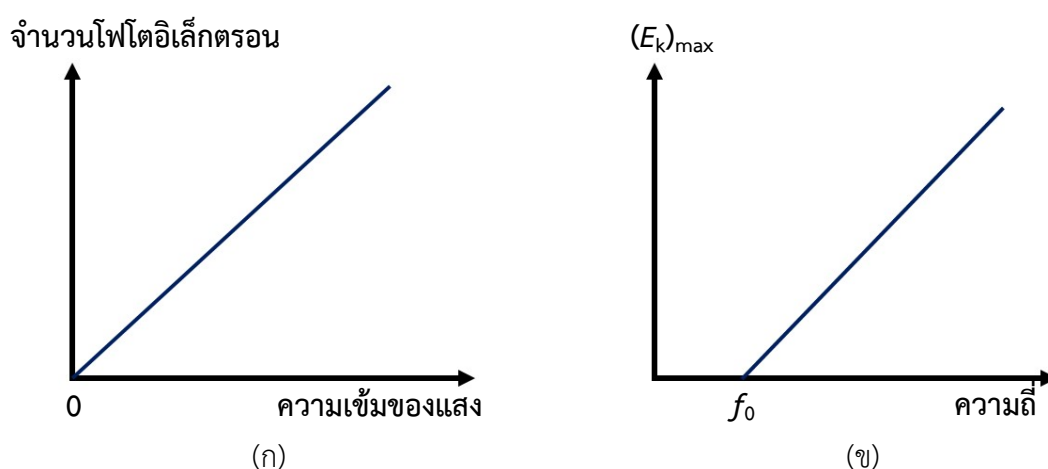
พิจารณากรณีต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. ถ้า $hf > W$ จะเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก โดยโฟโตอิเล็กตรอนจะมีพลังงานจลน์ติดตัวสูงที่สุดเป็น $(E_k)_{\max}$
2. ถ้า $hf < W$ จะไม่เกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก
3. ถ้า $hf = W$ จะเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก โดยมีโฟโตอิเล็กตรอนหลุดมาอยู่ที่ผิวโลหะพอดีโดย $f = f_0$ เป็นความถี่ของคลื่นแสงที่พอดีทำให้โฟโตอิเล็กตรอนหลุดมาอยู่ที่ผิวโลหะพอดี โดยเวิร์คฟังก์ชัน (Work function, W)

$$W = hf_0 \quad (2)$$

และ เรียก f_0 ว่า ความถี่ขีดเริ่ม (Threshold frequency) ซึ่งเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะ

เนื่องจากโฟตอนหนึ่งตัวจะทำให้เกิดโฟโตอิเล็กตรอนได้หนึ่งตัว ดังนั้นจำนวนโฟโตอิเล็กตรอนที่หลุดจากผิวโลหะจึงแปรผันตรงกับจำนวนโฟตอนหรือความเข้มของแสงที่ตกกระทบผิวโลหะนั้น และจากสมการ (1) พลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอนจะแปรผันตรงกับความถี่ของแสง ถ้าเขียนกราฟระหว่างจำนวนโฟโตอิเล็กตรอนกับความเข้มของแสงและพลังงานจลน์สูงสุดกับความถี่ของแสง จะได้เส้นกราฟ ดังภาพที่ 1



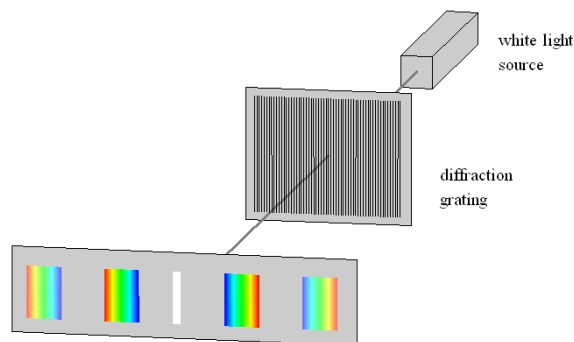
ภาพที่ 1 (ก) กราฟระหว่างจำนวนโฟโตอิเล็กตรอนกับความเข้มของแสง และ (ข) พลังงานจลน์สูงสุดกับความถี่ของแสง

การทดลองปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกทำโดยใช้โฟโตอิเล็กทริกเซลล์ โดยการฉายแสงความถี่ f ไปยังขั้วคาโทดของเซลล์ และปรับโพเทนชิโอเมเตอร์ (potentiometer) ให้มีศักย์ $+V$ หรือ $-V$ ซึ่งวัดโดยโวลต์มิเตอร์ และกระแสโฟโตอิเล็กทริก I วัดโดยไมโครแอมป์มิเตอร์

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การกระเจิงของแสงผ่านเกรตติง

เกรตติงเป็นอุปกรณ์ทางทัศนศาสตร์ทำมาจากแผ่นวัสดุบางโปร่งใสที่ถูกแบ่งออกเป็นช่องขนานซึ่งอยู่ชิดกันมาก จำนวนช่องของเกรตติงอาจมีตั้งแต่ 1000 - 10000 ช่องใน 1 เซนติเมตรโดยมีความห่างของช่องเท่ากัน ดังนั้นถ้าเราฉายแสงผ่านเกรตติงจะทำให้เกิดแถบมืดแถบสว่างที่อยู่ห่างกันมองเห็นได้ชัดเจน และเนื่องจากมุมที่เบนจากแถบสว่างกลางของแสงแต่ละสีมีค่าต่างกัน ดังนั้นเราสามารถใช้เกรตติงในการแยกสเปกตรัมของแสงขาวได้ หรือใช้เกรตติงแยกสเปกตรัมของแสงที่เกิดจากหลอดบรรจุแก๊สต่างๆ ได้



ภาพที่ 2 แสดงการกระเจิงของแสงผ่านเกรตติง

โดยแสงที่แยกออกมาเป็นไปตามสมการแถบสว่างคือ

$$d \sin \alpha = n\lambda \quad (3)$$

โดย α เป็นมุมเบี่ยงเบนของแสงจากแนวตรงกลาง

และสามารถหาความถี่ได้จาก

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (4)$$

โดย ความเร็วแสง $c = 299,792,458 \text{ m/s}$

อุปกรณ์

1. โฟโตเซลล์



ภาพที่ 3 โฟโตเซลล์ พร้อมสลิต

2. เกรตติง



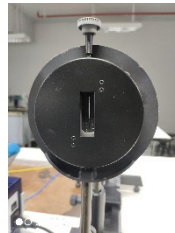
ภาพที่ 4 เกรตติงเลี้ยวเบน N จำนวน 600 เส้น/mm

