



# การแข่งขันฟิสิกส์โอลิมปิกระหว่างประเทศครั้งที่ 25

ปี 1993

เมือง Beijing ประเทศ Peoples' Republic of China

## ภาคทฤษฎี

### ข้อ 1. อนุภาคสัมพัทธภาพ

ตามหลักการของทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษหรือเฉพาะกรณี (Special Theory of Relativity) เราเขียนความสัมพันธ์ระหว่างพลังงาน  $E$  และโมเมนตัม  $p$  ของอนุภาคอิสระที่มีมวลนิ่ง (rest mass) สัมพัทธ์กับผู้สังเกตเป็น  $m_0$  ได้ในรูป

$$E = \sqrt{p^2 c^2 + m_0^2 c^4} = mc^2$$

เมื่อมีแรงอนุรักษณ์มากกระทำกับอนุภาค พลังงานรวมของอนุภาคซึ่งมีค่าเท่ากับผลบวกของ  $E$  และพลังงานศักย์มีค่าคงตัว ถ้าพลังงานรวมของอนุภาคมีค่าสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานมวลที่อยู่กับที่คือ  $m_0 c^2$  เราสามารถตัด  $m_0 c^2$  ออกจากการคำนวณได้

1.1 ให้พิจารณาการเคลื่อนที่ตามแนวเส้นตรงของอนุภาคพลังงานสูง ( $m_0 c^2$  มีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานรวม) เมื่อมีแรงดึงดูดซึ่งมีสมมาตรเป็นทรงกลม และมีขนาดคงที่เท่ากับ  $f$  กระทำต่ออนุภาคที่ว่านี้ เมื่อเวลา  $t = 0$  อนุภาคอยู่ที่จุดศูนย์กลางของแรงและมีโมเมนตัม  $p_0$  ให้อภิปรายการเคลื่อนที่ของอนุภาคนี้โดยวิธีสเกตซ์กราฟของ  $p$  เป็นฟังก์ชันของพิคัด  $x$  และสเกตซ์  $x$  เป็นฟังก์ชันของ  $t$  อย่างน้อยในช่วง 1 คาบของการเคลื่อนที่ และให้ระบุพิคัดของจุดวกกลับ (coordinates of turning points) ที่เขียนเป็นพิคัดของ  $p_0$  และ  $f$  และให้ระบุทิศทางของการเคลื่อนที่ของอนุภาคในกราฟ  $p-x$  ให้ชัดเจน

1.2 เมซอนเป็นอนุภาคประกอบด้วยควาร์กสองตัว มวลนิ่งของเมซอนคือ  $M$  มีค่าเท่ากับมวลนิ่งของควาร์กสองตัวหารด้วย  $c^2$  ให้พิจารณาอนุภาคเมซอนที่อยู่นิ่ง ควาร์กสองตัวที่ประกอปกันเป็นเมซอนเคลื่อนที่ตามแนวแกน  $x$  และดึงดูดซึ่งกันและกันด้วยแรงคงตัว  $f$  สมมติว่าควาร์กชนกันชนิดที่ผ่านซึ่งกันและกันได้โดยอิสระในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของควาร์กพลังงานสูง เราจะถือว่ามวลนิ่งของควาร์กมีค่าต่ำจนเราไม่ต้องนำมาเข้าการคำนวณ เมื่อเวลา  $t = 0$  ให้อภิปรายการเคลื่อนที่ของควาร์กทั้งสองด้วยวิธีสเกตซ์กราฟของ  $x$  เป็นฟังก์ชันของ  $t$  ประกอปกและสเกตซ์กราฟของ  $p$  เป็นฟังก์ชันของ  $x$



ให้ระบุจุดวกกลับของกราฟเหล่านี้เป็นค่าของ  $M$  และ  $f$  และให้ใช้ลูกศรแสดงทิศทางการเปลี่ยนแปลงของกราฟ  $p$  vs  $x$  และให้คำนวณระยะทางสูงสุดระหว่างควาร์กสองตัวนี้

1.3 ให้เรียกกรอบอ้างอิงที่ใช้วิเคราะห์ปัญหาในข้อ 1.2 เป็นกรอบ  $S$  เรียกกรอบอ้างอิงห้องทดลอง (Laboratory frame) เป็นกรอบอ้างอิง  $S'$  กรอบอ้างอิง  $S'$  เคลื่อนที่ไปตามแนวแกน  $x$  ในทิศทางที่เป็นค่าลบด้วยความเร็วคงที่  $0.6c$  ให้จุดกำเนิด (origin) ของกรอบ  $S'$  กับจุดกำเนิดของกรอบ  $S$  เมื่อเวลา  $t = t' = 0$  ให้เขียนกราฟ  $x'$  เป็นฟังก์ชันของ  $y'$  แสดงการเคลื่อนที่ของควาร์กทั้งสอง พร้อมทั้งแสดงตำแหน่งของจุดวกกลับในรูปที่ประกอบด้วย  $M$ ,  $f$  และ  $c$  แล้วคำนวณระยะทางสูงสุดระหว่างควาร์กทั้งสองที่ผู้สังเกตในกรอบอ้างอิง  $S'$  สังเกต

ในการแปลงลอเรนซ์ (Lorentz' transformation) พิกัดของเวลาและการกระจัดในกรอบอ้างอิง  $S$  และกรอบอ้างอิง  $S'$  มีความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$x' = \gamma(x + \beta ct)$$

$$t' = \gamma(t + \beta x/c)$$

ในที่นี้  $\beta = v/c$ ,  $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$

และ  $v$  คือความเร็วของกรอบอ้างอิง  $S$  สัมพัทธ์กับกรอบอ้างอิง  $S'$

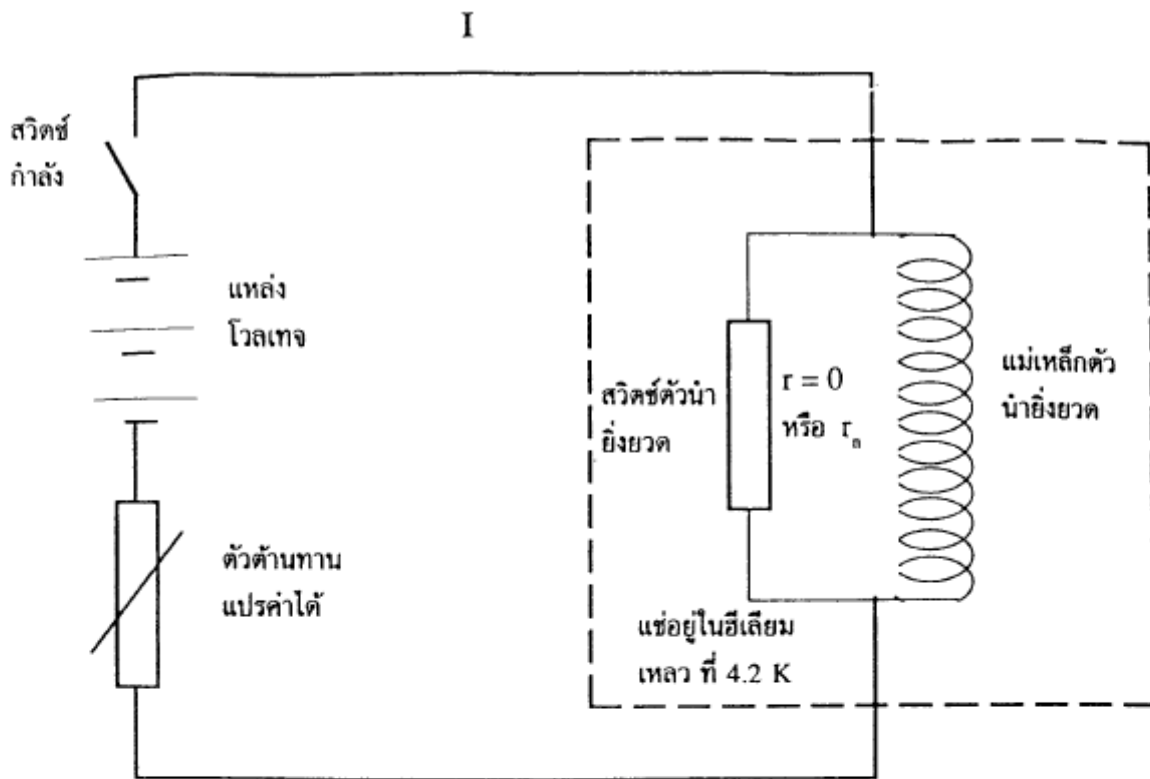
ให้คำนวณพลังงาน  $E'$  ในกรอบอ้างอิง  $S'$

## ข้อ 2 แม่เหล็กตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

แม่เหล็กตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีใช้กันอย่างแพร่หลายในห้องปฏิบัติการ รูปแบบของแม่เหล็กที่พบปะกันทั่ว ๆ ไปเป็นแบบขดลวดโซลินอยด์ที่ทำด้วยลวดตัวนำยิ่งยวด แม่เหล็กตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดสามารถทำให้เกิดสนามแม่เหล็กความเข้มสูงได้ ด้วยเนื่องจากไม่มีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนเพราะความต้านทานไฟฟ้าของขดลวดตัวนำเป็นศูนย์เมื่อแม่เหล็กจุ่มอยู่ในฮีเลียมเหลวที่อุณหภูมิ 4.2 K การใช้แม่เหล็กตัวนำยิ่งยวดตามปกติธรรมดา เราจะต้องมีสวิตช์ตัวนำยิ่งยวด (superconducting switch) ใช้ประกอบด้วยดังที่แสดงในรูป 25.6

ความต้านทาน  $r$  ของสวิตช์สามารถเปลี่ยนแปลงได้ คือมีค่า  $r = 0$  เมื่อสวิตช์อยู่ในภาวะตัวนำยิ่งยวด และมีค่า  $r = r_0$  เมื่อสวิตช์อยู่ในภาวะปกติ

