



ข้อที่ 1 (มี 3 ข้อย่อย) [10 คะแนน]

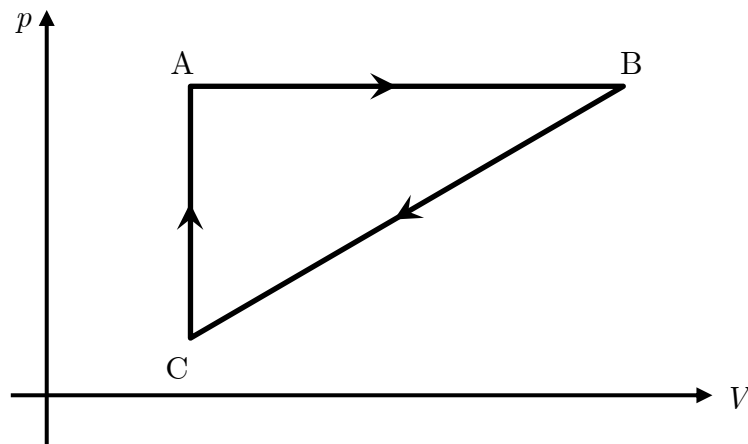
1.1 ดาวเคราะห์ชนก้อนหิน

[2 คะแนน]

ผู้สังเกตในกรอบอ้างอิงเฉื่อยหนึ่ง พบว่าก้อนหินมวล m ลอยนิ่งในอวกาศ ต่อมา มีดาวเคราะห์รัศมี R วิ่งเข้ามาชนตรง ๆ จากระยะไกล ด้วยอัตราเร็ว u ถ้าความเร่งโน้มถ่วงที่พื้นผิวดาวเคราะห์มีขนาดเท่ากับ g แล้วผู้สังเกตจะพบว่าก้อนหินมีอัตราเร็วเท่าใดขณะที่ชนกับพื้นผิวดาวเคราะห์ (ให้สมมติว่าดาวเคราะห์ดังกล่าวไม่มีชั้นบรรยากาศ และมวลของก้อนหินน้อยกว่าดาวเคราะห์มาก ๆ)

1.2 เครื่องจักรความร้อน

[5 คะแนน]



เครื่องจักรความร้อนประหลาดเครื่องหนึ่ง ทำงานตามแผนภาพความดัน-ปริมาตร (PV Diagram) ดังแสดงในรูปข้างบน เครื่องจักรดังกล่าวทำงานด้วยแก๊สอุดมคติแบบอะตอมเดี่ยว

1.2.1 (1.2 คะแนน) ช่วง AB, BC และ CA มีความร้อนเข้าหรือออกจากระบบ อธิบายเหตุผลประกอบด้วย

ถ้ากำหนดให้ (ข้อมูลสำหรับข้อ 1.2.2 ถึง 1.2.4)

- ที่จุด A เครื่องจักรมีความดัน 10 atm ปริมาตร 0.4 ลิตร และอุณหภูมิ 400 K
- อัตราส่วนระหว่างปริมาตรสูงสุดต่อปริมาตรต่ำสุด คือ 5:1
- อุณหภูมิต่ำสุดของเครื่องจักรคือ 300 K

1.2.2 (0.5 คะแนน) จงหาความดันต่ำสุดของเครื่องจักร

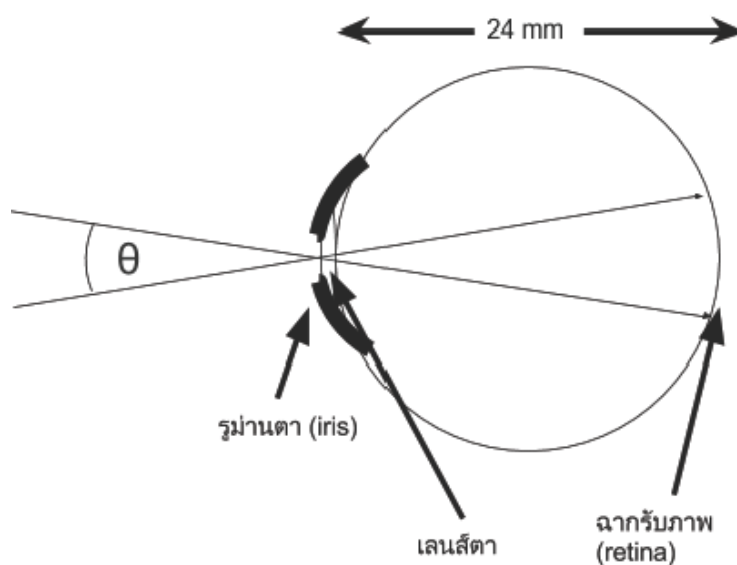
1.2.3 (1.8 คะแนน) จงหาประสิทธิภาพของเครื่องจักร

1.2.4 (1.5 คะแนน) กำหนดให้จุด A และ C คงที่ พบว่าถ้าเลื่อนจุด B ในแผนภาพความดัน-ปริมาตร ไปทางซ้ายหรือขวา โดยที่ความดันของจุด B ยังคงเท่าเดิม และปริมาตรของจุด B ยังคงมากกว่าจุด A แล้วประสิทธิภาพของเครื่องจักรจะเปลี่ยนไป จงหาประสิทธิภาพสูงสุดของเครื่องจักร

1.3 การมองเห็นภาพ

[3 คะแนน]

ในความสว่างปกติ รูม่านตาของมนุษย์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 mm และระยะห่างระหว่างรูม่านตาถึงฉากรับภาพ (เรตินา) คือ 24 mm ดังแสดงในรูป



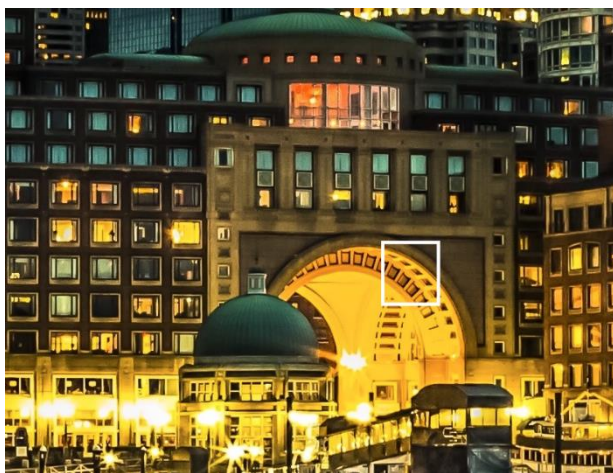
ในการมองจุดสองจุดที่อยู่ติดกัน ถ้าเรามองในระยะใกล้พอ จะเห็นเป็นภาพจุดสองจุดแยกจากกันชัดเจน หากมองในระยะไกลออกไป ภาพที่เห็นจะไม่ใช่จุดสองจุดที่แยกกันได้ชัดเจน แต่เห็นเป็นจุดเดียว

1.3.1 (1.0 คะแนน) จงหาขนาดเชิงมุม θ ที่เล็กที่สุดที่ตามมนุษย์สามารถแยกจุดสองจุดออกจากกันได้ (**angular resolution**) ที่เกิดจากขีดจำกัดการเลี้ยวเบนของแสง กำหนดให้ ความยาวคลื่นของแสงที่ใช้คือ 550 nm และระยะห่างระหว่างวัตถุกับตา มีขนาดมากกว่าขนาดของรูม่านตามาก ๆ

มนุษย์สามารถมองเห็นภาพได้เพราะแสงที่เข้าตาไปตกลงบน เซลล์รับแสง (cone cells) จำนวนมากที่อยู่บนเรตินา ถ้าระยะระหว่างกึ่งกลางของเซลล์รับแสงสองอันที่อยู่ติดกันคือ $1.0 \mu\text{m}$ และถ้าไม่คำนึงถึงการเลี้ยวเบนของแสง เราสามารถแยกจุดสองจุดออกจากกันได้ หากภาพจากแต่ละจุดนั้นตกลงบนเซลล์รับแสงต่างอันกัน