3. เลนส์ จำนวน 2 ชิ้น



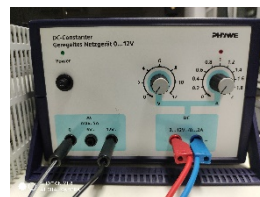
ภาพที่ 5 เลนส์ ความยาวโฟกัส 100 mm

4. ช่องรับแสง



ภาพที่ 6 ช่องรับแสง

5. หลอดไฟและแหล่งกำเนิดแสง



ภาพที่ 7 หลอดไฟและแหล่งกำเนิดแสง

6. เครื่องขยายสัญญาณ universal amplifier



ภาพที่ 8 เครื่องขยายสัญญาณ universal amplifier

7. โปเทนชิออมิเตอร์ (potentiometer)



ภาพที่ 9 โปเทนชิออมิเตอร์ เพื่อปรับลดค่ากระแสในวงจร

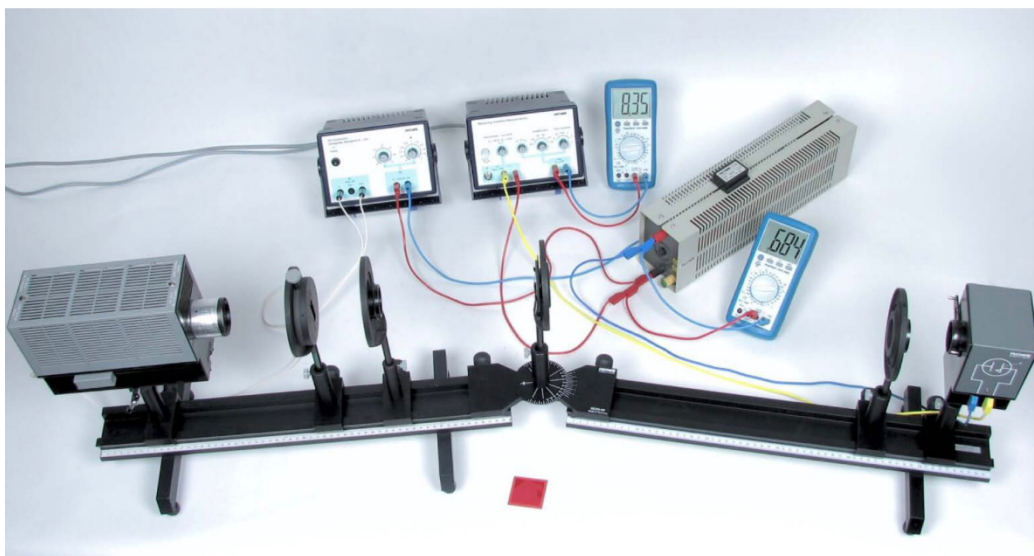
8. ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 2 เครื่อง



ภาพที่ 10 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์

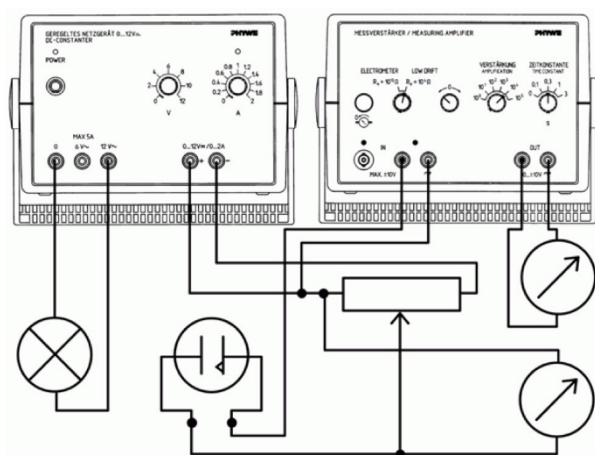
วิธีทดลอง

ตอนที่ 1 การทดลองปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกทำโดยใช้โฟโตอิเล็กทริกเซลล์ โดยการฉายแสงความถี่ f ไปยังขั้วคาโทดของเซลล์ และปรับโปเทนชิออมิเตอร์ (potentiometer) ให้มีศักย์ $+V$ หรือ $-V$ ซึ่งวัดโดยโวลต์มิเตอร์ และกระแสโฟโตอิเล็กทริก I วัดโดยไมโครแอมป์มิเตอร์ และหาค่าศักย์หยุดยั้ง V_s



ภาพที่ 11 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับการทดลองปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก

1. จัดวางอุปกรณ์ให้ได้ดังภาพที่ 11 โดยมีรายละเอียดดังนี้
2. เตรียมรางอุปกรณ์ 2 รางเชื่อมกันด้วยข้อต่อสำหรับหมุ่ที่วัดมุมได้ โดยให้รางทางด้านขวาเป็นรางที่หมุ่ได้
3. วางแหล่งกำเนิดแสงที่ตำแหน่ง 9.0 cm สลิตที่ตำแหน่ง 34.0 cm และเลนส์ (ความยาวโฟกัส 100 mm) ที่ตำแหน่ง 44.0 cm วัดจากด้านซ้ายสุดของรางด้านซ้ายมือ แล้วจึงเปิดสวิตช์แหล่งกำเนิดแสง
4. ปรับความกว้างของช่องสลิตให้เท่ากับความกว้างสลิตของโฟโตเซลล์
5. เลื่อนปุ่มปรับตำแหน่งหลอดไฟที่ด้านข้างของแหล่งกำเนิดแสงเพื่อโฟกัสแสงที่ออกมาจากหลอดไฟให้อยู่บนระนาบของสลิต
6. เลื่อนเลนส์ให้ได้แสงขนานผ่านเลนส์ออกมา
7. สอดเกรตติง N 600 เส้น/มิลลิเมตร ลงไปที่แท่นจับที่วางอยู่ตรงกลางของข้อต่อสำหรับหมุ่ โดยให้เส้นเกรตติงอยู่ในแนวตั้ง และให้สังเกตสเปกตรัมที่ออกมาว่ามีความสูงในระดับเดียวกันทั้งสองฝั่งของเกรตติง
8. วางโฟโตเซลล์ที่ด้านขวาของรางอุปกรณ์ทางขวามือ
9. โฟกัสช่องสลิตที่ 1 (illuminating slit) ลงบนช่องสลิตของโฟโตเซลล์โดยใช้เลนส์ 100 mm สอดลงด้านหน้าของโฟโตเซลล์
10. บันทึกเป็นมุมที่ศูนย์ ($\alpha = 0$) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่แสงส่องตรงไปยังช่องสลิตของโฟโตเซลล์
11. ต่อสายไฟดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 การต่อวงจรสำหรับการทดลองโฟโตอิเล็กทริก