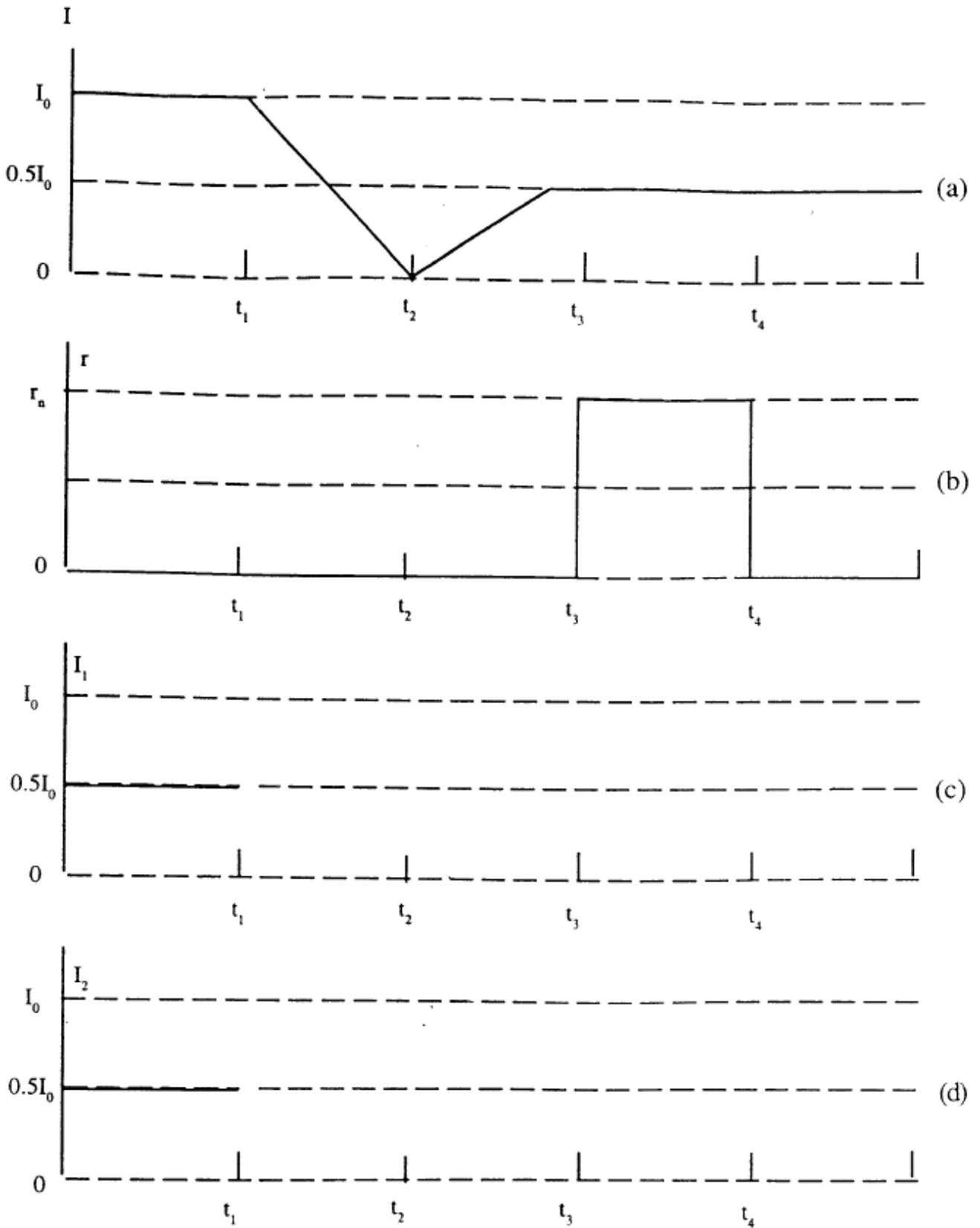
เมื่อความต้านทานอยู่ในภาวะตัวนำยิ่งยวด แม่เหล็กจะทำงานในภาวะที่เรียกว่า Persistent mode กล่าวคือกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านแม่เหล็กและสวิตช์ตัวนำยิ่งยวดเป็นวงปิดได้ตลอดไป การทำงานในภาวะ persistent mode ทำให้ขดลวดโซลินอยด์สร้างสนามแม่เหล็กที่สม่ำเสมอได้เป็นเวลานานโดยไม่ต้องอาศัยแหล่งพลังงานภายนอกอีกเลย



รูป 25.6

รูปข้างบนมิได้แสดงรายละเอียดของสวิตช์ตัวนำยิ่งยวด ตามธรรมชาติสวิตช์ที่วุ่นนี้ทำด้วยลวดตัวนำยิ่งยวดและมีลวดให้ความร้อนหุ้มห่ออยู่ ลวดนี้ถูกฉนวนกันทำให้ไม่มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างถึงบรรจฮีเลียมเหลว เมื่อลวดได้รับความร้อน อุณหภูมิของลวดจะสูงขึ้นทำให้ลวดกลับภาวะเป็นลวดตัวนำธรรมดาความต้านทาน  $r$  ในที่นี้มีค่าเท่ากับ  $5 \Omega$  ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้ายิ่งยวดขึ้นอยู่กับขนาด ในที่มีค่าเท่ากับ  $10 \text{ H}$  ดังที่แสดงในรูปข้างบน กระแส  $I$  ทั้งหมดเปลี่ยนค่าได้โดยการปรับค่าความต้านทาน  $R$

2.1 ถ้ากระแสทั้งหมด  $I$  และค่าความต้านทาน  $r$  ของสวิตช์ตัวนำยิ่งยวดมีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาดังกราฟในรูป 25.7 a และ b ตามลำดับ และสมมติว่ากระแส  $I_1$  และ  $I_2$  ที่ไหลผ่านแม่เหล็กตัวนำยิ่งยวด และสวิตช์ตัวนำยิ่งยวดตามลำดับมีค่าเท่ากันเมื่อเริ่มทำการทดลองดังที่ปรากฏในรูป 25.7 c และ d ตามลำดับ อยากทราบว่ากระแส  $I_1$  และ  $I_2$  เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาอย่างไรจากค่า  $t = t_1$  ถึง  $t = t_2$  ให้เขียนคำตอบลงไปในกราฟในรูป 25.7 c และ d

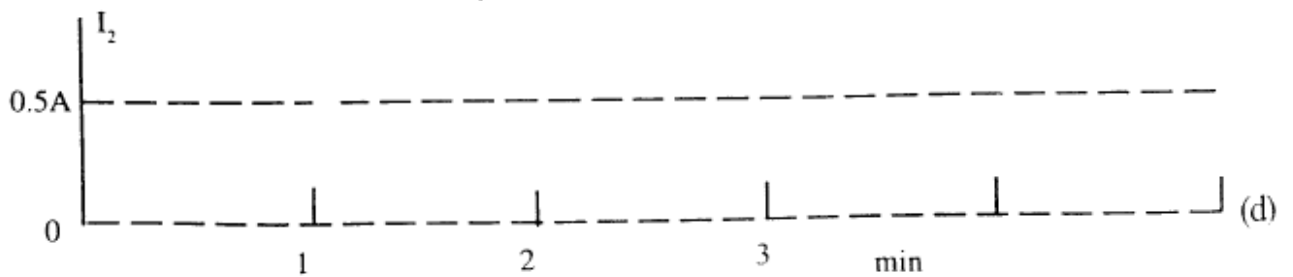
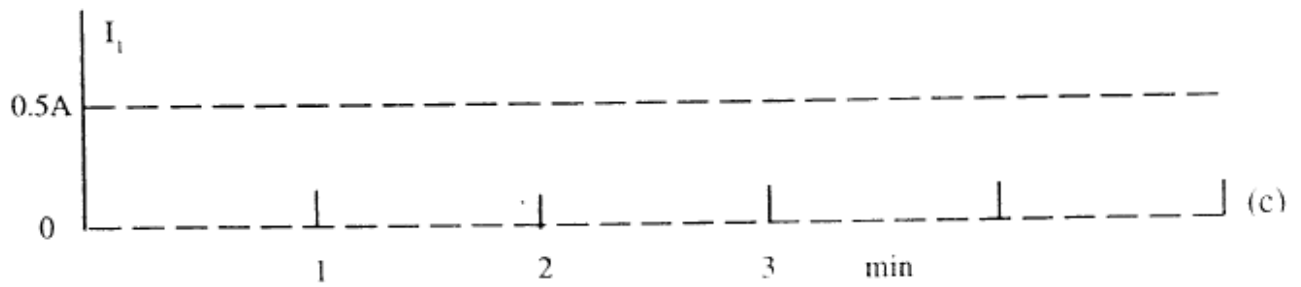
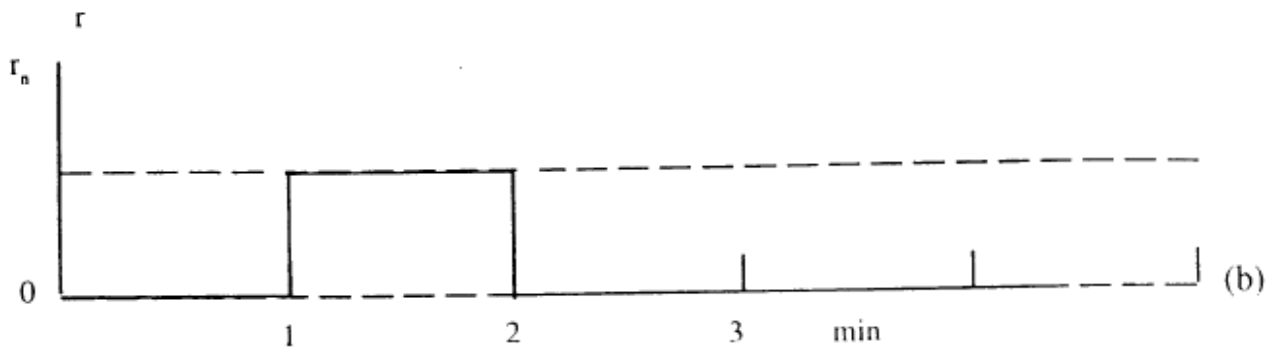
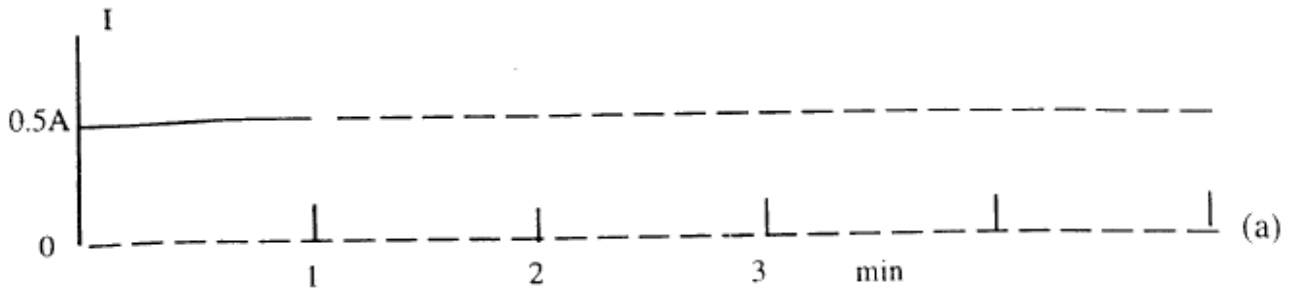