1.3.2 (1.0 คะแนน) จงหาค่า angular resolution ในกรณีนี้ (หาขนาดเชิงมุมที่เล็กที่สุด ที่ภาพจากแต่ละจุดตกลงบนเซลล์รับแสงแต่ละอันที่อยู่ติดกัน)

ในการแสดงผลบนจอภาพแบบดิจิทัล เช่น หน้าจอคอมพิวเตอร์ สามารถทำได้โดยการแสดงบนพิกเซลสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่เรียงต่อกันจำนวนมากบนหน้าจอ แม้ว่าพิกเซลแต่ละอันจะแสดงผลได้แค่สีเดียว แต่ภาพรวมทั้งหมดก็ดูต่อเนื่องคมชัดได้ถ้าตาของผู้สังเกตอยู่ห่างจากจอภาพในระยะที่เหมาะสม นั่นคือผู้สังเกตไม่สามารถแยก (resolve) พิกเซลสองอันที่อยู่ติดกันได้อย่างชัดเจน (ดูตัวอย่างในรูปด้านล่างซ้าย)



รูปสำหรับข้อ 1.3.4: รูปซ้าย แสดงถึงภาพแบบต่อเนื่องคมชัด ที่ตาเราไม่สามารถแยกพิกเซลได้ รูปขวา เมื่อเรามองภาพในระยะใกล้ เราจะสามารถแยก (resolve) แต่ละพิกเซลออกจากกันได้



1.3.3 (0.6 คะแนน) ถ้าหน้าจocomพิวเตอร์รุ่นหนึ่ง ถูกออกแบบมาเพื่อใช้ห่างจากลูกตาเป็นระยะ 30 cm ระยะระหว่างกึ่งกลางของพิกเซลสองอันที่อยู่ติดกันควรมีค่าเป็นอย่างไร ที่ทำให้ตาไม่สามารถ resolve ได้ เมื่อพิจารณาเฉพาะเงื่อนไขของแต่ละข้อ ดังนี้

(ก) พิจารณาเฉพาะขีดจำกัดการเลี้ยวเบนของแสง เท่านั้น (แบบข้อ 1.3.1)

(ข) พิจารณาเฉพาะขนาดของเซลล์รับแสง เท่านั้น (แบบข้อ 1.3.2)

1.3.4 (0.4 คะแนน) ถ้าพิจารณาทั้งสองเงื่อนไขในข้อ 1.3.3 แล้วยังต้องการมองเห็นภาพบนหน้าจอเป็นแบบคมชัดต่อเนื่องได้ ระยะระหว่างกึ่งกลางของพิกเซลสองอันที่อยู่ติดกันควรมีค่าอยู่ในช่วงใด

***** จบข้อ 1 *****



ข้อที่ 2 Mach-Zehnder Interferometer

[10 คะแนน]

ข้อมูลที่เป็นประโยชน์

- ค่าเฉลี่ยเชิงเวลา (Time average) ของฟังก์ชัน $f(t)$ ใด ๆ คือ $\frac{1}{T} \int_{t=0}^{t=T} f(t) dt$

$$\bullet \quad \frac{1}{T} \int_{t=0}^{t=2\pi/\omega} \cos^2(\omega t + \delta) dt = \frac{1}{T} \int_{t=0}^{t=2\pi/\omega} \sin^2(\omega t + \delta) dt = \frac{1}{2}$$

เมื่อ $T = \frac{2\pi}{\omega}$ และ ω และ δ เป็นค่าคงตัว

- เอกลักษณ์ตรีโกณมิติ:

$$\sin a \pm \sin b = 2 \sin\left(\frac{a \pm b}{2}\right) \cos\left(\frac{a \mp b}{2}\right)$$

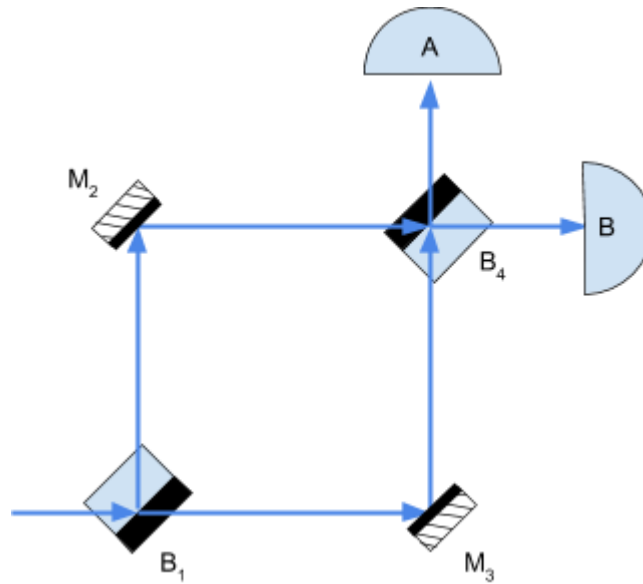
$$\sin(a+b) + \sin(a-b) = 2 \sin a \cos b$$

$$\sin(a+b) - \sin(a-b) = 2 \cos a \sin b$$

$$\cos^2 \theta - \sin^2 \theta = \cos 2\theta$$

Part I : พอร์ตมิดและพอร์ตสว่างของอุปกรณ์แทรกสอดมัคเซนเดอร์

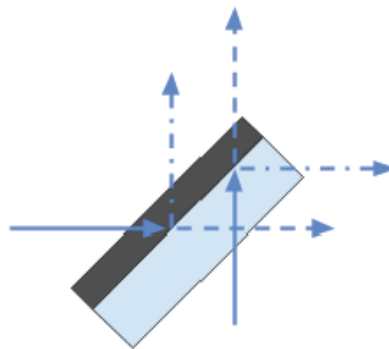
อุปกรณ์แทรกสอดมัคเซนเดอร์ (Mach-Zehnder Interferometer) มีลักษณะดังรูปที่ 2.1 เริ่มต้นจากการส่งแสงเลเซอร์ความยาวคลื่นเดียวเข้าไปทางตัวแยกแสง (beam splitter) B_1 จากนั้นแสงที่ถูกแยกออกจะเดินทางไปตามแต่ละเส้นทาง โดยเส้นทางหนึ่งไปสะท้อนที่กระจก M_2 และอีกเส้นทางหนึ่งไปสะท้อนที่กระจก M_3 ดังรูป แล้วไปรวมกันอีกครั้งหลังจากผ่านตัวแยกแสงตัวสุดท้าย (B_4) ไปยังตัวรับแสง (Photodiodes) A และ B ถ้าจัดให้ระยะทางจาก B_1 ถึง B_4 ทั้งสองเส้นทางมีขนาดเท่ากัน จะทำให้เกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันที่ตัวรับแสงตัวหนึ่ง (เราจะเรียกว่า พอร์ตสว่าง) และแบบหักล้างกันที่ตัวรับแสงอีกตัวหนึ่ง (เรียกว่า พอร์ตมิด)



รูปที่ 2.1: การจัดอุปกรณ์แทรกสอดมัคเซนเดอร์ เมื่อ B_1 และ B_4 เป็นตัวแยกแสง (beam splitter)

M_2 และ M_3 เป็นกระจกสะท้อนแสง และ A และ B เป็นตัวรับแสง (photodiode)

ตัวแยกแสง สามารถให้แสงส่วนหนึ่งทะลุผ่าน และจะสะท้อนแสงอีกส่วนหนึ่งออกไป ตัวแยกแสงจะมีวัสดุไดอิเล็กทริกเคลือบอยู่บนผิวแก้ว แสงที่เข้าสู่ตัวแยกแสง B_1 และ B_4 ในแต่ละทิศทาง จะสะท้อนที่รอยต่อระหว่างไดอิเล็กทริกกับแก้วเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2: ลักษณะการสะท้อนและทะลุผ่านของแสงที่เข้าสู่ตัวแยกแสง