12. ตั้งค่ากำลังขยายของการวัดไว้ที่ amplification 10^5 และ time constant 0.3 s
13. เช็ควัดศูนย์ของ universal amplifier โดยถอดสายวัดออกช่อง input ของเครื่องและตั้งค่า output voltage เป็นศูนย์ด้วยปุ่ม zeroing
14. ตั้งค่าศักย์ไฟฟ้าของ Power supply โดยปรับโพเทนชิโอมิเตอร์ไปที่ 3 V และกระแส 1 A
15. สังเกตค่าที่อ่านได้จาก amplifier ซึ่งแปรผันตรงกับกระแสโฟโตอิเล็กตรอน

16. วัดค่า bias voltage ที่ทำให้กระแสหยุดไหลสำหรับค่ามุมต่าง ๆ กันในสเปกตรัมลำดับที่ 1 ของหลอดไฟ (ค่าระหว่าง 13 องศา ถึง 25 องศา) โดยการปรับโพเทนชิโอมิเตอร์ บันทึกค่าศักย์หยุดยั้ง V_s
17. เมื่อแสงผ่านแผ่นกรองแสงสีแดง (ที่มุมกระเจิงมากกว่า 21 องศา) ให้ใช้แผ่นกรองแสงเพื่อกันรังสียูวีในลำดับที่ 2 ไม่ให้รบกวนการทดลอง

ตอนที่ 2 ค่าที่ต้องคำนวณและวัด

1. ความถี่ของแสงเป็นฟังก์ชันของมุมของสเปกโตรมิเตอร์
2. ศักย์หยุดยั้ง V_s จากการทดลองสำหรับแสงที่ค่าความถี่ต่างๆ กัน และเขียนกราฟระหว่างศักย์หยุดยั้ง V_s และความถี่ f
3. ค่าคงที่ของพลังค์จากกราฟระหว่างศักย์หยุดยั้ง V_s และความถี่ f

ตอนที่ 3 รายละเอียดการวัด

1. ความถี่ของแสงเป็นฟังก์ชันของมุมของสเปกโตรมิเตอร์
ความถี่ของแสงที่ออกมาจากโฟโตเซลล์หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$d \sin \alpha = n\lambda$$

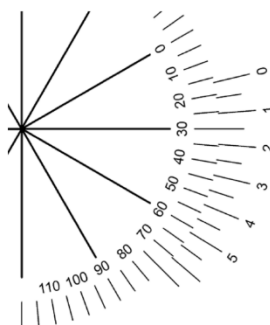
เมื่อ $d = \frac{1}{N}$ และ N คือ จำนวนช่องของเกรตติงต่อมิลลิเมตร

โดยมุมของสเปกโตรมิเตอร์ที่แสงความยาวคลื่นต่างๆตกกระทบคือ

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{d}\right)$$

2. ตัวอย่างการอ่านค่าจากสเกลเวอร์เนียร์แสดงดังภาพที่ 12 และสามารถหาความถี่ได้จาก

$$f = \frac{c}{\lambda}$$



ภาพที่ 13 ตัวอย่างการอ่านค่าจากสเกลเวอร์เนียร์ ชิดถัดไปที่ใกล้ขีดศูนย์คือ 15 องศา ชิดถัดไปที่ตรงกันพอดีคือที่ 1.5 องศา ดังนั้นค่าที่อ่านได้คือ 16.5 องศา

3. การหาค่าศักย์หยุดยั้ง V_s จากการทดลองสำหรับแสงที่มีความถี่ต่าง ๆ กันและเขียนกราฟระหว่าง ศักย์หยุดยั้ง V_s และความถี่ f ของแสง และค่าคงที่ของพลังค์จากกราฟระหว่างศักย์หยุดยั้ง V_s และความถี่ f ดังสมการ

$$eV_s = hf - W$$

$$V_s = \left(\frac{h}{e}\right)f - \frac{W}{e} \quad (5)$$

โดยความชันของกราฟมีค่าเป็น h/e จากสมการที่ (5) ซึ่งหาได้จากกราฟและนำมาคำนวณหาค่าคงตัวของ Planck ได้

ชื่อผู้ปฏิบัติการ

รหัสประจำตัว..... หมู่ปฏิบัติการที่.....

ผู้ร่วมปฏิบัติการ

เลขที่ หมู่อ้อยที่.....

1.

ปฏิบัติการวิชาฟิสิกส์ 01420222 ห้อง

2.

วันที่ เดือน พ.ศ.

3.