รูป 25.7

2.2 สมมติว่าสวิตช์ K ของแหล่งกระแสไฟฟ้าถูกสับให้มีกระแสไหลในวงจรที่เวลา  $t = 0$  เมื่อ  $r = 0$  และ  $R = 7.5 \Omega$  หากกระแส  $I$  รวม =  $0.5 \text{ A}$  เมื่อสวิตช์ ยังอยู่ที่เดิม และความต้านทาน ของสวิตช์ตัวนำยิ่งยวดมีการเปลี่ยนแปลงดังกราฟในรูป 25.7 b



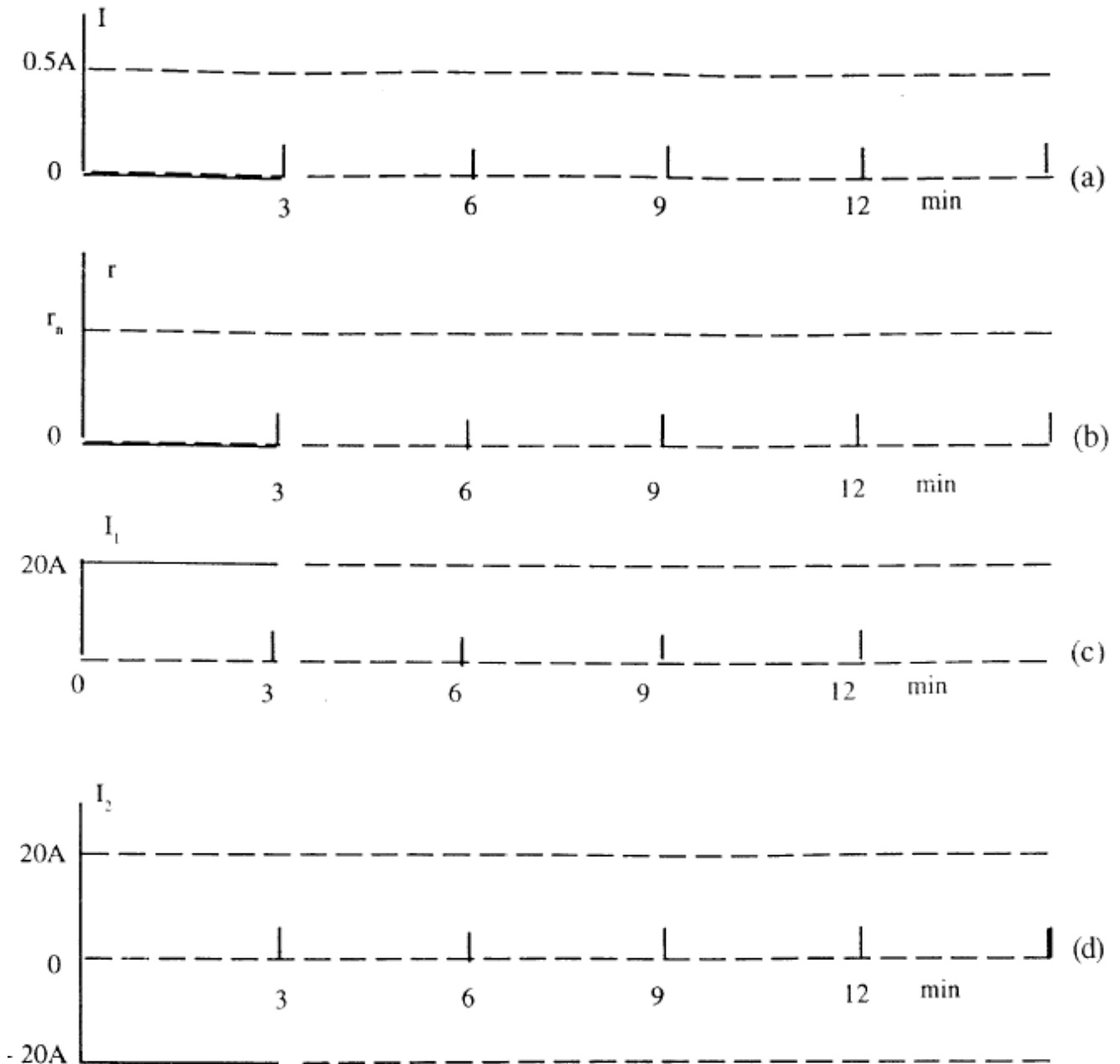
ให้หาค่ากระแส  $I$ ,  $I_1$  และ  $I_2$  ในรูป 23.8 a, c และ d ตามลำดับโดยเขียนกราฟลงไปในรูปแบบที่กำหนดมาให้



รูป 25.8



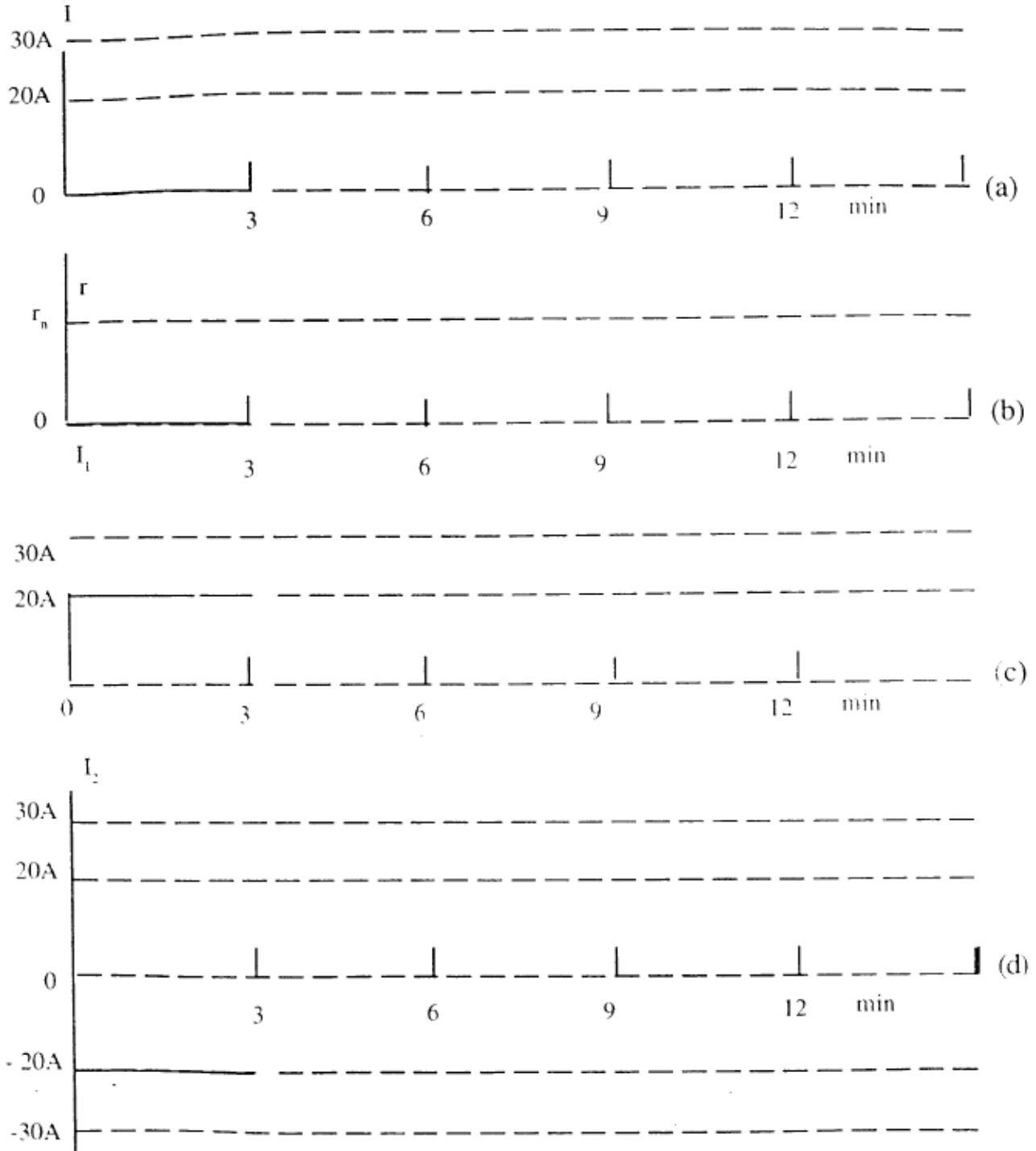
2.3 หากกำหนดไว้ว่ากระแสที่ต่ำกว่า 0.5A เท่านั้นที่สามารถไหลผ่านสวิตช์ตัวนำไฟฟ้า  
ที่ยังวัดในขณะที่อยู่ในภาวะปกติได้ หากกระแสมีค่าสูงกว่านี้จะทำให้สวิตช์ตัวนำยิ่งยวดไหม้ สมมติ  
ว่าแม่เหล็กตัวนำยิ่งยวดกำลังทำงานในภาวะ persistent mode คือ  $I = 0$  และ  $I = i_1 = 20 \text{ A}$  ดังรูป  
25.9 จากเวลา  $t = 0$  ถึง  $t = 3 \text{ min}$  หากเราจะหยุดการทดลองโดยลดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านแม่  
เหล็กตัวนำยิ่งยวดลงเป็นศูนย์ เราจะต้องทำอย่างไร การดำเนินการอาจมีหลายขั้นตอน ให้เขียน  
กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ  $I$ ,  $r$ ,  $I_1$  และ  $I_2$  ลงในรูป 25.9