กำหนดให้

ดรรชนีหักเห ของแก้ว (บริเวณสีอ่อนในรูปที่ 2.2) คือ n_G

ดรรชนีหักเห ของไดอิเล็กทริก (บริเวณสีเข้มในรูปที่ 2.2) คือ n_D

ดรรชนีหักเห ของอากาศ คือ n_0 โดยที่ $n_0 < n_D < n_G$

คำถามข้อที่ 2.1 จากการจัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 2.1

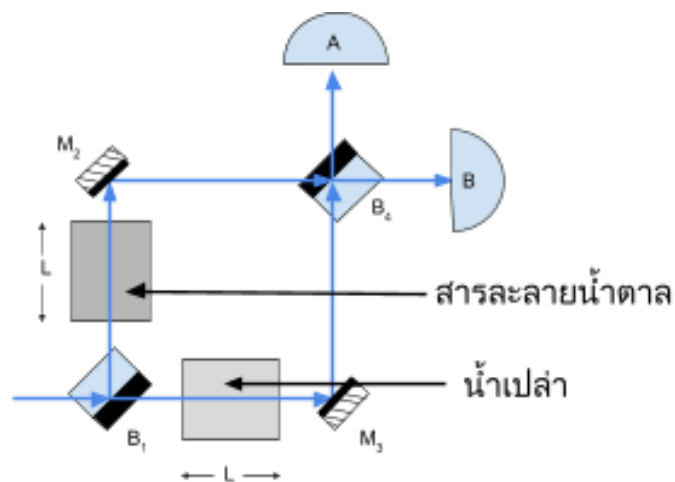
(1.0 คะแนน)

(2.1.1) ตัวรับแสง A เป็นพอร์ตมืด หรือเป็นพอร์ตสว่าง จงให้เหตุผล

(2.1.2) ตัวรับแสง B เป็นพอร์ตมืด หรือเป็นพอร์ตสว่าง จงให้เหตุผล

Part II : การใช้อุปกรณ์แทรกสอดมัคเซนเดอร์ เพื่อศึกษาความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาล

เราสามารถใช้อุปกรณ์แทรกสอดมัคเซนเดอร์ เพื่อศึกษาค่าความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลได้โดยวางภาชนะใส เช่น ท่อเล็ก ๆ ขนาดเท่ากัน (ความยาว $L = 1.0 \text{ cm}$) ลงไปแทรกระหว่างเส้นทางเดินของแสงแต่ละเส้นทาง ตามรูปที่ 2.3 ท่อหนึ่งมีน้ำเปล่าบรรจุอยู่ ส่วนอีกท่อหนึ่งมีสารละลายน้ำตาลบรรจุอยู่ (เราสามารถประมาณได้ว่า ความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลคงที่ตลอดทั้งท่อ) เมื่อค่อย ๆ เปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาล เราจะเริ่มเห็นความสว่างที่เปลี่ยนไปของตัวรับแสงที่ปลายทาง



รูปที่ 2.3: การจัดอุปกรณ์แทรกสอดมัคเซนเดอร์ สำหรับศึกษาความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาล
(สเกลในรูปไม่ถูกต้อง)

กำหนดให้ ดรรชนีหักเหของสารละลายน้ำตาล n เป็นฟังก์ชันของความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาล h ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$n = 1.33 + \rho h \quad (\text{สำหรับ } h \text{ ที่มีค่าในช่วง } 0 \text{ ถึง } 0.01)$$

เมื่อ $\rho = 0.146$ และ $h = M_{\text{sugar}} / M_{\text{water}}$ โดยที่ M_{sugar} และ M_{water} คือมวลของน้ำตาลและมวลของน้ำที่อยู่ในสารละลายน้ำตาล ตามลำดับ



คำถามข้อที่ 2.2

(2.0 คะแนน)

จงหาว่าความเข้มชั้นของสารละลายน้ำตาล h ต้องเปลี่ยนไปเท่าไร เพื่อให้ความสว่างบนตัวรับแสงตัวหนึ่งเปลี่ยนไป 1 ริ้ว (fringe) (นั่นคือ เปลี่ยนจากมืดไปเป็นมืดอีกครั้ง หรือ จากสว่างไปเป็นสว่างอีกครั้ง)

กำหนดให้ แสงที่ใช้มีความยาวคลื่นในสุญญากาศ $\lambda_0 = 550 \text{ nm}$

Part III : ความเข้มแสงที่พอร์ตสว่าง

ต่อไปนี้จะพิจารณาเฉพาะแสงที่ตกบนพอร์ตสว่างเพียงพอร์ตเดียว (A หรือ B ตามคำตอบที่นักเรียนเลือกในคำถามข้อที่ 2.1)

สถานการณ์ที่ 1: พิจารณาเฉพาะแสงจากเส้นทางที่หนึ่ง (เส้นทางที่ผ่านท่อน้ำเปล่า) มาถึงพอร์ตสว่าง

ถ้าพิจารณาเฉพาะแสงที่ผ่านท่อน้ำเปล่า (แสงอีกเส้นทางหนึ่งถูกบังไว้ก่อน) พบว่าเมื่อแสงเดินทางมาถึงตัวรับแสงที่เป็นพอร์ตสว่าง สนามไฟฟ้าของแสงนั้นสามารถบรรยายได้ดังนี้

$$E(t) = E_0 \sin \omega t$$

โดยที่ ω คือความถี่เชิงมุมของแสงที่ใช้ในการทดลอง และ E_0 คือแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าที่มาถึงตัวรับแสง

ถ้าพิจารณาในแง่ของความเข้มแสง ความเข้มแสงที่มาถึงตัวรับแสงจะเขียนได้เป็น

$$I(t) = I_0 \sin^2 \omega t$$

โดยที่ I_0 คือความเข้มแสงสูงสุดของแสงในเส้นทางที่หนึ่งที่มาถึงตัวรับแสง และแปรผันโดยตรงกับ $|E_0|^2$

การใช้เครื่องมือวัดความเข้มแสงที่มาถึงตัวรับแสง จะเป็นการวัดค่าความเข้มแสงเฉลี่ยเชิงเวลาในหนึ่งคาบ (Time average) $\bar{I}$

คำถามข้อที่ 2.3

(0.5 คะแนน)

จงเขียนความเข้มแสงเฉลี่ย $\bar{I}$ ในรูปของ I_0 เมื่อมีเฉพาะแสงจากเส้นทางที่หนึ่งเท่านั้น

**สถานการณ์ที่ 2: พิจารณาแสงจากทั้งสองเส้นทาง มาถึงพอร์ตสว่าง**

เส้นทางที่หนึ่งคือเส้นทางที่แสงผ่านท่อน้ำเปล่า ส่วนเส้นทางที่สองคือเส้นทางที่แสงเดินทางผ่านท่อที่บรรจุสารละลายน้ำตาลความเข้มข้น h (ทำให้มีค่าดัชนีหักเห n) ท่อทั้งสองอันมีความยาว L เท่ากัน

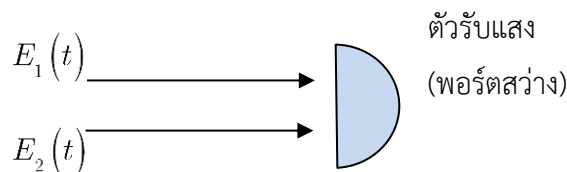
กำหนดให้ แสงที่เดินทางในเส้นทางที่หนึ่ง (ผ่านท่อน้ำเปล่า) เมื่อมาถึงตัวรับแสง มีสนามไฟฟ้าเป็น

$$E_1(t) = E_0 \sin \omega t$$

แสงที่เดินทางในเส้นทางที่สอง (ผ่านท่อสารละลายน้ำตาล) เมื่อมาถึงตัวรับแสง มีสนามไฟฟ้าเป็น

$$E_2(t) = E_0 \sin \omega t + \phi$$

ดังรูปที่ 2.4 และกำหนดให้ แสงทั้งสองเส้นทางเมื่อมาถึงตัวรับแสงมีแอมพลิจูดเป็น E_0 เท่ากัน และสนามไฟฟ้ารวมที่เข้าสู่ตัวรับแสงที่เป็นพอร์ตสว่าง เกิดจากผลรวมของสนามไฟฟ้าของแสงจากเส้นทางทั้งสอง