อาจารย์ผู้สอน

บันทึกผลการทดลอง
ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก

สมมติฐานการทดลอง**ผลการทดลอง**

จำนวนเส้นของเกรตติง (N) เส้น/mm

ระยะห่างระหว่างเส้นของเกรตติง (d) mm

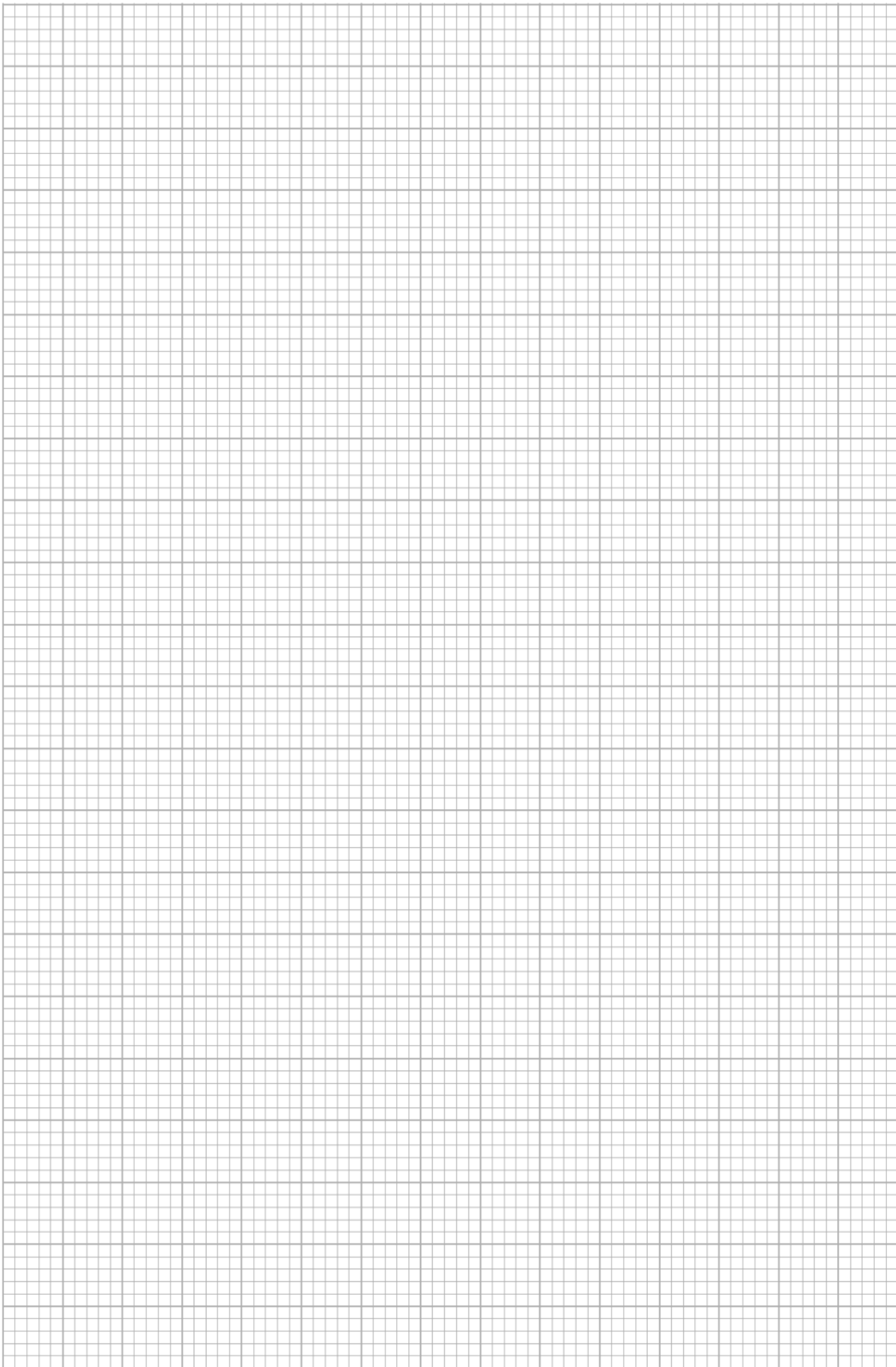
มุม α [°]	ความยาวคลื่น λ [nm]	ความถี่ f [Hz]	ศักย์หยุดยั้ง V_s [V]
13.0			
14.0			
15.0			
16.0			
17.0			
18.0			
19.0			
20.0			
21.0			
22.0			
23.0			
24.0			
25.0			

แสดงการคำนวณ

- ความถี่ของแสง (ยกตัวอย่าง 1 ค่า)
- ค่าคงที่ของพลังค์ที่ได้จากการทดลอง
- เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนค่าคงที่ของพลังค์ที่ได้จากการทดลองและค่ามาตรฐาน

สรุปผลการทดลอง

วิจารณ์ผลการทดลอง



การทดลองที่ 9

ปรากฏการณ์คอมป์ตัน

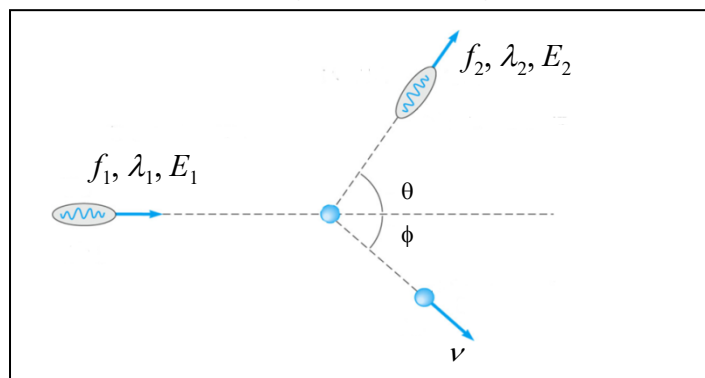
วัตถุประสงค์

1. เพื่อบันทึกสเปกตรัมพลังงานของรังสีเอกซ์ที่กระจายตัวบนวัตถุกระเจิงแสง (Scattering Body) ภายใต้มุมที่หลากหลาย
2. เพื่อระบุพลังงานของโฟตอนที่กระเจิงซึ่งขึ้นอยู่กับมุมกระเจิง
3. เพื่อเปรียบเทียบพลังงานที่วัดได้จากพลังงานที่คำนวณจากการคงปริมาณพลังงานและโมเมนตัม

ทฤษฎี

เมื่อรังสีเอกซ์ผ่านวัตถุ บางส่วนของรังสีจะกระเจิง จากฟิสิกส์ยุคเก่าได้กล่าวไว้ว่าความถี่ของรังสีไม่ควรจะเปลี่ยนแปลงเมื่อผ่านกระบวนการกระเจิง อย่างไรก็ตาม ในปี ค.ศ. 1923 นักฟิสิกส์ชาวอเมริกันนามว่า คอมป์ตัน (A.H. Compton) ได้ค้นพบว่าความถี่ในบางรังสีเอกซ์นั้นลดลง

เพื่อที่จะอธิบายปรากฏการณ์คอมป์ตัน กระบวนการกระเจิงทั้งหมดจะต้องนำมาพิจารณาด้วยฟิสิกส์ควอนตัม (Quantum Physics) ยกตัวอย่างเช่น รังสีเอกซ์จะต้องพิจารณาเป็นอนุภาคโฟตอนเพื่อที่จะอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าว นอกจากนี้ มีการสันนิษฐานว่าอิเล็กตรอนกระเจิงนั้นเป็นอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งเป็นการประมาณที่ดีสำหรับอิเล็กตรอนชั้นนอกของอะตอมที่พลังงานอยู่ในช่วงรังสีเอกซ์ ดังนั้น ในกระบวนการกระเจิงโฟตอนซึ่งมีความถี่ f_1 และพลังงาน $E_1 = hf_1$ จะชนอิเล็กตรอนอิสระที่หยุดนิ่งด้วยมวลนิ่ง (rest mass) m_0 โฟตอนถูกกระเจิงด้วยมุม θ และอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v ด้วยมุม ϕ สัมพันธ์กับทิศทางของโฟตอนที่เข้ามา (ภาพที่ 1) สำหรับกระบวนการชนกันนี้ (collision process) เป็นไปตามกฎการอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัมซึ่งเป็นกระบวนการชนกันแบบยืดหยุ่นระหว่างสองอนุภาคแบบดั้งเดิม