รูป 25.9



2.4 ถ้าหากว่าแม่เหล็กตัวนำยิ่งยวดกำลังทำงานอยู่ในภาวะ pe.sistent mode โดยมีกระแส  $I = 20 \text{ A}$  (ในช่วงเวลา  $t = 0$  ถึง  $t = 3 \text{ min}$  ดังที่แสดงในรูป 25.10) เราจะต้องดำเนินการอย่างไรเพื่อให้ได้กระแส  $I = 30 \text{ A}$  ในภาวะ persistent mode เหมือนเดิม โดยให้เขียนคำตอบลงไปบนกราฟในรูปที่ 25.11



รูป 25.10



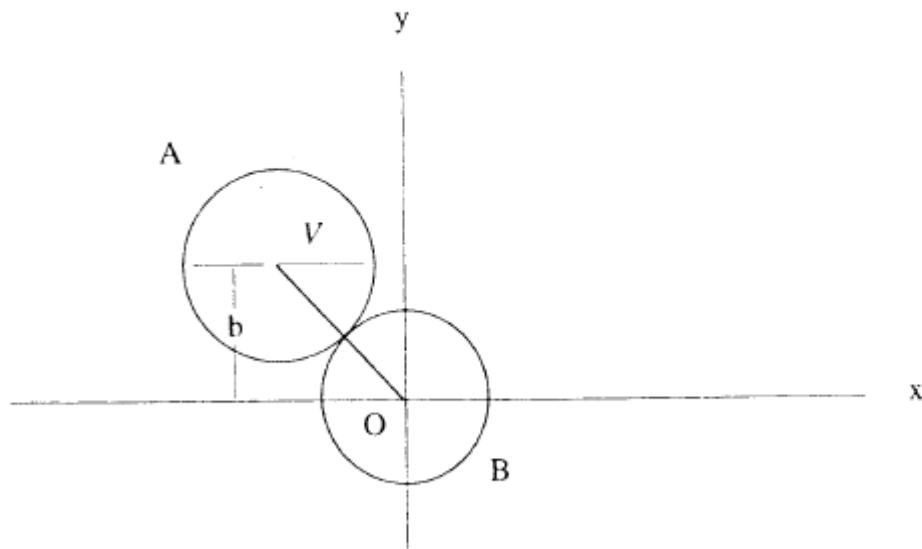
### ข้อ 3 การชนกันระหว่างลูกทรงกลมที่มีแรงเสียดทานที่ผิว

ลูกทรงกลมตันสม่ำเสมอ A มีมวล  $m_A$  รัศมี  $R_A$  เคลื่อนที่ในแนวระนาบ  $x-y$  ด้วยความเร็วสม่ำเสมอ  $V$  มีทิศทางตามแนวแกน  $x$  และจุดศูนย์กลางของลูกทรงกลมอยู่เหนือแกน  $x$  เป็นระยะทาง  $b$  ลูกทรงกลมนี้ชนกับลูกทรงกลมตันสม่ำเสมอ B ที่อยู่นิ่ง มีมวล  $m_B$  และรัศมี  $R_B$  จุดศูนย์กลางของลูกทรงกลมอยู่ที่จุดกำเนิด สมมติว่าที่จุดสัมผัส แรงเสียดทานมีค่ามากพอที่ทำให้ความเร็วของจุดสัมผัสของลูกทรงกลมทั้งสองในแนวเส้นตรงที่ตั้งฉากกับเส้นที่ลากต่อระหว่างจุดศูนย์กลางของลูกทรงกลมทั้งสองมีค่าเท่ากันทันทีหลังการชน และสมมติอีกว่าการชนกันที่พิจารณาตามแนวที่ลากต่อระหว่างจุดศูนย์กลางของลูกทรงกลมเป็นการชนแบบยืดหยุ่น

3.1 ให้หาเงื่อนไขที่ลูกทรงกลมทั้งสองจะชนกันได้

3.2 ให้หาองค์ประกอบของความเร็วของลูกทรงกลมหลังการชน คือ  $V_{Ax}'$ ,  $V_{Ay}'$ ,  $V_{Bx}'$  และ  $V_{By}'$  โดยตีออกเป็นค่าของ  $m_A$ ,  $m_B$ ,  $R_A$ ,  $R_B$ ,  $V$  และ  $b$ .

3.3 ให้หาค่าพลังงานจลน์  $E_A'$  ของลูกทรงกลม A และ  $E_B'$  ของลูกทรงกลม B หลังการชน โดยตีออกเป็นค่าของ  $m_A$ ,  $m_B$ ,  $R_A$ ,  $R_B$ ,  $V$  และ  $b$ .



รูป 25.15





## ภาคปฏิบัติ

### ข้อ 1 การหาสภาพการสะท้อนแสงโพลาไรส์ที่ผิวไดอิเล็กทริกพลาสติก

#### อุปกรณ์การทดลอง

1. แหล่งแสงเลเซอร์ฮีเลียมนีออน 1 ชุด กำลังประมาณ 1.5 mW
2. ตัวทำแสงโพลาไรส์ (polariser) พร้อมด้วยแผ่นสเกลวัดมุมรูปวงกลมติดอยู่ (ดูรูป) 2 ชุด  
ตัวหนึ่งติดอยู่ที่หน้าต่างเลเซอร์ อีกตัวหนึ่งวางตั้งอยู่บนแผ่นกระดานไม้โดยใช้หมุด
3. เครื่องวัดความเข้มแสง ประกอบด้วยโฟโตเซลล์และไมโครแอมมิเตอร์ (ดูรูป) 2 ชุด
4. แผ่นแก้วแยกแสง (beam splitter)
5. แผ่นพลาสติกไดอิเล็กทริกที่เราต้องการหาสภาพการสะท้อนแสงและดรรชนีหักเห
6. แท่นวางแผ่นพลาสติก ติดตั้งบนแผ่นสเกลวัดมุมครึ่งวงกลม (ดูรูป)
7. หมุดยาวสำหรับตรึงแท่นวางแผ่นพลาสติกบนแผ่นกระดาน(drawingboard)และทำ  
หน้า ที่ เป็น แกนหมุน
8. ช่องแคบยาวและฉากสำหรับปรับขนาดของลำแสงเลเซอร์ตามแนวราบ และสำหรับปรับตั้ง  
อุปกรณ์แสงให้อยู่ในแนวเส้นตรง
9. ร่องสำหรับติดตั้งอุปกรณ์แสงให้เข้าที่
10. แผ่นกระดาน (drawing board)
11. กระดาษกราฟ

#### คำถามประกอบการทดลอง

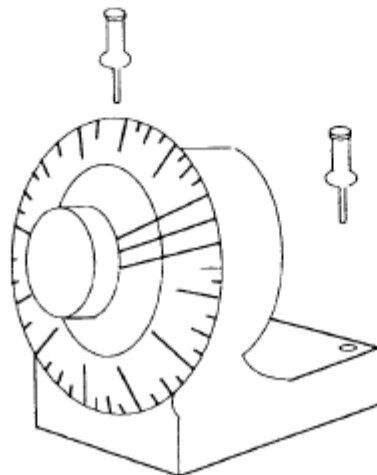
1. ให้หาสภาพการสะท้อนแสงขององค์ประกอบ p เป็นฟังก์ชันของมุมตก ( องค์ประกอบ p  
หมายความว่าถึงองค์ประกอบสนามไฟฟ้าที่ขนานกับระนาบตกกระทบ)
  - 1.1 ให้ระบุตำแหน่งของแกนผ่านแสงของตัวโพลาไรเซอร์ A โดยทำเครื่องหมายด้วย  
แนวเส้นตรงเขียนลงไปบนจานสเกลวัดมุม ในการทำการทดลองวัดองค์ประกอบ  
p (แกนผ่านแสงคือทิศทางการสั่นของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าของแสงที่ผ่านตัว  
โพลาไรส์ )
  - 1.2 เลือกใช้ไมโครแอมมิเตอร์ตัวใดตัวหนึ่งและตั้งเครื่องที่ x 5 ให้แสดงโดยผลการ  
ทดลองว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงและค่ากระแสที่อ่านได้จากไมโคร  
แอมมิเตอร์เป็นสัดส่วนตรง



- 1.3 ให้เขียนแผนภาพของการตั้งเครื่องมือเพื่อหาค่าสภาพการสะท้อนแสงขององค์ประกอบ p เป็นฟังก์ชันของมุมตก
- 1.4 ให้รายงานข้อมูลการทดลองและค่าสภาพการสะท้อนแสงที่คำนวณได้(รวมทั้งสูตรที่ใช้คำนวณในรูปตาราง ให้เขียนกราฟของสภาพการสะท้อนแสงเป็นฟังก์ชันของมุมตก
2. ให้คำนวณดรรชนีหักเหของแผ่นไดอิเล็กทริกที่ใช้ในการทดลอง
3. ให้หาสภาพการสะท้อนแสงขององค์ประกอบ s เป็นฟังก์ชันของมุมตก ( องค์ประกอบ s คือองค์ประกอบสนามไฟฟ้าที่ขนานกับระนาบตกกระทบ) ให้ระบุตำแหน่งแกนผ่านแสงของตัวโพลารไรส์ (A) โดยให้ทำเครื่องหมายเป็นเส้นตรงไปบนจานสเกลมุมในเมื่อทำการทดลองที่ใช้องค์ประกอบ s