รูปที่ 2.4 สนามไฟฟ้าจากแสงทั้งสองเส้นทาง มารวมกันที่ตัวรับแสง

คำถามข้อที่ 2.4**(2.0 คะแนน)**

(2.4.1) จงหาค่า ϕ ในรูปของตัวแปรที่โจทย์กำหนดให้

(2.4.2) ความเข้มแสงเฉลี่ยที่เข้าสู่ตัวรับแสงที่เป็นพอร์ตสว่าง ในอุปกรณ์แทรกสอดมิกเชนเดอร์ สามารถเขียน

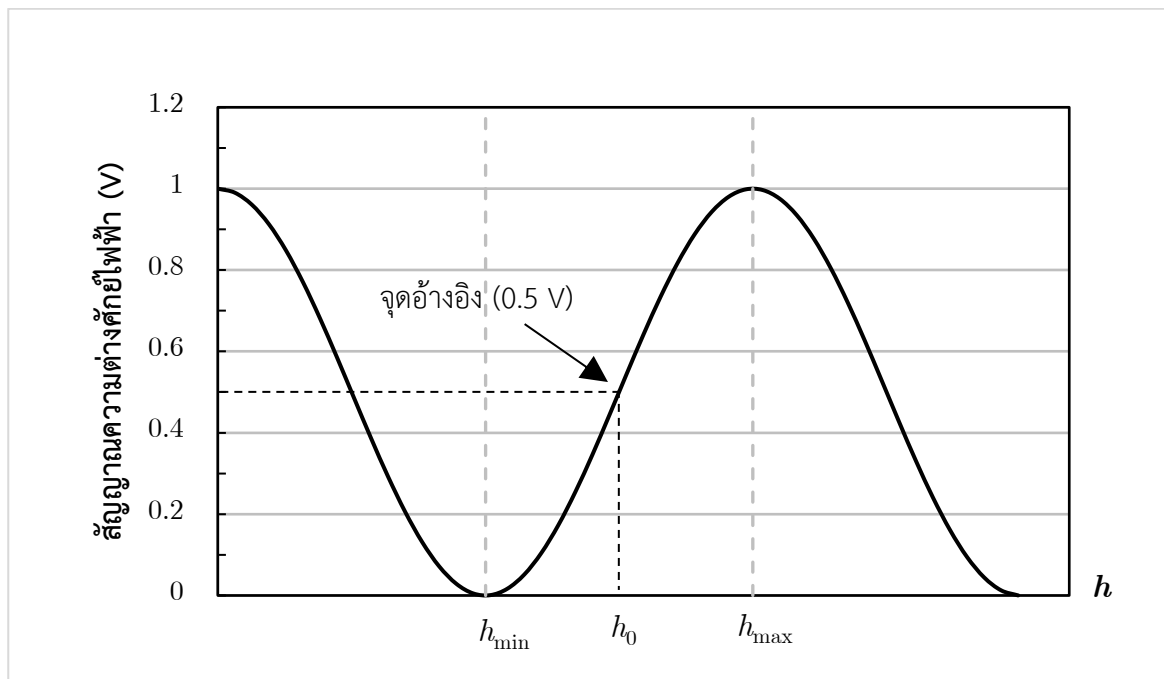
ได้เป็น $\bar{I}_{\text{total}} = \alpha I_0 \cos^2 \beta h$ จงหา α และ β ในรูปของตัวแปรที่กำหนดให้ในโจทย์

ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ความเข้มแสงเฉลี่ยที่เข้าสู่ตัวรับแสงที่เป็นพอร์ตสว่างนั้นจะขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาล

Part IV : การนำอุปกรณ์แทรกสอดไปควบคุมความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาล

เมื่อมีแสงเข้าสู่ตัวรับแสงที่เป็นพอร์ตสว่าง ตัวรับแสงจะเปลี่ยนพลังงานแสงเป็น สัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้า (voltage output) ที่เราสามารถตรวจวัดได้ (เช่น ใช้โวลต์มิเตอร์) ในการทดลองนี้สัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าแปรผันโดยตรงกับความเข้มแสงเฉลี่ยที่ตกลงบนตัวรับแสง $V \propto \bar{I}$ โดยที่สำหรับการทดลองนี้ ตอนที่ความเข้มแสงเฉลี่ยที่เข้าสู่ตัวรับแสงมีค่าสูงสุดเป็น $\bar{I} = 10 \text{ mW/cm}^2$ ตัวรับแสงจะให้สัญญาณไฟฟ้าขนาดสูงสุดเท่ากับ 1.0 V ออกมา

นอกจากนี้แล้ว ในการทดลองนี้ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากตัวรับแสงจะเปลี่ยนไปตามปริมาณความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาล h และมีลักษณะดังกราฟในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5: กราฟระหว่าง ความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาล กับ สัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าจากตัวรับแสง

การที่ค่าความต่างศักย์ขึ้นกับค่าความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาล ทำให้เราสามารถประยุกต์ใช้อุปกรณ์แทรกสอดมัลติเซนเดอร์ควบคุมความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลในสายการผลิตให้คงที่ที่ค่าหนึ่งได้ จากรูปที่ 2.5 เมื่อค่าความเข้มข้นของสารละลายเท่ากับ h_0 สัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าของตัวรับแสงจะเท่ากับ 0.5 V เมื่อความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลลดลงแต่ยังไม่น้อยกว่า $h_{\min}$ ความต่างศักย์ไฟฟ้าก็จะมีค่าลดลง ในทางกลับกัน เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นแต่ไม่มากกว่า $h_{\max}$ ความต่างศักย์ไฟฟ้าก็จะมีค่ามากขึ้น ดังนั้น เมื่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของตัวรับแสงต่างไปจากค่าความต่างศักย์อ้างอิง เราจะได้รู้ได้ว่าความเข้มข้นของสารละลายเปลี่ยนไป และสามารถปรับค่าความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลจนกว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของตัวรับแสงจะเท่ากับค่าอ้างอิง



คำถามข้อที่ 2.5

(1.5 คะแนน)

จากกราฟในรูปที่ 2.5 เราต้องการควบคุมค่าความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลให้เป็น h_0 (ค่าอ้างอิง) ซึ่งตรงกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.5 V แต่ถ้าพบว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้เป็น 0.6 V

(2.5.1) จงหาค่า h ต่างจากค่าอ้างอิงอยู่เท่าไร

(2.5.2) และดังนั้น ถ้าต้องการให้ความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลกลับมาเท่ากับค่าอ้างอิง เราควรเติมน้ำ หรือ เติมน้ำตาล

Part V : ปัญหาของการใช้อุปกรณ์ในกรณีที่แหล่งกำเนิดแสงเกิดการผันผวน

ในทางปฏิบัติ แม้ว่าความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลจะคงที่ แต่ถ้าความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสงเกิดการผันผวน ความต่างศักย์ไฟฟ้าของตัวรับแสงก็จะเปลี่ยนไปได้

จากการทดลองใน Part IV ตอนที่แหล่งกำเนิดแสงยังเป็นปกติไม่ผันผวน เมื่อความเข้มแสงเฉลี่ยที่เข้าสู่ตัวรับแสงที่เป็นฟอโตสว้าง มีค่าสูงสุดเป็น 10 mW/cm^2 ตัวรับแสงจะให้สัญญาณไฟฟ้าสูงสุดขนาด 1.0 V และผลการทดลองเป็นไปตามกราฟในรูปที่ 2.5