ภาพที่ 1 แผนภาพการกระเจิงคอมป์ตัน (Compton Scattering)

เมื่อโฟตอนไม่มีมวลนิ่ง การอนุรักษ์พลังงานในรูปแบบสัมพัทธภาพสามารถเขียนได้ ดังนี้

$$hf_1 + m_0c^2 = hf_2 + \frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (1)$$

เมื่อ c คือ ความเร็วของแสงในสุญญากาศและการอนุรักษ์ในองค์ประกอบโมเมนตัมเขียนได้ ดังนี้

$$\frac{hf_1}{c} = \frac{hf_2}{c} \cos \theta + \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} v \cos \phi \quad (2)$$

$$\frac{hf_2}{c} \sin \theta - \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} v \sin \phi = 0 \quad (3)$$

จากสมการ (1) และ (2) จะสามารถเขียนสมการสำหรับพลังงานของรังสีเอกซ์หลังการกระเจิง ได้ดังนี้

$$E_2 = \frac{E_1}{1 + \left(\frac{E_1(1 - \cos \theta)}{m_0 c^2} \right)} \quad (4)$$

ในการทดลอง การศึกษาของคอมป์ตันได้ทดลองบนวัตถุกระเจิงแสงซึ่งทำมาจากแผ่นกระจกทนความร้อน (Plexiglass) ผลการทดลองจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับสมการ (4) จากการบันทึกสเปกตรัมโดยใช้ตัววัดพลังงานรังสีเอกซ์ อีกทั้งความยาวคลื่นเอกซ์จะมีการเปลี่ยนแปลงหลังการกระเจิงเป็นไปตามดังสมการ

$$\Delta \lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = \frac{hc}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta) = \frac{hc}{A} (1 - \cos \theta) \quad (5)$$

เมื่อ λ_1 และ λ_2 คือ ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ก่อนและหลังการกระเจิงตามลำดับ

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ มีค่าเท่ากับ 6.626×10^{-34} จูล.วินาที

$m_0 = 9.3 \times 10^{-31}$ kg

$c = 299792458$ m/s

$A = m_0 c^2 = 0.511$ keV มวลนิ่งของอิเล็กตรอน

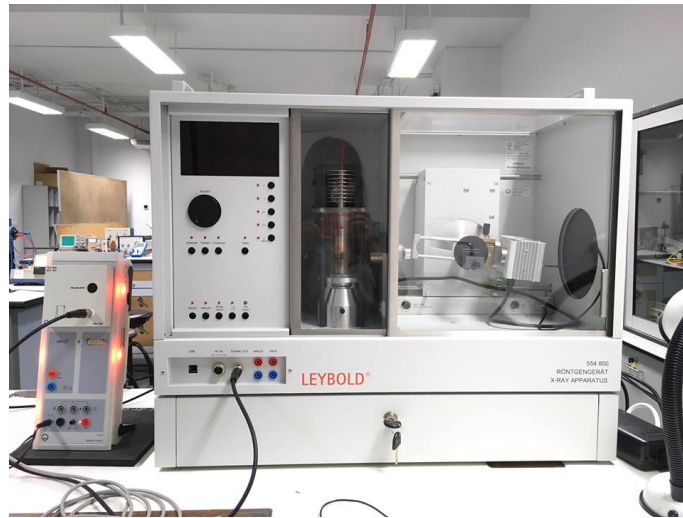
และเรียกสมการ (5) ว่า สมการการเลื่อนของคอมป์ตัน (Compton's shift equation)

อุปกรณ์การทดลอง

เครื่องรังสีเอกซ์ 1 เครื่อง พร้อมด้วย

- | | |
|--|---------|
| 1. หลอดรังสีเอกซ์ Mo และเครื่องวัดมุม | 554 811 |
| 2. เครื่องมือคอมป์ตัน รังสีเอกซ์ II 1 ชุด | 554 837 |
| 3. ตัววัดพลังงานรังสีเอกซ์ 1 เครื่อง | 559 938 |
| 4. เซนเซอร์ CASSY 1 เครื่อง | 524 010 |
| 5. กล้อง MCA 1 กล้อง | 524 058 |
| 6. ระบบปฏิบัติการ CASSY Lab 1 ชุด | 524 200 |
| 7. สายเคเบิล BNC 1 เมตร | 501 02 |
| 8. ชุดคอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งวินโดวส์ 98 หรือเวอร์ชันที่ใหม่กว่า | |