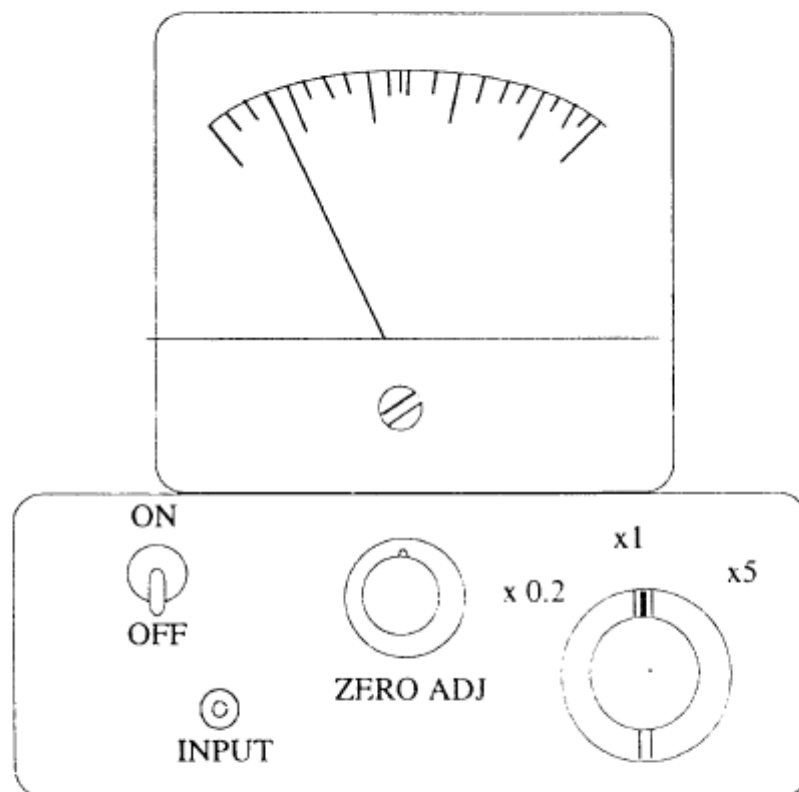
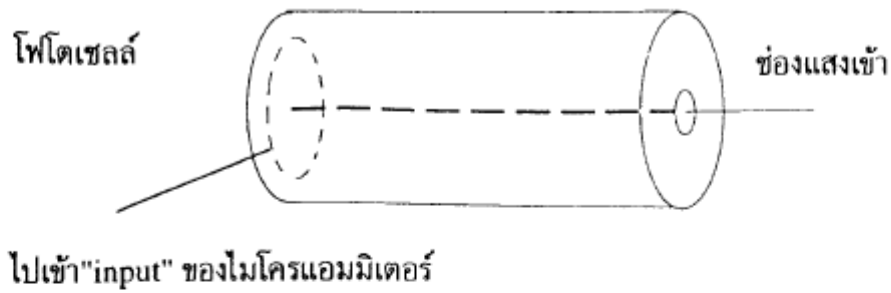
### คำแนะนำและข้อควรระวัง

1. อย่าให้แสงเลเซอร์ส่องเข้าตาโดยตรง
2. กำลังของแสงเลเซอร์อาจแปรปรวนเป็นช่วง ๆ ดังนั้นตลอดการทดลองต้องใช้เครื่องวัดความเข้มแสงสองตัวพร้อมกัน ตรวจสอบและปรับผลการทดลอง
3. เปิดเลเซอร์ให้ทำงานตลอดเวลา แม้ว่าจะทดลองสิ้นสุดแล้วและออกจากห้องสอบให้เปิดเลเซอร์ไว้
4. แสงสะท้อนเป็นแสงโพลารไรส์ที่สมบูรณ์ที่สุดที่มุมตกกระทบ  $\theta_B$  โดยที่  $\tan \theta_B = n$  (ดรรชนีหักเห)



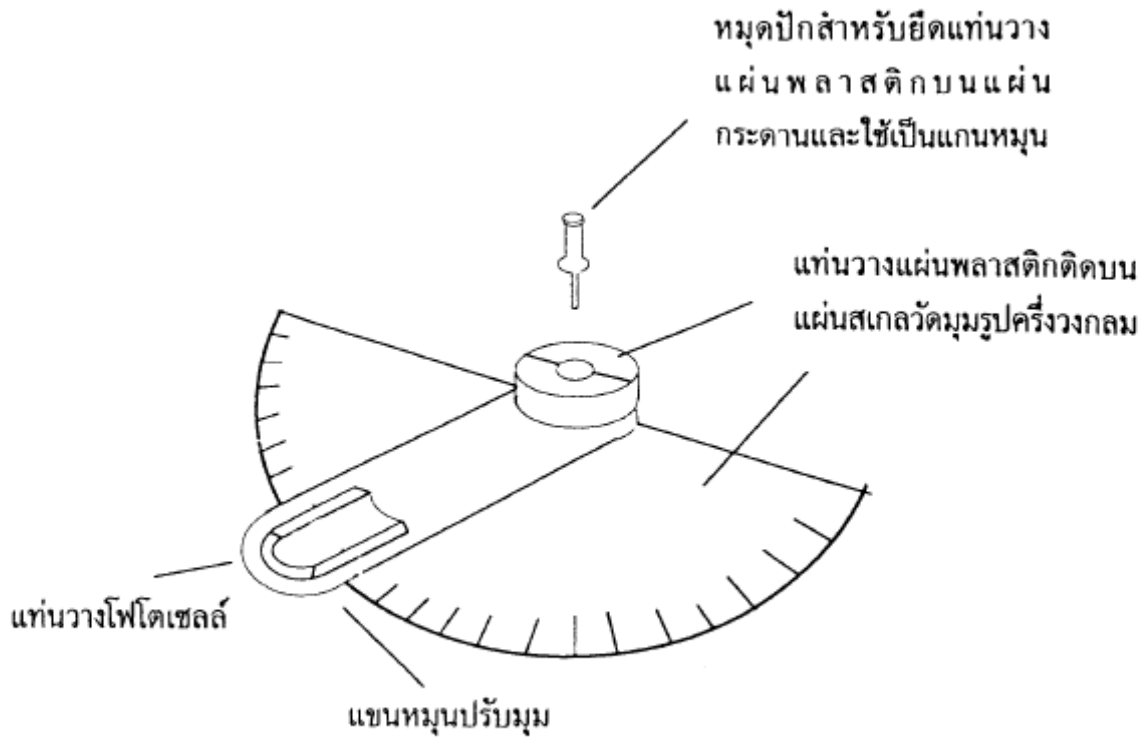
ตัวทำโพลารไรส์พร้อมแผ่นสเกลวงกลมวัดมุม เข็มเครื่องหมายใช้ช่วยอ่านมุมเท่านั้น และไม่ใช้แสดงตำแหน่งแกนผ่านแสง

รูป 25.17



เครื่องวัดความเข้มแสง  
รูป 25.18

1. เสียบปลั๊กของโฟโตเซลล์ เข้ากับ "INPUT" ของไมโครแอมมิเตอร์
2. เปิดสวิตช์ของไมโครแอมมิเตอร์
3. ปิดช่องแสงเข้าของโฟโตเซลล์ ปรับ "ZERO ADJ" ให้เข็มตรงกับเลข "0".
4. หมุนปุ่ม "Multiple" ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม



รูป 25. 19 แท่นวางแผ่นพลาสติกติดบนแผ่นสเกลวัดมุมครึ่งวงกลม



## ข้อ 2 กล่องปริศนา

กล่องปริศนามีขั้ว 2 ขั้ว ภายในมีอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบ passive ไม่เกิน 3 ชิ้นต่อเข้าด้วยกัน ระหว่างขั้วทั้งสอง และไม่มีแหล่งกำเนิดโวลเทจอยู่ข้างใน ให้หาว่ามีอุปกรณ์อันใดต่ออยู่ภายใน แต่ละตัวมีค่าเท่าไรและต่อกันในลักษณะไหน ห้ามเปิดกล่อง

### อุปกรณ์การทดลอง

1. ออสซิลโลสโคปแบบสองลำแสง
2. เครื่องกำเนิดสัญญาณที่ความถี่เสียง (audio frequency)
3. กล่องความต้านซึ่งตั้งความต้านทานไว้ที่  $100 \Omega$  ( $\Delta R/R = \pm 0.5\%$ )
4. สายไฟสำหรับต่อวงจร
5. กระดาษกราฟแบบ log-log หรือ semi-log หรือ linear ให้เลือกใช้ตามความจำเป็น

หมายเหตุ ปุ่มควบคุมต่าง ๆ ของออสซิลโลสโคป และเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่เสียงที่ไม่ได้ระบุหน้าที่ตั้งไว้ณตำแหน่งที่ถูกต้องแล้ว

### สิ่งที่ผู้เข้าสอบต้องดำเนินการ

1. เขียนรูปวงจรที่ใช้ในการทดลอง
2. แสดงค่าต่าง ๆ ที่วัดได้และค่าต่าง ๆ ที่คำนวณได้ในรูปของตาราง นำผลที่ได้ไปเขียนกราฟที่จัดไว้ให้ (ระบุชื่อกราฟ ปริมาณและหน่วยบนแกนพิกัด)
3. เขียนรูปวงจรที่อยู่ในกล่องปริศนา บอกชื่ออุปกรณ์ไฟฟ้าทั้งสามพร้อมค่าเฉพาะของแต่ละชิ้น (ให้แสดงวิธีคำนวณด้วย)

### คำแนะนำ

1. ทำการการทดลองโดยใช้ความถี่ระหว่าง 100 Hz ถึง 50 kHz
2. เอาท์พุทโวลเทจของเครื่องกำเนิดสัญญาณควรต่ำกว่า 1.0 V (จากยอดถึงยอด)
3. ในการต่อสายไฟ ให้ระวังการรบกวนจากไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz ที่ใช้ในอาคารด้วย
4. ค่าที่อ่านได้จากโวลทมิเตอร์ของเครื่องกำเนิดสัญญาณมิได้เป็นค่าแท้จริง แต่เป็นแต่เพียงค่าสัมพัทธ์
5. ความถูกต้องหรือความคลาดเคลื่อนของการวัดโวลเทจ  $\Delta V/V = \pm 4\%$



# การแข่งขันฟิสิกส์โอลิมปิกระหว่างประเทศครั้งที่ 26

## ปี 1994

เมือง Canberra, ACT ประเทศ Australia

### ภาคทฤษฎี

#### ข้อ 1 การเลื่อนความถี่ที่สเปกตรัมของแสงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงและการคำนวณมวลของดาวฤกษ์