คำถามข้อที่ 2.6

(1.5 คะแนน)

ถ้าแหล่งกำเนิดแสงเกิดการผันผวน จนทำให้ความเข้มแสงเฉลี่ยที่ตกบนตัวรับแสงที่เป็นฟอโตสว้าง มีค่าสูงสุดเปลี่ยนเป็น 11 mW/cm^2 (แทนที่จะเป็น 10 mW/cm^2)

(2.6.1) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาล จะเปลี่ยนไปเป็นอย่างไร เมื่อเทียบกับกราฟในรูป 2.5 จงวาดรูปกราฟลงในกระดาษคำตอบ

(2.6.2) ถ้าสารละลายน้ำตาลในท่อมมีค่าคงที่ (เท่ากับค่าอ้างอิง h_0) ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้ในกรณีนี้ จะเป็นเท่าไร

(2.6.3) ผู้ทดลองไม่สามารถรู้ได้ว่าแหล่งกำเนิดแสงเกิดความผันผวนอยู่ เขาเพียงอ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ตามข้อ 2.6.2 เท่านั้น เขาจะตีความว่าความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาล มากกว่าหรือน้อยกว่าค่าอ้างอิงอยู่เท่าใด



เพื่อจะแก้ปัญหาคำถามเข้าใจผิดอันเนื่องมาจากความผันผวนของแสงจากแหล่งกำเนิดแสง เราสามารถใช้ตัวรับแสงสองตัว คือทั้งพอร์ตมืดและพอร์ตสว่าง ดังรูปที่ 2.1 แล้วนำความเข้มแสงเฉลี่ยที่ได้จากตัวรับแสงทั้งสอง I_A และ I_B มาคำนวณ ดังนี้

$$I' = \frac{I_A - I_B}{I_A + I_B} = \cos x$$

คำถามข้อที่ 2.7

(1.5 คะแนน)

จงหาค่า x ในรูปของตัวแปรที่กำหนดให้

จะเห็นว่า I' ไม่ขึ้นกับความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสง แต่จะขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลเท่านั้น เราจึงสามารถใช้ควบคุมความเข้มข้นของสารละลายได้ดีกว่า

***** จบข้อ 2 *****



ข้อ 3. สนามแม่เหล็กในเครื่องเร่งอนุภาค

[10 คะแนน]

เครื่องเร่งอนุภาค (particle accelerator) คือเครื่องมือที่เร่งให้อนุภาคมีความเร็วและมีพลังงานสูง ซึ่งถูกนำไปใช้ประโยชน์หลายอย่างทั้งทางด้านการวิจัยวิทยาศาสตร์พื้นฐาน ด้านการแพทย์และด้านอุตสาหกรรม ส่วนประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งสำหรับเครื่องเร่งอนุภาคคืออุปกรณ์สำหรับบังคับทิศทางและโฟกัสลำอนุภาค

เพื่อให้นักเรียนเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับอุปกรณ์นี้ในเครื่องเร่งอนุภาค เราจะศึกษาแบบจำลองอย่างง่ายของอุปกรณ์เหล่านี้ซึ่งใช้หลักการทางฟิสิกส์เดียวกันกับอุปกรณ์จริง และเราจะศึกษาเครื่องเร่งอนุภาคจำลองสำหรับอนุภาคโปรตอนที่มีความเร็วไม่สูงมากนัก นักเรียนไม่ต้องคำนึงถึงผลจากทฤษฎีสัมพัทธภาพ ไม่ต้องคำนึงถึงผลจากแรงโน้มถ่วงและไม่ต้องคำนึงถึงผลจากสนามแม่เหล็กโลก

กำหนดให้ อนุภาคโปรตอนมีมวล $1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$

Magnetic permeability: $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$

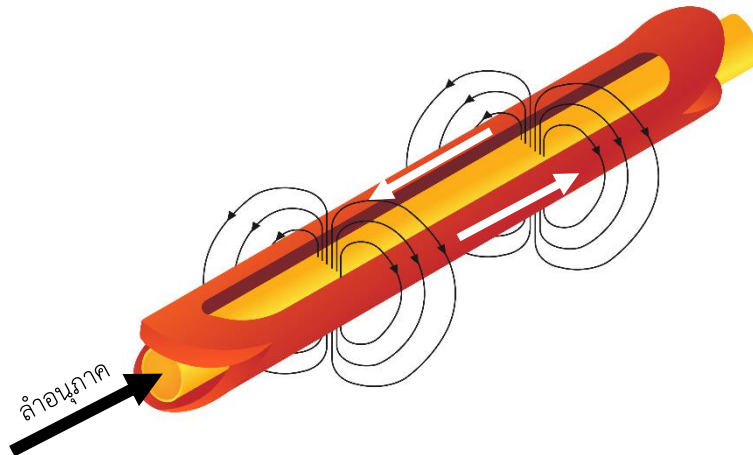
Electric permittivity: $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \text{m}^{-2}$

Part A: สนามแม่เหล็ก 2 ขั้ว (Magnetic Dipole) (2.7 คะแนน)

อนุภาคโปรตอนในลำอนุภาค มีพลังงานจลน์ $E_k = 4.0 \text{ MeV}$ โดยที่ $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$

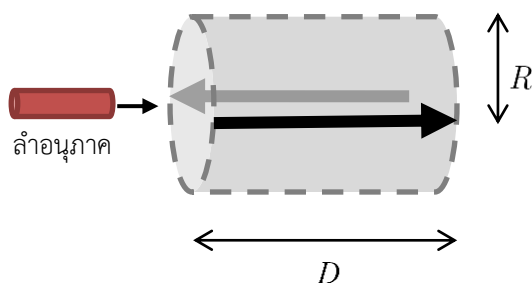
A.1 (0.2 คะแนน) จงหาอัตราเร็วของโปรตอน v ในหน่วยเมตรต่อวินาที

ในการบังคับทิศทางของลำอนุภาคนั้น เราใช้สนามแม่เหล็ก 2 ขั้ว หรือ Magnetic Dipole จากกระแสไฟฟ้าที่ไหลในเส้นลวดนำกระแสไฟฟ้าจำนวนหลายเส้นที่วางตัวในแนวขนานไปกับลำของอนุภาค ดังรูปที่ 3.1 ตรงกลางระหว่างเส้นลวดเป็นท่อสุญญากาศทรงกระบอกสำหรับให้ลำอนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน เส้นลวดกระแสแบ่งออกเป็น 2 ซีก นำไฟฟ้าในทิศทางตรงข้ามกัน ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กบริเวณตรงกลางทรงกระบอกซึ่งค่อนข้างมีความสม่ำเสมอ ลำอนุภาคเคลื่อนที่ตัดฉากกับสนามแม่เหล็กที่กลางกระบอก

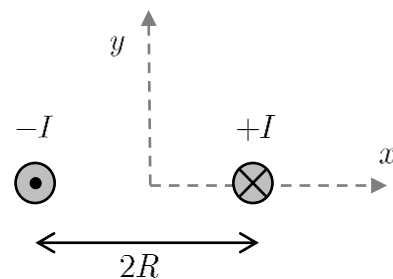


รูปที่ 3.1 Magnetic Dipole สร้างจากกระแสไฟฟ้า (ลูกศรสีขาว) ที่ไหลสวนทางกัน

ในการศึกษานี้ เราจะใช้แบบจำลองอย่างง่ายดังรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3 แบบจำลองประกอบด้วยเส้นลวดยาว D จำนวน 2 เส้นที่ขนานกันและมีกระแส I ไหลในทิศทางตรงกันข้าม (กระแส I นี้เทียบเท่ากับกระแสรวมในเส้นลวดทั้งหมดในแต่ละซีกของรูปที่ 3.1) ท่อตรงกลางมีรัศมี R และรัศมีของเส้นลวดเล็กมากเมื่อเทียบกับ R นักเรียนไม่ต้องคำนึงถึงกระแสไฟฟ้าบริเวณหัวและท้ายในการคำนวณหาสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 3.2 แบบจำลองอย่างง่ายของ Magnetic Dipole โดยที่ $D \gg R$ (สเกลของรูปไม่ถูกต้อง)