การติดตั้งอุปกรณ์

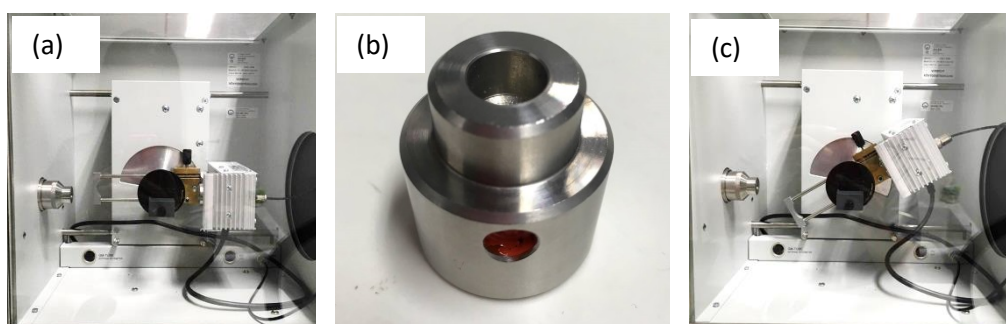


ภาพที่ 2 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์

1. ตรวจสอบการติดตั้งอุปกรณ์

- 1.1 ติดตั้งฟิเตอร์เซอร์คโคเนียม Zr (จากวิธีการฉายของเครื่องรังสีเอกซ์) กับฝั่งทางเข้าลำแสงของคอลลิเมเตอร์วงกลม (Circular Collimator) (จากวิธีการฉายของเครื่องมือคอมพิวเตอร์ รังสีเอกซ์ II)
- 1.2 ต่อคอลลิเมเตอร์กลมกับส่วนหัวของเครื่องรังสีเอกซ์
- 1.3 นำสายเคเบิลเชื่อมต่อของพาวเวอร์ซัพพลายเข้าผ่านท่อกลวงในเครื่องรังสีเอกซ์ แล้วเชื่อมต่อกับเต้ารับ Mini-DIN (Mini-DIN socket) ของตัววัดพลังงานรังสีเอกซ์
- 1.4 ยึดส่วนประกอบของตัววัดพลังงานรังสีเอกซ์และตัวนำเซนเซอร์ในแขนเซนเซอร์ของเครื่องวัดมุม (Goniometer) เข้าด้วยกัน
- 1.5 ใช้สายเคเบิล BNC ร่วมกับตัววัดพลังงานรังสีเอกซ์เพื่อเชื่อมต่อการส่งออกสัญญาณของตัววัดกับเต้ารับ BNC SIGNAL IN ของเครื่องรังสีเอกซ์
- 1.6 ดันสายเคเบิลเชื่อมต่อในระยะพอประมาณเข้าไปในท่อเพื่อที่แขนเซนเซอร์จะสามารถหมุนได้อย่างสมบูรณ์
- 1.7 กดปุ่ม SENSOR และใช้ปุ่ม ADJUST เพื่อปรับให้มุมเซนเซอร์เท่ากับ 150 องศาด้วยมือ เมื่อจำเป็นให้ผลักเครื่องวัดมุมไปทางขวา
- 1.8 ปรับระยะระหว่างตัววัดพลังงานรังสีเอกซ์และแกนในการหมุนเพื่อที่ไม่ให้การติดตั้งตัววัดไปบังลำแสงรังสีเอกซ์ในมุมเซนเซอร์นี้
- 1.9 จากนั้น ผลักเครื่องวัดมุมไปทางซ้ายเพื่อให้ตัววัดไม่ไปสัมผัสคอลลิเมเตอร์กลม (ระยะห่างประมาณ 8 เซนติเมตร ระหว่างคอลลิเมเตอร์กลมและแกนหมุน)
- 1.10 เชื่อมต่อเซนเซอร์ CASSY เข้ากับคอมพิวเตอร์แล้วเสียบปลั๊กกล่อง MCA

- 1.11 ใช้สายเคเบิล BNC เชื่อมต่อกับข้อมูลออก SIGNAL OUT บนช่องทางออกของเครื่องรังสีเอกซ์ไปสู่กล่อง MCA
- 1.12 ก่อนเริ่มปฏิบัติการเครื่องรังสีเอกซ์ ควรสำรวจการชำรุดและตรวจสอบว่าสวิตช์ความต่างศักย์สูงปิดอยู่เมื่อประตูบานเลื่อนเปิดออก (ดูคู่มือของเครื่องรังสีเอกซ์)
- 1.13 ป้องกันไม่ให้ผู้ที่มิได้รับอนุญาตให้มาใช้เครื่องรังสีเอกซ์ (ระวังการใช้ความร้อนที่สูงเกินไปในหลอดรังสีเอกซ์)
- 1.14 เมื่อเปิดสวิตช์เครื่องรังสีเอกซ์ ควรตรวจสอบว่าเครื่องระบายอากาศในหลอดเริ่มหมุน (เครื่องวัดมุมติดตั้งไว้โดยสเต็ปเปอร์มอเตอร์ไฟฟ้า (Electric Stepper Motor) เท่านั้น)
- 1.15 ไม่กีดขวางแขนเล็งและแขนเซนเซอร์ และไม่ใช้แรงในการบังคับการเคลื่อนที่ของแขนทั้งสอง

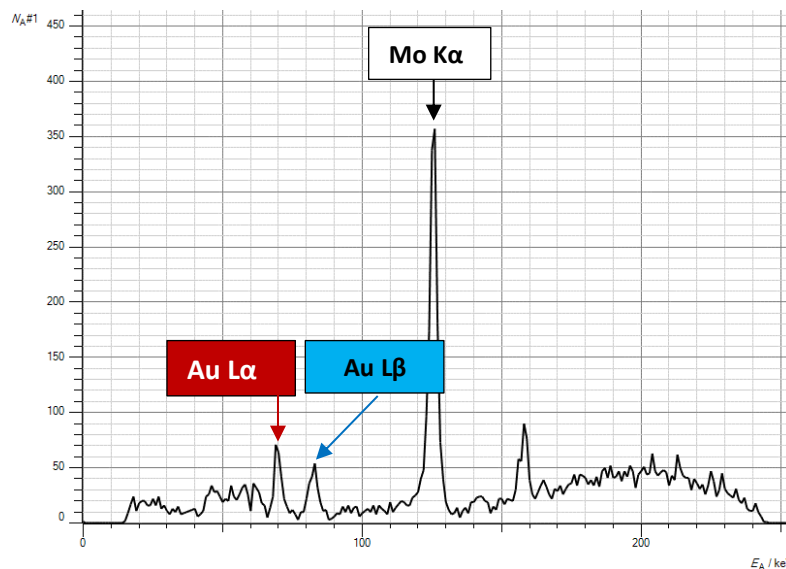


ภาพที่ 3 (a) การติดตั้งเชิงทดลองเพื่อวัดลำแสงปฐมภูมิและเพื่อวัดพลังงานของโฟตอนที่กระจัดกระจายซึ่งขึ้นกับมุมกระเจิง (b) คอลลิเมเตอร์กลม (c) การติดตั้งเชิงทดลองเพื่อวัดการกระเจิงที่มุมต่างๆ

2. การประมาณอัตราการนับ (Counting Rate) ในการกระเจิง

- 2.1 ต่อคอลลิเมเตอร์กลมกับช่องรับแสง
- 2.2 ต่อพาวเวอร์ซัพพลายเข้ากับปลั๊กไฟ (หลังจากไฟ LED ขึ้นแสงสีเขียวประมาณสองนาที่ และตัววัดพลังงานรังสีเอกซ์พร้อมปฏิบัติงาน)
- 2.3 ใช้ระบบปฏิบัติการ CASSY Lab และเลือกพารามิเตอร์ในการวัดคือ “Multichannel Measurement, 256 Channels, Negative Pulses พัลส์เป็นลบ, Gain factor -3, เวลาในการวัด 300 วินาที”
- 2.4 ทั้งนี้สามารถโหลดเปิดไฟล์เริ่มต้นได้ที่หน้าเดสก์ท็อป
- 2.5 เลือกความต่างศักย์ที่ $U = 35 \text{ kV}$ กระแส $I = 1 \text{ mA}$
- 2.6 ปรับตำแหน่งเซนเซอร์ (SENSOR) = 0.1 องศา ปรับตำแหน่งเป้า (TARGET) = 0 องศา
- 2.7 เริ่มบันทึกสเปกตรัมด้วยการกดปุ่ม  หรือ ปุ่ม F9
- 2.8 ปรับลดกระแสไฟฟ้าลงเมื่อผลรวมค่าอัตราการนับสูงกว่า 200/s