1.1 โฟตอนความถี่  $f$  มีมวลอินเนอเซียลยังผล (effective inertial mass)  $m$  ซึ่งคิดได้จากค่าพลังงานของโฟตอน และเรากล่าวว่ามวลอินเนอเซียลมีค่าเท่ากับมวลโน้มถ่วง (gravitational mass) เมื่อเป็นดังนี้แล้ว โฟตอนที่ถูกส่งออกจากที่ตำแหน่งผิวดาวฤกษ์จะเสียพลังงานส่วนหนึ่งก่อนที่จะหลุดพ้นจากสนามโน้มถ่วงของดาวฤกษ์นั้น จงแสดงว่าการเปลี่ยนความถี่  $\Delta f$  ของโฟตอนเมื่อโฟตอนหลุดพ้นจากผิวดาวฤกษ์ไปที่ตำแหน่งอนันต์มีค่าเป็น

$$\frac{\Delta f}{f} = -\frac{GM}{Rc^2}$$

สำหรับ  $\Delta f \ll f$  ในเมื่อ

- $G$  = ค่าคงที่โน้มถ่วงสากล
- $R$  = รัศมีของดาวฤกษ์
- $c$  = ค่าความเร็วแสง
- $M$  = มวลของดาวฤกษ์

ดังนั้นถ้าเราทราบค่าการเลื่อนความถี่ของแสงไปทางปลายแดงของสเปกตรัมจากตำแหน่งที่อยู่ไกลจากดาว จะทำให้เราทราบค่า  $M/R$  และถ้าเราทราบค่า  $R$  เราหาค่ามวลค่า  $M$  ของดาวฤกษ์นั้นได้

1.2 ยานอวกาศที่ไม่มีคนอยู่ในยานถูกส่งไปที่ดาวฤกษ์ดวงหนึ่งเพื่อวัดมวล  $M$  และรัศมี  $R$  ของดาวดวงหนึ่งในแถบแก๊สของเรา ขณะที่ยานอวกาศเคลื่อนเข้าหาดาวที่วุ่นวายตามแนวรัศมี โฟตอนที่ถูกปลดปล่อยออกจากไอออน  $\text{He}^+$  บนผิวดาวถูกตรวจสอบด้วยการให้มีการกระตุ้นแบบเรโซแนนซ์ที่ไอออน  $\text{He}^+$  จึงเป็นลำในห้องทดสอบในยานอวกาศ การดูดกลืนแบบเรโซแนนซ์เกิดขึ้นเมื่อ  $\text{He}^+$  มีความเร็ววิ่งเข้าหาดาวเพื่อชดเชยกับการเลื่อนไปทางปลายแดงพอดีสั้นอัตราเร็ว ( $v = \beta c$ ) ของไอออน  $\text{He}^+$  ในยานอวกาศสัมผัสกับดาวในขณะที่เกิดการดูดกลืนแบบเรโซแนนซ์เป็นฟังก์ชันของระยะทาง  $d$  จากผิว (ใกล้สุด)



ของดาว ข้อมูลที่ได้จากการทดลองปรากฏอยู่ในตารางข้างล่าง ให้ใช้ข้อมูลนี้อย่างเต็มที่เพื่อหาค่ามวล  $M$  และรัศมี  $R$  ของดาวโดยวิธีเขียนกราฟ การประมาณค่าความคลาดเคลื่อนของคำตอบในกรณีไม่จำเป็น

### ข้อมูลการดูดกลืนแบบเรโซแนนซ์

ความเร็วของ $\text{He}^+$	$\beta = v/c$	3.352	3.279	3.195	3.077	2.995
ระยะทางจากผิวดาว	$d (10^8 \text{ m})$	38.90	19.98	13.32	8.99	6.67

1.3 เพื่อหาค่า  $R$  และ  $M$  ในการทดลองตามที่กล่าวมานี้ ตามปกติควรแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการตีบตัวถอยหลังของอะตอมที่ปล่อยโฟตอน (การเคลื่อนที่เนื่องจากความร้อน ทำให้เส้นสเปกตรัมของแสงส่งออกกว้างขึ้นเท่านั้น แต่ไม่มีการเลื่อนยอดความเข้มสูงสุด และถือได้ว่าได้รวมผลของความร้อนไว้แล้วจึงไม่ต้องนำมาคำนวณ)

1.3.1 ให้  $\Delta E$  เป็นผลต่างระหว่างระดับพลังงานของอะตอมเมื่ออะตอมอยู่นิ่งกับที่ในทุกกรณี สมมติว่าอะตอมที่อยู่นิ่งปล่อยโฟตอนแล้วถอยหลัง ให้หาสมการแบบสัมพัทธภาพที่แสดงค่าพลังงาน  $hf$  ของโฟตอนที่ถูกปล่อย โดยตีออกเป็นค่าของ  $\Delta E$  และ มวลนิ่ง  $m_0$  ของอะตอม

1.3.2 จากนั้นให้หาค่าตัวเลขโดยประมาณของการเลื่อนความถี่แบบสัมพัทธภาพ  $\left(\frac{\Delta f}{f}\right)_{\text{Recoil}}$

สำหรับกรณีไอออน  $\text{He}^+$

คำตอบของท่านควรมีค่าน้อยกว่า การเลื่อนไปทางปลายแดงเนื่องจากแรงโน้มถ่วง ที่คำนวณได้ใน 1.2 เป็นจำนวนมาก

### กำหนดให้

ความเร็วแสง  $c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$

พลังงานอยู่นิ่งของ  $\text{He}^+$  คือ  $m_0 c^2 = 4 \times 938 \text{ MeV}$

พลังงานอะตอมของโบห์ร  $E_n = -\frac{13.6Z^2}{n^2} \text{ eV}$



### ข้อ 2 การแผ่คลื่นเสียง

#### ความนำ

ความเร็วของเสียงในทะเลแปรไปตามความลึก อุณหภูมิ และความเค็มของน้ำทะเล รูป 26.2ก แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็วของเสียง  $c$  เทียบกับความลึก  $z$  ความเร็วที่น้อยที่สุด

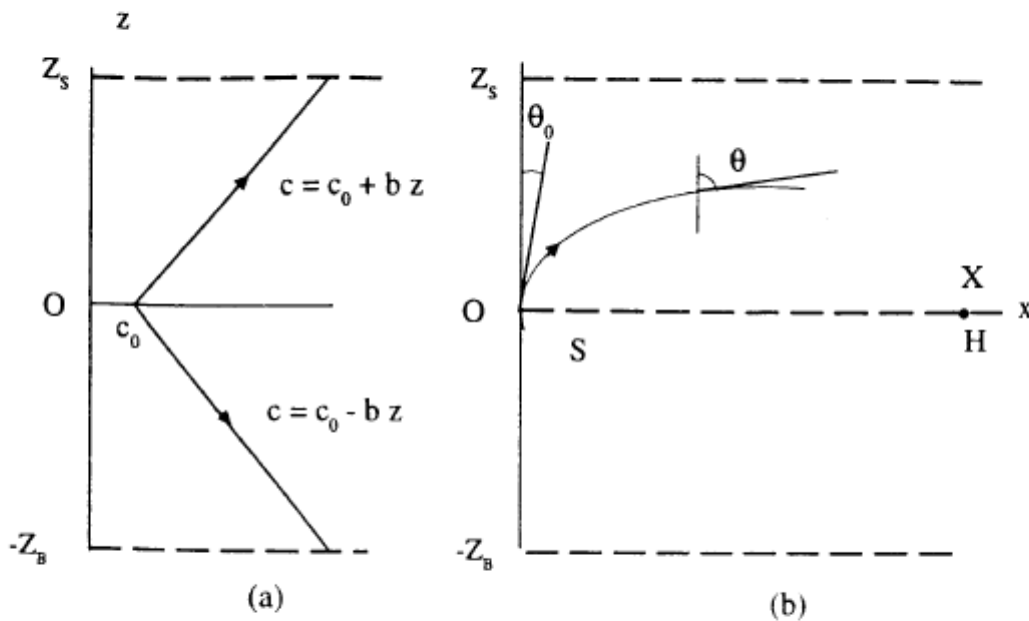
$c_0$  เกิดขึ้นที่จุดกึ่งกลางระหว่างผิวทะเลและท้องทะเล เพื่อความสะดวก เรากำหนดให้  $z = 0$  ที่ความลึกซึ่งความเร็วเสียงมีค่าน้อยที่สุด ให้  $z = z_s$  ที่ผิวทะเล และ  $z = z_b$  ที่ก้นทะเล เหนือ  $z = 0$  ค่าของ  $c$  เป็นไปตามสมการ

$$c = c_0 + bz$$

ใต้  $z = 0$  ค่าของ  $c$  เป็นไปตามสมการ

$$c = c_0 - bz$$

ในแต่ละกรณี  $b = \left| \frac{dc}{dz} \right|$  นั่นคือ  $b$  คือขนาดของอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามความลึก เราถือว่า  $b$  เป็นค่าคงที่



รูป 26.3

รูป 26.3 (ก) แสดงภาคตัดขวางของระนาบ  $z-x$  ของมหาสมุทร เมื่อ  $x$  เป็นระยะทางในแนวระดับ ที่ทุกจุดบนระนาบ  $z-x$  รูปแบบของความเร็วของเสียง  $c(z)$  เป็นดังรูป 26.3 (ก)

ที่ตำแหน่ง  $z = 0, x = 0$  มีแหล่งกำเนิดเสียง  $S$  ตั้งอยู่ เส้นทางบางส่วนของเสียงออกจากแหล่งกำเนิด  $S$  ทำมุม  $\theta_0$  ดังรูป 26.3 (ข) เนื่องจากความเร็วของเสียงเปลี่ยนตามค่า เส้นทางของลำแสงเสียงจะ ทำให้มุม  $\theta$  เปลี่ยนแปลงไปตามเส้นทางการเดินทางของเสียง