รูปที่ 3.3 หน้าตัดของแบบจำลอง Magnetic Dipole รัศมีของลวดเล็กมากเมื่อเทียบกับ R

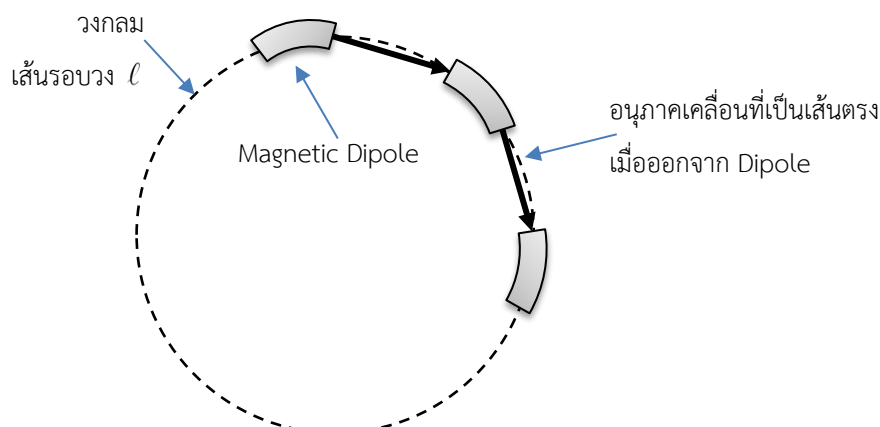
A.2 (0.9 คะแนน) สนามแม่เหล็กบนแกน x ภายในทรงกระบอกสามารถประมาณให้อยู่ในรูปของ

$$B(x) \approx \frac{\mu_0 I}{2R} \left(k_0 + k_1 \frac{x}{R} + k_2 \frac{x^2}{R^2} \right) \text{ เมื่อ } x \ll R \text{ โดยที่ } k_0, k_1 \text{ และ } k_2 \text{ เป็นค่าคงตัว จงระบุทิศของ}$$

สนามแม่เหล็กบนจุดที่อยู่บนแกน x พร้อมหาค่า k_0 , k_1 และ k_2

นักเรียนอาจใช้การประมาณ $1 + \beta^n \approx 1 + n\beta + \frac{n(n-1)}{2}\beta^2$ เมื่อ $\beta \ll 1$

ในความเป็นจริงนั้นอุปกรณ์ Magnetic Dipole มีความโค้งที่สอดคล้องกับความโค้งของการเคลื่อนที่ของลำอนุภาคภายในไดโพล เพื่อรักษาให้ลำอนุภาคอยู่ตรงกลางตลอดเวลา แต่ความโค้งนี้ไม่ส่งผลต่อการคำนวณสนามแม่เหล็กภายในไดโพล ในเครื่องเร่งอนุภาคจำลองขึ้นหนึ่ง มีการติดตั้ง Magnetic Dipole จำนวน N ชิ้นที่ระยะห่างเท่า ๆ กัน ตามเส้นทางการเคลื่อนที่ของลำอนุภาคที่คล้ายวงกลมความยาวเส้นรอบวงประมาณ ℓ ดังรูปที่ 3.4 และเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ออกมาจาก Magnetic Dipole แล้วมันจะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง



รูปที่ 3.4 การติดตั้ง Magnetic Dipole ซึ่งมีทั้งหมด N ชิ้น ในรูปนี้วาดแสดงเป็นตัวอย่างเพียง 3 ชิ้น

ผลที่ได้ในข้อ A.2 บ่งบอกว่าสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงน้อยที่บริเวณ $x \ll R$ ดังนั้นให้นักเรียนใช้ $k_0 \frac{\mu_0 I}{2R}$ เป็นค่าของสนามแม่เหล็กที่ลำอนุภาคเคลื่อนที่ผ่านภายใน Dipole (ในกรณีที่นักเรียนไม่สามารถคำนวณหาค่า k_0 ในข้อ A.2 ได้ ให้นักเรียนสมมุติค่า $k_0 = 1.0$ สำหรับการคำนวณในข้อ A.3 และ A.4)

A.3 (1.4 คะแนน) จงหาว่ากระแส I ต้องมีค่าเท่าใด จึงจะทำให้ลำอนุภาคเคลื่อนที่รอบเครื่องเร่งอนุภาคได้พอดี กำหนดให้โปรตอนแต่ละตัวมีมวล m ประจุ q อัตราเร็ว v และนักเรียนไม่ต้องคำนึงถึงแรงระหว่างอนุภาคด้วยตัวเอง

A.4 (0.2 คะแนน) กำหนดให้ความยาวของลวดนำกระแสไฟฟ้า $D = 2.0$ m, รัศมีทรงกระบอกสุญญากาศ $R = 5.0$ cm, จำนวน Magnetic Dipole $N = 10$ และความยาวของเส้นรอบวงของวงแหวน $\ell = 400$ m จงหาค่าของ I ในหน่วยแอมแปร์ (นักเรียนอาจไม่ได้ใช้ตัวแปรทุกตัว)

หมายเหตุ: เราจำลองให้อนุภาคมีพลังงานจลน์น้อย จึงทำให้กระแสไฟฟ้าที่คำนวณได้มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับเครื่องเร่งอนุภาคจริง



Part B: การกระจายออกของลำอนุภาค (2.2 คะแนน)

แม้ไม่มีแรงภายนอกมากกระทำ ลำอนุภาคจะกระจายออกเนื่องจากแรงกระทำระหว่างอนุภาคด้วยกันเอง ให้นักเรียนพิจารณาการเคลื่อนที่ของลำอนุภาคในบริเวณที่เป็นเส้นตรงที่ไม่มี Magnetic Dipole ให้สมมติว่าลำอนุภาคโปรตอนมีความยาว τ มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกรัศมี r โดยที่ $r \ll R$ และ $r \ll \tau$ ให้การเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นในแนวรัศมีเท่านั้น

B.1 (1.8 คะแนน) กำหนดให้ลำอนุภาคเริ่มเคลื่อนที่จากตำแหน่ง $z = 0$ โดยมีความเร็วในแนวแกน z คงตัวเท่ากับ v ในลำอนุภาคมีโปรตอนจำนวน n อนุภาคกระจายอย่างสม่ำเสมอ รัศมีเริ่มต้นของลำอนุภาคเท่ากับ r_0 จงหาแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าและแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็ก แล้วหาความเร่ง a_0 ในแนวรัศมี ของอนุภาคที่ขอบของลำอนุภาคที่ตำแหน่งเริ่มต้น

B.2 (0.4 คะแนน) รัศมีของลำอนุภาคจะเปลี่ยนโดยประมาณไปตามสมการ $r = r_0 + \alpha z^2$ สำหรับตำแหน่ง

$z \ll \frac{1}{\sqrt{\alpha}}$ จงหาความสัมพันธ์ระหว่าง α , a_0 และ v แล้วคำนวณค่า α เป็นตัวเลข

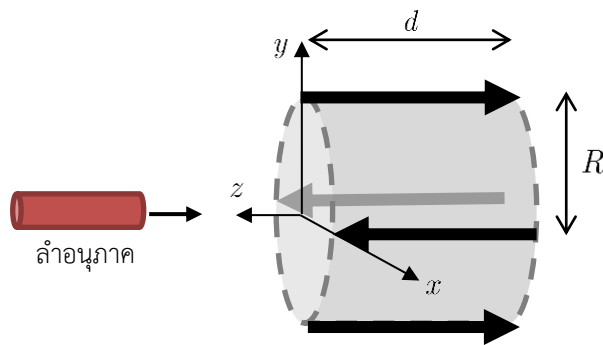
กำหนดให้ $n = 10^6$, พลังงานจลน์ของอนุภาค $E_k = 4.0$ MeV, รัศมีเริ่มต้น $r_0 = 1.0$ mm