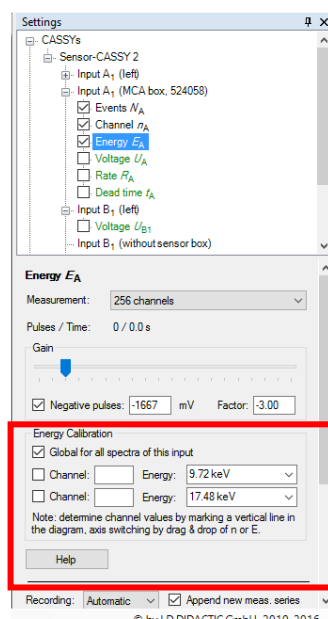
3. การบันทึกสเปกตรัมปฐมภูมิ



ภาพที่ 4 การวัดพลังงานรังสีเอกซ์ที่ปล่อยออกจากหลอดรังสีเอกซ์ด้วยแวนไดเนียม (Mo) หลังจากการปรับแสงสีเดียวด้วยฟิลเตอร์เซอร์โคเนียม (Zr) ($\theta = -0.1^\circ$)

การวัดพลังงานรังสีเอกซ์ จะพบสเปกตรัมปฐมภูมิ นอกจากจะพบสเปกตรัมของ MoK α และ MoK β แล้ว ยังพบสเปกตรัมของ AuL α และ AuL β อีกด้วย (แสดงดังภาพที่ 4) จากเส้นสเปกตรัมเหล่านี้จะช่วยให้สามารถปรับเทียบค่าพลังงานมาตรฐานได้ ดังนี้

3.1 เปิดกล่องข้อความ “Energy Calibration” ผ่านคีย์ลัด Alt+E เลือก “Global Energy Calibration” เพื่อบันทึกช่องพลังงานของเส้นสเปกตรัม AuL α (9.71 keV) และเส้นสเปกตรัม MoK α (17.44 keV)



ภาพที่ 5 แสดงกล่องข้อความ “Energy Calibration” เพื่อบันทึกช่องพลังงานของเส้นสเปกตรัม AuL α และเส้นสเปกตรัม MoK α

3.2 เลือกรายการ “Other Evaluations” → “Calculate Peak Center” ในรายการเลือกพ็อปอัพ (Pop-up Menu) บนระบบปฏิบัติการแผนภาพ กำหนดพื้นที่ของเส้นสเปกตรัม MoK α และบันทึกผลการทดลองในกล่องข้อความ “Energy Calibration”

3.3 จากนั้น กำหนดและบันทึกค่ากลางสูงสุด (Peak Center) ของเส้นสเปกตรัม MoK α

4. การบันทึกสเปกตรัมการกระเจิง

4.1 ปลดคอลลิเมเตอร์กลมออกจากช่องรับแสง

4.2 วางวัตถุกระเจิงแสงซึ่งทำจากแผ่นกระจกทนความร้อนบนแท่นเป้าและยึดเข้ากันให้แน่น

4.3 เลือกกระแสไฟฟ้าปล่อยออก $I = 1.00$ mA (หรือกระแสไฟฟ้าที่กำหนดไว้ก่อนหน้านี้เพื่อประมาณค่าอัตราการนับ) และเปิดสวิตช์ความต่างศักย์สูง

4.4 ปรับมุมเป้าเท่ากับ 20 องศา และมุมเซนเซอร์เท่ากับ 30 องศา

4.5 บันทึกสเปกตรัมล่าสุดโดยการกดปุ่ม  หรือ ปุ่ม F9

4.6 บันทึกพลังงานของสเปกตรัมที่มุมกระเจิง 30 องศา โดยการสร้างหน้าจอใหม่ “Evaluation” ซึ่งมีมุมกระเจิงเป็นแกน x (30 60 90 120 และ 150 องศา) และพลังงานของสเปกตรัมที่มุมกระเจิงต่างๆ เป็นแกน y

4.7 จากนั้น ปรับเซนเซอร์ไปยังมุม 60 90 120 และ 150 องศา ตามลำดับ แล้วบันทึกพลังงานของสเปกตรัมที่มุมกระเจิงค่าต่างๆ ในหน้าต่าง “Evaluation”

5. การเปรียบเทียบพลังงานที่วัดจากการทดลอง และพลังงานที่คำนวณจากกฎการอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัม

5.1 เลือกหน้าจอ “Evaluation” และเปิดหน้าต่างข้อความ “Free Fit” ด้วยคีย์ลัด Alt+F

5.2 บันทึก $f(x, A, B, C, D) = 17.44 / (1 + (17.44 \cdot (1 - \cos x) / A))$ ตามสมการที่ 4

5.3 คลิกเลือก “Continue with marking a range” และกำหนดตำแหน่งข้อมูลในแผนภาพผลการทดลองเป็นเส้นโค้งซึ่งคำนวณทางทฤษฎีด้วยสมการ (4) พารามิเตอร์คือ $E_1 = 17.44$ keV และบันทึกค่า A ที่ได้จากการทดลอง

5.4 จงหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของมวลนิ่ง (A) ที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับพลังงานมวลนิ่งที่ได้จากทฤษฎี ($m_0 c^2 = 511$ keV)

5.5 คำนวณความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์หลังการกระเจิงจากพลังงาน E_2

5.6 คำนวณความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์หลังการกระเจิงจากสมการการเลื่อนของคอมป์ตัน และหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน

ชื่อผู้ปฏิบัติการ รหัสประจำตัว..... หมู่ปฏิบัติการที่.....

ผู้ร่วมปฏิบัติการ เลขที่ หมู่ย่อยที่.....

1. ปฏิบัติการวิชาฟิสิกส์ 01420222 ห้อง

2. วันที่ เดือน พ.ศ.