2.1 จงแสดงให้เห็นว่าเส้นทางของลำเสียงตั้งต้นที่ออกจากแหล่งกำเนิด  $S$  และอยู่ในระนาบ  $z-x$  เป็นอาร์คของวงกลมที่มีรัศมี  $R$  และ

$$R = \frac{c_0}{b \sin \theta_0} \quad \text{for} \quad 0 \leq \theta_0 \leq \frac{\pi}{2}$$

2.2 ให้หาสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $c_2$ ,  $c_0$  และ  $b$  ที่ทำให้มุม  $\theta_0$  มีค่าน้อยที่สุดสำหรับลำเสียงที่พุ่งขึ้นได้โดยไม่สะท้อนกลับ

2.3 รูป 26.3 (ข) แสดงตำแหน่งเครื่องรับเสียง  $S$  ซึ่งวาง ณ ตำแหน่ง  $z = 0$ ,  $x = X$  ให้หาสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $b$ ,  $c_0$  และ  $X$  สำหรับค่าต่าง ๆ ของ  $\theta_0$  สำหรับลำเสียงที่ออกจาก  $S$  ไปยังเครื่องรับ  $H$  โดยถือว่า  $z_s$  และ  $z_h$  มีขนาดโตมากพอที่จะไม่ทำให้เสียงสะท้อนจากผิวทะเลและท้องทะเล

1.4 ให้คำนวณค่าน้อยที่สุด 4 ค่า ของ  $\theta_0$  ที่ทำให้ลำเสียงที่ออกจาก  $S$  ไปยัง  $H$

$$X = 10,000 \text{ m}$$

$$c_0 = 1,500 \text{ m/s}$$

$$b = 0.0200 \text{ s}^{-1}$$

1.5 จงหาสมการเพื่อใช้คำนวณเวลาที่เสียงเดินทางจาก  $S$  ไปยัง  $H$  ไปตามเส้นทางของลำเสียง ซึ่งให้ค่า  $\theta_0$  น้อยที่สุด ตามที่คำนวณได้จาก 2.3 และให้คำนวณเวลาการเดินทางของเสียงตามเงื่อนไขที่ระบุใน 1.4

สูตรอินทิกรัลที่จำเป็นต้องใช้คือ

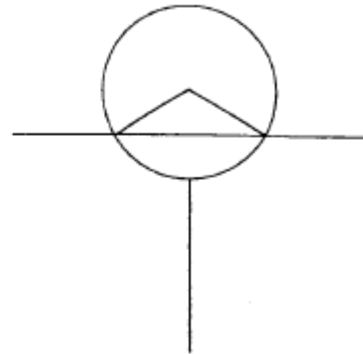
$$\int \frac{dx}{\sin x} = \ln \tan\left(\frac{x}{2}\right)$$

ให้คำนวณเวลาที่ลำเสียงที่พุ่งตรงจาก  $S$  ไปยัง  $H$  ตามเส้นทาง  $z = 0$  ระหว่างลำเสียงที่มี  $\theta_0 = \frac{\pi}{2}$  และ  $\theta_0$  ที่มีค่าน้อยที่สุดตามที่คำนวณได้ตาม 1.4 ลำเสียงอันไหนถึง  $H$  ก่อน

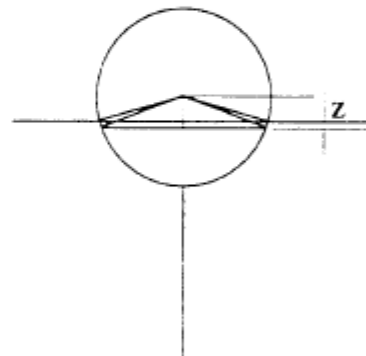


### ข้อ 3 ทุ่นลอยรูปทรงกระบอก

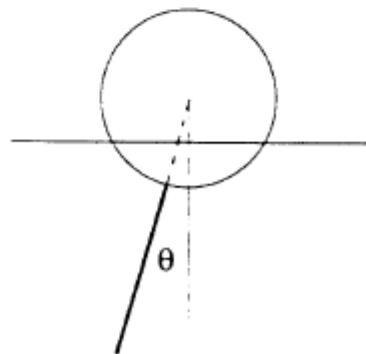
3.1 ทุ่นลอยประกอบด้วยลูกทรงกระบอกตัน รัศมี  $a$  ความยาว  $l$  ทำด้วยวัสดุเบาที่มีความหนาแน่นสม่ำเสมอ  $d$  และมีแท่งวัตถุเกร็งรูปสามเหลี่ยมติดตั้งอยู่ทางด้านล่างตรงจุดกึ่งกลางตามแนวความยาวของลูกทรงกระบอกพอดี มวลของแท่งวัตถุมีค่าเท่ากับมวลของลูกทรงกระบอก ความยาวของแท่งวัตถุมีค่าเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของลูกทรงกระบอก ความหนาแน่นของแท่งวัตถุมากกว่าความหนาแน่นของน้ำทะเล ทุ่นลอยที่วางนี้ลอยอยู่ในน้ำทะเลซึ่งมีความหนาแน่น  $\rho$  ในภาวะสมดุล ให้หาความสัมพันธ์ระหว่างมุมลอย  $\alpha$  (ดังรูป) และ  $d/\rho$  ไม่คิดปริมาตรของแท่งวัตถุซึ่งมีค่าน้อย



3.2 ถ้าทุ่นลอยถูกกดลงตามแนวตั้งเป็นระยะทางเล็กน้อย  $z$  จะทำให้มีแรงดันขึ้น ทำให้ระบบทุ่นลอยสั่นกระเพื่อมขึ้นลงตามแนวตั้งรอบตำแหน่งสมดุลเดิม ให้หาค่าความถี่ของการสั่นกระเพื่อมขึ้นลงเป็นฟังก์ชันของ  $\alpha$ ,  $g$  และ  $a$  ในที่นี้  $g$  คือค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง ให้ถือว่าอิทธิพลของการเคลื่อนที่ของน้ำที่มีต่อการเคลื่อนไหวของทุ่นลอยทำให้มวลยังผลของทุ่นลอยเพิ่มขึ้นหนึ่งในสาม และให้ถือว่า  $\alpha$  ไม่ใช่มุมเล็ก  $a$



3.3 โดยการประมาณว่าลูกทรงกระบอกแกว่งกวัดรอบแกนที่ผ่านจุดกึ่งกลางในแนวระดับ ให้หาความถี่ของการแกว่งกวัดอีกครั้งหนึ่ง เป็นฟังก์ชันของ  $g$  และ  $a$  ในกรณีนี้ไม่คิดการเคลื่อนไหวและการหนืดของน้ำ และให้ถือว่า การแกว่งกวัดกระทำในมุมเล็ก ๆ



รูป 26.7



3.5 ถ้าทุ่นลอยบรรจุเครื่องวัดความเร่งซึ่งสามารถวัดการเคลื่อนที่แบบกระเพื่อมในแนวตั้งและแบบแกว่งกวัดได้ แล้วส่งข้อมูลโดยวิทยุไปยังฝั่งได้ สัมพันธ์กับน้ำนิ่งการกระเพื่อมในแนวตั้งบันทึกได้ว่าคาบของการกระเพื่อมประมาณ 1 วินาที และคาบการแกว่งกวัดรอบแกนในแนวระดับประมาณ 1.5 วินาที จากข้อมูลนี้ ให้แสดงว่า มุมลอยมีค่าประมาณ  $90^\circ$  และให้คำนวณรัศมีของลูกทรงกระบอกของทุ่นลอย มวลทั้งหมดของระบบของทุ่นลอย

กำหนดให้ความยาวของลูกทรงกระบอกมีค่าเท่ากับ  $a$

( ท่านอาจใช้ค่า  $\rho = 1,000 \text{ kg m}^{-3}$  และ  $g = 9.8 \text{ m s}^{-2}$ )



## ภาคปฏิบัติ

### ข้อ 1. ความเร็วสุดท้ายในของเหลวหนืด

วัตถุที่ตกในของเหลวในที่สุดจะมีความเร็วคงที่ค่าหนึ่งเรียกว่าความเร็วสุดท้าย (terminal velocity) วัตถุประสงค์ของการทดลองนี้คือการวัดความเร็วสุดท้ายของวัตถุต่าง ๆ ที่ตกในกลีเซอริน

สำหรับลูกทรงกลมรัศมี  $r$  ที่ตกในของเหลวที่มีความหนืดด้วยค่าความเร็ว  $v$  ค่าแรง  $F$  จากความหนืดเป็นไปตามสมการ  $F = 6\pi\eta rv$  ในเมื่อ  $\eta$  เป็นค่าคุณสมบัติของของเหลวเรียกว่าความหนืด (viscosity) ในการทดลองนี้ท่านสามารถวัดความเร็วสุดท้ายของโลหะรูปทรงกระบอก (เนื่องจากการทำลูกทรงกระบอกง่ายกว่าการทำลูกทรงกลม) เส้นผ่าศูนย์กลางของลูกทรงกระบอกทุกอันเท่ากับค่าความยาวคือ  $2r$

และค่าแรงหนืดที่กระทำต่อลูกทรงกระบอกคือ

$$F_{Cyl} = 6\pi\kappa\eta r^m v$$

$\kappa = 1$  และ  $m = 1$  สำหรับลูกทรงกลม

ขั้นแรก คำนวณความเร็วสุดท้าย

ถ้า  $\rho$  เป็นความหนาแน่นของลูกทรงกระบอก และ  $\rho'$  เป็นความหนาแน่นของของเหลว ให้แสดงว่าความเร็วสุดท้ายของ  $v_T$  ของลูกทรงกระบอกมีค่าเป็น

$$v_T = Cr^{3-m}(\rho - \rho')$$

ในเมื่อ  $C$  คือค่าคงที่ และให้แจ้งค่า  $C$  เป็นฟังก์ชันของ  $\kappa$  และ  $\eta$

### การทดลอง

ให้ใช้เครื่องมือที่กำหนดให้ทำการทดลองเพื่อหาค่าตัวเลขของกำลัง  $m$  ในสมการข้างบน และค่าความหนาแน่นของกลีเซอริน

### หมายเหตุ

-เพื่อความถูกต้องสอดคล้อง พยายามปล่อยวัตถุให้ตกในลักษณะเดียวกัน โดยที่แกนของลูกทรงกระบอกอยู่ในแนวระดับ