ความยาวของลำอนุภาค $\tau = 30$ cm

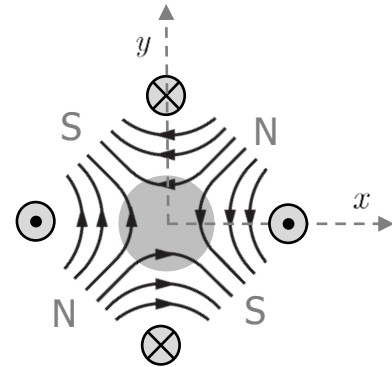
หมายเหตุ: สำหรับลำอนุภาคที่มีความเร็วสูงมากใกล้ความเร็วแสง การกระจายของลำอนุภาคจะเกิดจากสาเหตุอื่นเป็นหลัก

Part C: การโฟกัสลำอนุภาค (5.1 คะแนน)

การกระจายออกของลำอนุภาคทำให้ต้องมีอุปกรณ์สำหรับโฟกัสลำอนุภาคให้มีขนาดเล็กและไม่กระจายออกจากกัน อุปกรณ์นี้ทำหน้าที่คล้ายกับเลนส์ในทางทัศนศาสตร์ รูปแบบหนึ่งของอุปกรณ์ประเภทนี้คือ Magnetic Quadrupole ซึ่งมีแบบจำลองอย่างง่ายแสดงในรูปที่ 3.5 และ 3.6 โดยในแบบจำลองนี้ระนาบ xy เป็นระนาบของ Magnetic Quadrupole และมีเส้นลวดจำนวน 4 เส้น ที่มีกระแสไหลไปทาง $-z$ จำนวนสองเส้น และไหลไปทาง $+z$ จำนวนสองเส้น ขนาดของกระแสไฟฟ้าในแต่ละเส้นเท่ากับ I ระยะระหว่างเส้นลวดที่มีกระแสไหลทิศเดียวกันเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอก $2R$ เส้นลวดมีความยาว $d \gg R$ และรัศมีของเส้นลวดมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับ R สนามแม่เหล็กตรงกลางทรงกระบอกเสมือนมาจากขั้วแม่เหล็กจำนวน 4 ขั้ว โดยที่ขั้วเหมือนกันถูกวางอยู่ตรงข้ามกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 แบบจำลอง Magnetic Quadrupole เมื่อมอง
ด้านข้าง โดยที่ $d \gg R$ (สเกลของรูปไม่ถูกต้อง)



รูปที่ 3.6 หน้าตัดของ Magnetic
Quadrupole แสดงการไหลของ
กระแสไฟฟ้าที่สร้างสนามแม่เหล็ก วงกลม
บริเวณตรงกลางคือพื้นที่หน้าตัดของลำ
อนุภาค (สเกลของรูปไม่ถูกต้อง)

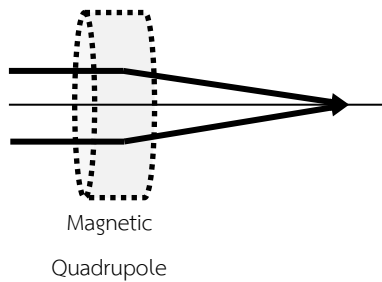
ลำอนุภาคเคลื่อนที่เข้าที่จุดศูนย์กลางของเส้นลวดทั้ง 4 เส้นโดยแกนกลางของลำอนุภาคซ้อนทับกับ
แกนกลางของ Magnetic Quadrupole สนามแม่เหล็กบริเวณใกล้ ๆ แกนกลางของ Magnetic Quadrupole
เท่ากับ

$$\vec{B} = ay \hat{i} + bx \hat{j}$$

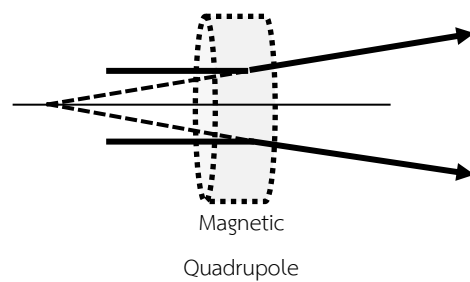
เมื่อ a และ b คือค่าคงตัว

ใน Part C นี้ นักเรียนยังไม่ต้องคำนึงถึงผลเนื่องจากแรงระหว่างอนุภาคด้วยกันเอง

เราเรียกเลนส์ที่ใช้สนามแม่เหล็กว่า Magnetic Lens หรือเลนส์แม่เหล็ก หากอนุภาคถูกเบนเข้าหา
แกนกลางแสดงว่าเลนส์แม่เหล็กทำตัวคล้ายเลนส์นูนที่มีความยาวโฟกัสเป็นบวก (ดูรูปที่ 3.7) หากอนุภาคถูกเบน
ออกจากแกนกลางแสดงว่าเลนส์แม่เหล็กทำตัวคล้ายเลนส์เว้าที่มีความยาวโฟกัสเป็นลบ (ดูรูปที่ 3.8)



รูปที่ 3.7 Quadrupole ที่ทำตัวคล้ายเลนส์นูน



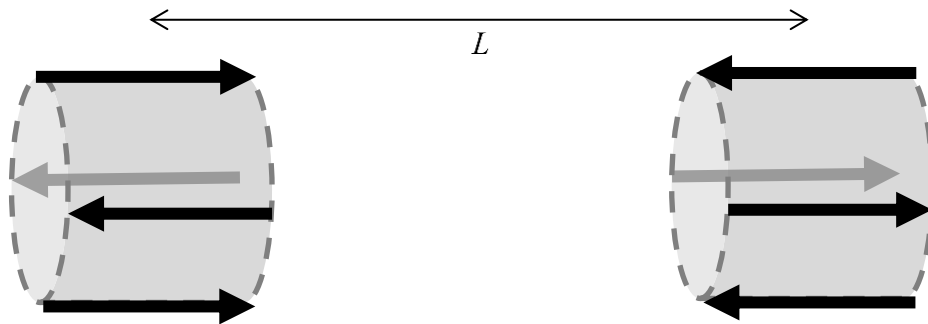
รูปที่ 3.8 Quadrupole ที่ทำตัวคล้ายเลนส์เว้า

C.1 (0.3 คะแนน) ให้ลำอนุภาคเคลื่อนที่ไปทาง $-z$ ดังรูปที่ 3.5 และ 3.6 สำหรับอนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่านแกน x (อยู่บนระนาบ xz) นั้น Magnetic Quadrupole ทำตัวเป็นเลนส์นูนหรือเลนส์เว้า และสำหรับอนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่านแกน y (อยู่บนระนาบ yz) นั้น Magnetic Quadrupole ทำตัวเป็นเลนส์นูนหรือเลนส์เว้า ให้ระบุคำตอบพร้อมเหตุผลประกอบในกระดาษสรุปคำตอบ

C.2 (1.8 คะแนน) จงหาค่าของ a และ b เมื่อ $x \ll R$ และ $y \ll R$ เขียนคำตอบในรูปของ μ_0 , R และ I (ไม่ต้องคำนวณเป็นตัวเลข)

C.3 (1.7 คะแนน) จงหาความยาวโฟกัส f_x ของอนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่านแกน x และหาความยาวโฟกัส f_y ของอนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่านแกน y ให้ประมาณว่าความยาวของ Quadrupole มีขนาดน้อยมากเมื่อเทียบกับความยาวโฟกัส ให้เขียนคำตอบในรูปของ a , b , d และความเร็ว v ในแนวแกน z ของอนุภาคแต่ละตัวที่มีมวล m ให้ใช้เครื่องหมาย + สำหรับเลนส์นูน และเครื่องหมาย - สำหรับเลนส์เว้า