3. อาจารย์ผู้สอน

บันทึกผลการทดลอง
ปรากฏการณ์คอมป์ตัน

สมมติฐานการทดลอง**ผลการทดลอง**

1. คำนวณความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ที่วัดการกระเจิงที่มุมต่างๆ

มุม [.....]	ค่าพลังงาน E_2 [.....]	ความยาวคลื่นจากการ ทดลอง [.....]	ความยาวคลื่นจากการ คำนวณ [.....]	เปอร์เซ็นต์ ความคลาด เคลื่อน
0				
30				
60				
90				
120				
150				

2. เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมและค่าพลังงานที่วัดได้จากการกระเจิงของรังสีเอกซ์

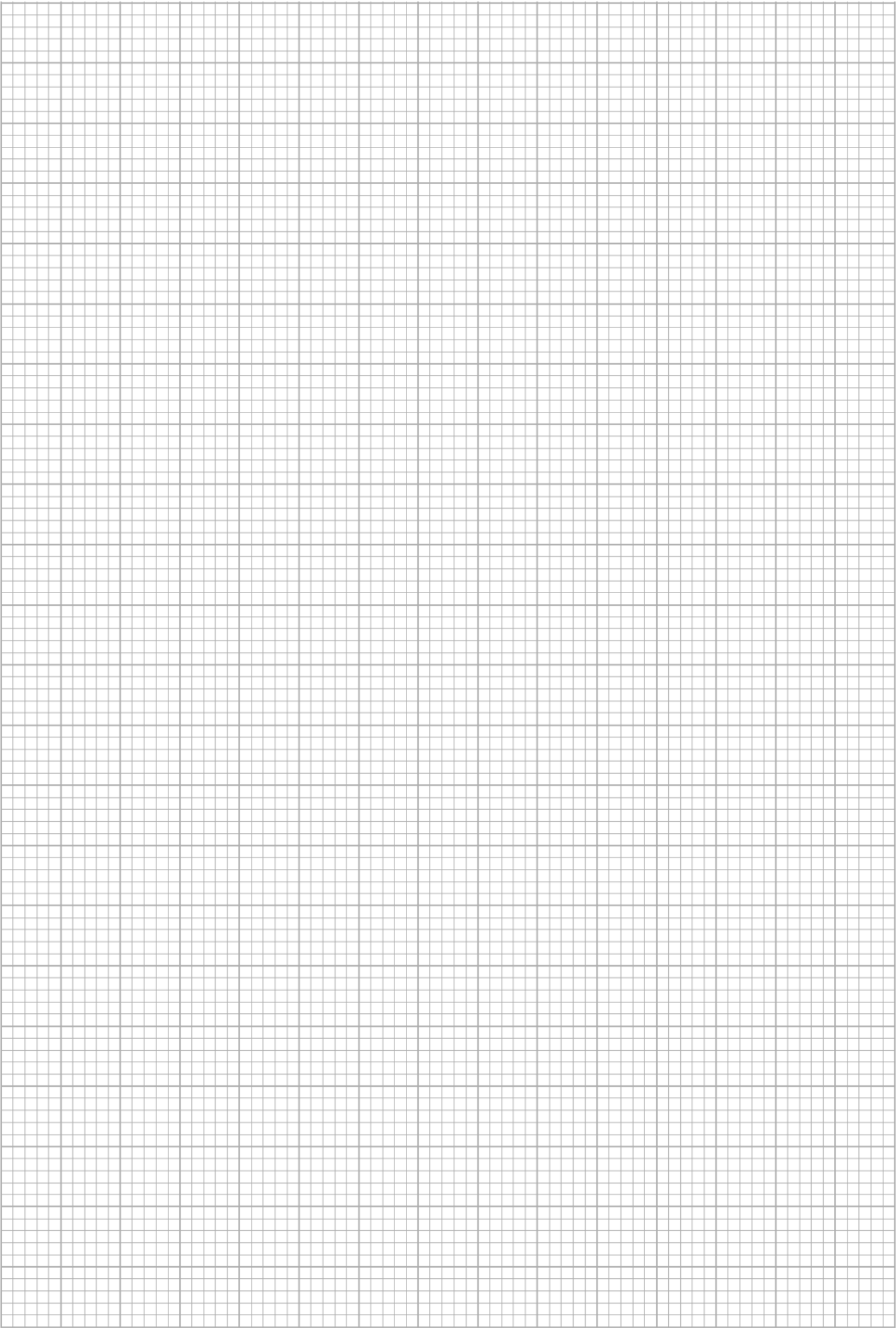
3. บันทึกค่าพลังงานมวลนิ่งที่ได้จากการทดลอง.....

เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าพลังงานมวลนิ่ง

4. แสดงการคำนวณ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์หลังการกระเจิงจากพลังงาน E_2

สรุปผลการทดลอง

วิจารณ์การทดลอง



ภาคผนวก



คำสั่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ที่ ๑๘ /๒๕๕๙

เรื่อง แต่งตั้งคณะกรรมการปรับปรุงคู่มือรายวิชาปฏิบัติการฟิสิกส์ยุคใหม่ ปีการศึกษา ๒๕๕๙

ตามที่ภาควิชาฟิสิกส์ ได้ดำเนินการปรับปรุงและจัดซื้อเครื่องมืออุปกรณ์ประกอบการเรียนการสอนรายวิชาปฏิบัติการฟิสิกส์ยุคใหม่นั้น ดังนั้นภาควิชาฯ จึงขอแต่งตั้งคณะกรรมการปรับปรุงคู่มือรายวิชาปฏิบัติการฟิสิกส์ยุคใหม่ ปีการศึกษา ๒๕๕๙ เพื่อดำเนินการจัดทำคู่มือประกอบการเรียนดังนี้

- | | |
|--------------------------------|---------------------|
| ๑. รศ.ดร.จิรศักดิ์ วงศ์เอกบุตร | ประธาน |
| ๒. ผศ.ดร.ณัฐพร ฉัตรแถม | กรรมการ |
| ๓. อ.สิทธิชัย ปิ่นกาญจน์โรจน์ | กรรมการ |
| ๔. นายภัทรพงษ์ นิภากุล | กรรมการ |
| ๕. น.ส.จันทร์ เขียนวงศ์ | กรรมการ |
| ๖. น.ส.จาริณี เกียงเอีย | กรรมการ |
| ๗. น.ส.กัญญารัตน์ เกศรีสม | กรรมการและเลขานุการ |

สั่ง ณ วันที่ ๑๕ สิงหาคม ๒๕๕๙

(รศ.ดร.สุรศักดิ์ เชียงกา)
หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์