-ความคลาดเคลื่อนของมิติความยาวของลูกทรงกระบอกเท่ากับ 0.05 mm ท่านไม่จำเป็นต้องวัดมิติของลูกทรงกระบอกเพราะกำหนดมาให้แล้ว

-ภายในกระบอกตวงมีตะแกรงทองเหลืองสำหรับให้ท่านใช้ในการเก็บลูกทรงกระบอกมาใช้ใหม่ ข้อควรระวัง ปรับตะแกรงให้เข้าที่ก่อนปล่อยวัตถุลงในกลีเซอริน ไม่เช่นนั้นแล้วท่านจะไม่สามารถนำลูกทรงกระบอกขึ้นมาทำการทดลองซ้ำได้

-เมื่อกลีเซอรินดูคุ่น้ำจากบรรยากาศจำทำให้ความหนืดลดลง ดังนั้นต้องทำการให้เป็นที่น่าใจว่า กระบอกตวงที่ใส่กลีเซอรินมีฝาพลาสติกที่ให้ไว้ปิดอยู่เสมอ

-อย่าให้ลูกทรงกระบอกขนาดต่าง ๆ และทรงกระบอกต่างชนิดกันปนภายหลังกการทดลอง

วัสดุ	ความหนาแน่น ( $\text{kg/m}^3$ )
อะลูมิเนียม	$2.70 \times 10^3$
ไททานเนียม	$4.54 \times 10^3$
สเตนเลสสตีล	$7.87 \times 10^3$
ทองแดง	$8.96 \times 10^3$

### อุปกรณ์

กระบอกตวงบันจุกลีเซอริน ขนาด 100 mL	1 กระบอก
ภาชนะบันจุกลีเซอรินสำหรับใส่เต็มในกระบอกตวง	1 อัน
นาฬิกาจับเวลาอิเล็กทรอนิกส์	1 เรือน
ไม้บันทึกขนาด 30 cm	1 อัน
ที่หนีบผ้าทำด้วยพลาสติก	1 อัน
ตะแกรงสำหรับเก็บลูกทรงกลมที่กั้นกระบอกตวง	1 อัน
ประคิ๊บ	1 อัน
ลูกทรงกลมอะลูมิเนียมเส้นผ่าศูนย์กลาง 10.00 mm	6 อัน
ลูกทรงกลมอะลูมิเนียมเส้นผ่าศูนย์กลาง 8.00 mm	6 อัน
ลูกทรงกลมอะลูมิเนียมเส้นผ่าศูนย์กลาง 5.00 mm	6 อัน
ลูกทรงกลมอะลูมิเนียมเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.00 mm	6 อัน
ลูกทรงกลมไททานเนียมเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.00 mm	6 อัน
ลูกทรงกลมสเตนเลสเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.00 mm	6 อัน
ลูกทรงกลมทองแดงเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.00 mm	6 อัน
กระดาษกราฟธรรมดา และกระดาษกราฟ log-log	



## ข้อ 2. การเลี้ยวเบนและการกระเจิงของแสงเลเซอร์

วัตถุประสงค์ของการทดลองนี้คือการแสดงและหาค่าต่างๆเกี่ยวกับการสะท้อนและการกระเจิงของแสงเลเซอร์จากแหล่งเลเซอร์ไดโอดเครื่องมือที่ใช้คือไม้บันทึกโลหะซึ่งทำหน้าที่เป็นเกรตติง กล้องเพอสเปกซ์บันจูน้ำนมละลายในน้ำและการดำเนินการวัดเกี่ยวกับการสะท้อนและการกระเจิง

### ตอนที่ 1.

วางไม้บันทึกโลหะยาว 150 มิลลิเมตรที่กำหนดมาให้ให้ส่วนที่ขจัดมันของไม้บันทึกตั้งฉากกับลำแสงเลเซอร์ลำแสงเลเซอร์จะส่งลงไปบนขีดมิลลิเมตรให้สังเกต "จุด" บนฉากที่ทำด้วยกระดาษขาว ซึ่งเป็นผลของปรากฏการณ์เลี้ยวเบนของแสงเลเซอร์

วัดตำแหน่งและระยะทางระหว่างจุดเหล่านี้เมื่อฉากอยู่ที่ระยะทางประมาณ 1.5 เมตรจากไม้บันทึกและให้ทำแผนผังการวางรูปแบบการติดตั้งเครื่องมือทดลองให้ชัดเจน

สูตรความสัมพันธ์ที่เป็นประโยชน์คือ

$$N\lambda = \pm h \sin\beta$$

ในเมื่อ  $N$  คือ อันดับจุดในรูปแบบการเลี้ยวเบน  
 $\lambda$  คือความยาวคลื่น  
 $h$  คือระยะห่างระหว่างขีดบนไม้บันทึก  
 $\beta$  คือมุมการเลี้ยวเบน

จากข้อมูลที่ได้จากการวัดของท่านให้หาความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์และความคลาดเคลื่อนของคำตอบ

### ตอนที่ 2

ให้วางกล้องเพอสเปกซ์ที่กำหนดให้ให้อยู่ระหว่างแสงเลเซอร์และฉากกระดาษขาวโดยวางกล้องในตำแหน่งที่ให้แสงเลเซอร์ตกกระทบในแนวตั้งฉากกับผนังกล้องโดยประมาณ

2.1 ให้สังเกตการลดค่าความเข้มของลำแสงที่พุ่งออกจากกล้องและคำนวณเปอร์เซ็นต์การลดค่าที่กล่าวมานี้ท่านสามารถใช้แผ่นกรองแสงที่มีค่าที่ทราบค่าเพื่อใช้เทียบค่าความเข้มของแสงที่ผ่านถึงเพอสเปกซ์ให้ตระหนักว่าตาของมนุษย์มีการตอบสนองต่อแสงในสเกล log การลดความเข้มในตอนแรกเกิดจากการสะท้อนแสงโดยจะมีการสูญเสียตรงชายแดนระหว่างอากาศและเพอสเปกซ์ซึ่งในกรณีที่ว่าแสงจะทะลุกล้องจะมีการลดค่า 4 ครั้ง สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงในกรณีการตกกระทบในแนวฉาก  $R$  เป็นไปตามสูตร



$$R = [(n_1 - n_2)/(n_1 + n_2)]^2$$

ในที่นี้  $n_1$  และ  $n_2$  เป็นค่าดัชนีหักเหก่อนและหลังกระทที่ผิวรอยต่อ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง  $T$  ที่เกิดขึ้นพร้อมกับการสะท้อนแสง เป็นไปตามสมการ

$$T = 1 - R$$

2.2 ถ้าถือว่าดัชนีหักเหของเพอสเพกซ์เท่ากับ และไม่คิดผลของการสะท้อนหลายครั้ง และการอาพันธ์ ให้คำนวณสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความเข้มของกล่องเพอสเพกซ์เปล่า ให้เปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้นี้กับการคำนวณใน 2.1

### ตอนที่ 3

โดยที่ไม่ต้องเคลื่อนย้ายกล่องเพอสเพกซ์ ให้ทำการทดลองและคำนวณค่าดังตอนที่ 2 ใหม่ แต่ในการทดลองคราวนี้ให้ใส่น้ำ 50 cc ลงไปในกล่องเพอสเพกซ์ ให้ถือว่าค่าดัชนีหักเหของน้ำเป็น 1.33

### ตอนที่ 4

4.1 เติมนม (วัตถุกระเจิงแสง หรือตัวกระเจิง) ปริมาตร 0.5 cc (ประมาณ 12 หยด) ลงไปในน้ำที่บันจอยู่ในกล่องเพอสเพกซ์ ให้วัดค่ามุมที่แสงกระเจิงออกจากแนวเดิมให้แม่นยำที่สุดเท่าที่จะกระทำได้ พร้อมทั้งให้วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำแสงที่ออกจากผิวกล่องด้านนอกสุด (โดยใช้จากรับ) ให้ตระหนักว่าปริมาณทั้งสองนี้มีความสัมพันธ์กัน ให้คำนวณการลดค่าความเข้มเนื่องจากการส่งผ่านแบบเดียวกันกับที่ได้พิจารณาในตอนต้น

4.2 เติมนมอีก 0.5 cc ลงในกล่องเพอสเพกซ์ ทำการทดลองซ้ำดังในข้อ 4.1

4.3 ทำการทดลองซ้ำดังในข้อ 4.2 เรื่อย ๆ ไปจนกระทั่งไม่สามารถสังเกตเห็นแสงเลเซอร์ที่ส่งผ่านหรือเห็นได้น้อยมาก

4.5 ให้หาความสัมพันธ์ระหว่างมุมกระเจิงและความเข้มข้นของนมในกล่อง

4.6 ให้ใช้ผลการทดลองของท่านและความสัมพันธ์

$$I = I_0 e^{-\mu z} = T_{milk} I_0$$



ในเมื่อ  $I_0$  คือความเข้มของแสงเลเซอร์ขาเข้า

$I$  คือค่าความเข้มของแสงเลเซอร์ขาออก

$z$  คือระยะทางภายในกล่อง

$\mu$  คือสัมประสิทธิ์การลดลงซึ่ง = ค่าคงที่  $\times C$  (ความเข้มข้นของนมในกล่อง)

$T_{\text{mik}}$  คือสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงผ่านนม

ให้คำนวณ  $\mu$  สำหรับตัวกระจิงที่มีความเข้มข้น 10%.

## อุปกรณ์

แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ไดโอด

ไม้บันทึกโลหะเพื่อใช้เป็นเกรตติง

กล่องเพอสเพกซ์สำหรับใส่น้ำและนมสำหรับการทดลองการสะท้อนและการกระเจิงของแสงเล

เซอร์

เทปวัดระยะทาง

ฉากกระดาษขาว

ไม้โปรแทรกเตอร์

แผ่นกรองแสงลดการส่งผ่าน(พร้อมทั้งค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน)

บีกเกอร์และเครื่องมือทำและปล่อยหยดของเหลว

ไม้กวน

กระดาษกราฟธรรมดาและกระดาษกราฟเซมิลอก