การติดตั้ง Magnetic quadrupole จำนวนหลายชิ้นวางห่างกันเป็นระยะ ๆ จะช่วยโฟกัสลำอนุภาคได้ให้นักเรียนพิจารณา Magnetic Quadrupole คู่หนึ่งวางห่างกันเป็นระยะ L โดยที่ $L \gg d$ และมีการกลับทิศกระแสไฟฟ้างดรูปที่ 3.9 เราจะใช้ Quadrupole คู่นี้เป็นตัวอย่างเพื่อช่วยทำความเข้าใจว่า Magnetic Quadrupole จำนวนหลายชิ้นช่วยโฟกัสลำอนุภาคได้อย่างไร



ภาพที่ 3.9 Quadrupole ที่วางเรียงต่อกัน ห่างกันเป็นระยะ L โดยที่ $L \gg d$

อนุภาคเคลื่อนที่จากซ้ายไปขวาดังรูปที่ 3.9 ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ผ่านเลนส์แม่เหล็กจำนวน 2 เลนส์ ให้ f'_x และ f'_y เป็น เป็นความยาวโฟกัสใหม่ของ Quadrupole คู่นี้ทางแกน x และแกน y ตามลำดับ โดยวัดความยาวโฟกัสระบบจาก Quadrupole ตัวที่สอง

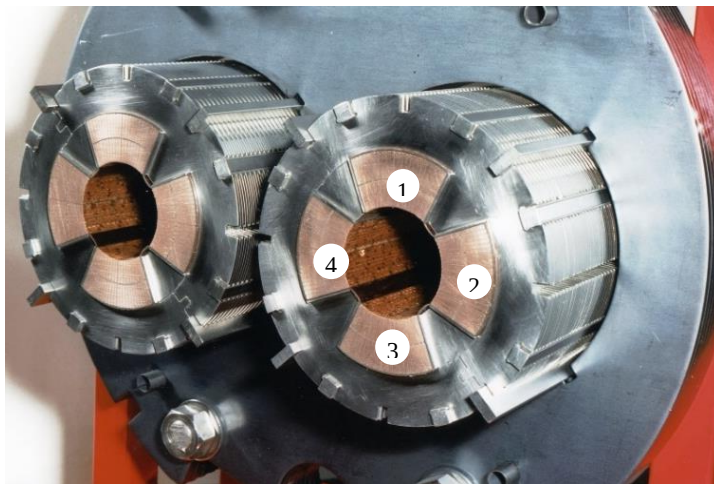
C.4 (1.3 คะแนน) กำหนดให้ขนาด $L < f'_x$ และขนาด $L < f'_y$ จงหา f'_x และ f'_y โดยเขียนคำตอบในรูปของ m, v, q, a, b, d และ L และจากคำตอบที่ได้ ให้นักเรียนระบุพร้อมแสดงเหตุผลประกอบว่าเลนส์รวมของแต่ละแกน เป็นเลนส์เว้าหรือเลนส์นูนลงในกระดาษสรุปคำตอบ

***** จบคำถามข้อ 3 *****

อ่านเป็นความรู้เพิ่มเติมหลังจากทำข้อสอบเสร็จแล้ว

เครื่องเร่งอนุภาคที่เราศึกษาในแบบจำลองนี้มีพลังงานน้อยมากเทียบกับเครื่องเร่งอนุภาคทั่วไป ตัวอย่างเช่น เครื่องเร่งอนุภาคขององค์กรวิจัยนิวเคลียร์ยุโรป (CERN) สามารถเร่งให้อนุภาคโปรตอนมีความเร็ว 0.999999989 เท่าของความเร็วแสง มีพลังงานสูงถึง 6.5 TeV และนำไปสู่การค้นพบอนุภาคมูลฐานฮิกส์โบซอน (Higgs boson) ในปี ค.ศ. 2015 สำหรับประเทศไทยเรามีเครื่องกำเนิดแสงสยามที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งสามารถเร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงถึง 1.2 GeV ที่ความเร็ว 0.999999909 เท่าของความเร็วแสง และใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน (synchrotron radiation) ย่านความถี่เอ็กซ์เรย์สำหรับงานวิจัยวัสดุและสารชีวโมเลกุล

ในกรณีที่อนุภาคมีพลังงานสูงมากนั้น ต้องใช้ขดลวดตัวนำยิ่งยวดสำหรับการสร้างสนามแม่เหล็กความเข้มสูง รูปที่ 3.10 แสดงหน้าตัดของ Magnetic Quadrupole ที่ CERN ใช้ตัวนำยิ่งยวดนำกระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1.9 K ซึ่งจะเห็นว่ามีท่อสุญญากาศ 2 ท่อที่ขนานกันสำหรับให้อนุภาคโปรตอน 2 ลำเคลื่อนที่สวนทางกัน โดยที่กระแสใน Quadrupole แต่ละชิ้นแบ่งออกเป็น 4 ปีก (เลข 1 ถึงเลข 4) ในแต่ละปีกมีลวดตัวนำยิ่งยวดประมาณ 30 กว่าเส้น ในแต่ละเส้นมีกระแสไฟฟ้าขนาดหลายพันแอมแปร์ ทำให้ได้กระแสไฟฟ้ารวมหลายแสนแอมแปร์ เนื่องจากกระแสไฟฟ้ามีค่ามาก แรงระหว่างเส้นลวดจึงมีขนาดมากด้วยเช่นกัน บริเวณรอบ ๆ ลวดตัวนำเป็นวัสดุที่มีส่วนประกอบของเหล็กที่ยึดลวดให้คงรูปร่างเดิมไว้ บริเวณที่เป็นเหล็กนี้มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์สูงซึ่งช่วยในการวนของสนามแม่เหล็กไม่ให้ออกไปสู่ภายนอก



รูปที่ 3.10 หน้าตัดของ Magnetic Quadrupole ที่ CERN ลวดตัวนำยิ่งยวดมีจำนวน 4 บริเวณ กระแสในบริเวณที่ 1 และ 3 ไหลทิศเดียวกัน และตรงข้ามกับกระแสในบริเวณ 2 และ 4 อนุภาคโปรตอนในแต่ละท่อมีทิศตรงกันข้าม ก่อนจะถูกบังคับให้มาชนกันในบริเวณที่เป็นเครื่องตรวจจับอนุภาค

ในการทดลองที่ CERN ลำอนุภาคมีรัศมีน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร และมีความยาวประมาณ 30 cm เรียกว่า bunch โดยในแต่ละ bunch มีอนุภาคโปรตอนประมาณ 1.2×10^{11} อนุภาค ในการทดลองแต่ละครั้งมีจำนวน bunch ทั้งหมด 2×2808 bunch ห่างกันเป็นระยะประมาณ 7.5 m เคลื่อนที่ไปพร้อม ๆ กันรอบวงแหวนใต้ดินความยาวประมาณ 27 km อนุภาคจะเคลื่อนที่ได้ประมาณ 11,245 รอบใน 1 วินาที ในการศึกษาเรื่องอนุภาคมูลฐาน ลำอนุภาคโปรตอนเคลื่อนที่สวนทางกันจะโดนบีบด้วย Quadrupole แบบพิเศษให้มีขนาดเล็กมากไม่กี่ไมครอนเพื่อเพิ่มโอกาสในการชน เนื่องจากโปรตอนมีพลังงานสูงมาก จึงต้องใช้ Dipole จำนวนถึง 1,232 ชิ้นและใช้ Quadrupole ถึง 392 ชิ้น นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์แม่เหล็กชนิดอื่น ๆ อีกหลายพันชิ้นตลอดเส้นรอบวง

อุปกรณ์แต่ละชิ้นของเครื่องเร่งอนุภาคมีความซับซ้อนมาก การออกแบบเครื่องเร่งอนุภาคให้มีพลังงานสูงขึ้นไปอีกเป็นสิ่งที่ท้าทายนักวิทยาศาสตร์รุ่นใหม่ ๆ