

ข้อที่ 1

[10 คะแนน]

1.1 หยดน้ำและไฟกระพริบ

[5 คะแนน]

ภายในห้องมืด น้ำหยดจากก๊อกน้ำด้วยอัตราสม่ำเสมอโดยมีความเร็วต้นเป็นศูนย์ภายใต้แรงโน้มถ่วงจำนวนหลายหยดต่อวินาที โดยแต่ละหยดห่างกัน T_0 วินาที ($T_0 \ll 1$) และภายในห้องมีหลอดไฟที่กระพริบสว่างเป็นระยะเวลาสั้นๆ โดยที่คาบการกระพริบเท่ากับ $T_S = T_0 + \Delta t$ และ $\Delta t \ll T_0$ ผู้สังเกตภายในห้องมืดจะมองเห็นหยดน้ำในจังหวะสั้น ๆ ที่ไฟสว่าง หยดน้ำทุกหยดมีลักษณะภายนอกเหมือนกันทุกประการ

กำหนดให้ความโน้มถ่วงเท่ากับ g

ในข้อ a) และ b) ไม่ต้องคำนึงถึงแรงต้านของอากาศ และให้ถือว่า Δt เป็นค่าคงตัว

- a) ในกรณีที่ $\Delta t = 0$ เราจะเห็นหยดน้ำปรากฏเสมือนอยู่นิ่งกับที่ หรือมี “ความเร็วปรากฏ” เป็นศูนย์ ให้เขียนอธิบายเหตุผลสั้นๆ ว่าทำไมจึงเป็นเช่นนั้น [0.3 คะแนน]

- b) ในกรณีที่ $\Delta t \neq 0$ เมื่อสังเกตหยดน้ำที่ระยะ h จากปลายก๊อกน้ำ จงหา “ความเร็วปรากฏ” และ “ความเร่งปรากฏ” ของหยดน้ำที่บริเวณนี้ และระบุทิศทางความเร็วและความเร่งปรากฏสำหรับกรณี $\Delta t > 0$ และกรณี $\Delta t < 0$ [3.2 คะแนน]

เนื่องจากแรงต้านอากาศ เมื่อหยดน้ำตกลงมาระยะหนึ่งจะมีความเร็วสุดท้าย (terminal velocity) และมีระยะระหว่างหยดเท่ากับ d_0 ในขณะเดียวกัน คาบการกระพริบของหลอดไฟมีการเปลี่ยนแปลงแบบแกว่งดังสมการ $T_S = T_0 + \tau \sin \omega t$ เมื่อ t เป็นเวลาที่สังเกต ω เป็นค่าคงตัว และ $\tau \ll T_0$ การแกว่งนี้เป็นไปอย่างช้า ๆ เทียบกับการหยด หรือ $2\pi/\omega \gg T_0$ ผู้สังเกตจะเห็นหยดน้ำแต่ละหยดเคลื่อนที่ปรากฏแบบขึ้นลง

- c) จงประมาณว่าหยดน้ำบริเวณนี้จะมีการเคลื่อนที่ขึ้นลงด้วยแอมพลิจูดปรากฏเท่าใด [1.5 คะแนน]

นักเรียนอาจใช้ประโยชน์จาก

$$\int \sin \omega t \, dt = -\frac{\cos \omega t}{\omega} + \text{constant}$$

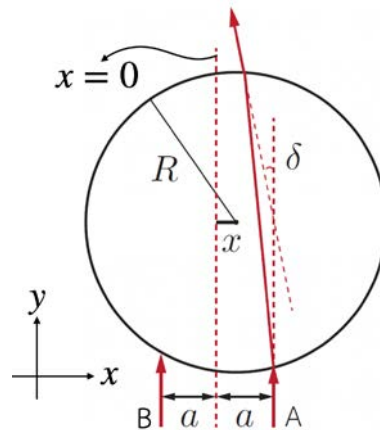
$$\sum_{n=0}^{n=N} \sin n\theta = \frac{\sin\left(\frac{N\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{N+1}{2}\theta\right)}{\sin \frac{\theta}{2}}$$

และการประมาณ $\sin \theta \approx \theta$ เมื่อ $\theta \ll 1$

1.2 แหนบเชิงแสง (optical tweezer)

[5 คะแนน]

แหนบเชิงแสงเป็นเครื่องมือที่ใช้แสงเลเซอร์ในการจับและเคลื่อนย้ายอนุภาคขนาดเล็กเช่น อะตอม อนุภาคระดับนาโน หรือดีเอ็นเอ ในกรณีที่อนุภาคมีขนาดใหญ่กว่าความยาวคลื่นแสงมาก ๆ หลักการจับอนุภาคสามารถอธิบายได้ด้วยแสงเชิงเรขาคณิต



รูปที่ 1

พิจารณาลูกแก้วทรงกลมมวล m รัศมี R และดัชนีหักเห n ยิงแสงเลเซอร์สองลำที่มีขนาดลำแสงเล็กมากที่ตำแหน่ง $x = a$ และ $x = -a$ บนระนาบที่ผ่านจุดศูนย์กลางของทรงกลม เริ่มต้นจุดศูนย์กลางของลูกแก้วอยู่ห่างจากจุด $x = 0$ เป็นระยะทาง x ดังรูป 1 โดยที่ $x < a \ll R$ กำหนดให้ดัชนีหักเหของอากาศเป็น 1 และไม่ต้องคำนึงถึงแรงโน้มถ่วง

a) จงหามุมเบี่ยงเบน δ ของลำแสง A ในรูปของ x และค่าคงที่อื่นที่โจทย์กำหนด

[1.5 คะแนน]

ในฟิสิกส์สมัยใหม่ลำแสงสามารถถูกพิจารณาว่าเกิดจากอนุภาคที่เรียกว่าโฟตอน โดยที่พลังงานและโมเมนตัมของโฟตอนแต่ละตัวมีค่าเป็น hc/λ และ h/λ ตามลำดับ โดยที่ h คือค่าคงที่ของพลังค์และ λ คือความยาวคลื่นของโฟตอน กำหนดให้แสงเลเซอร์แต่ละลำมีกำลังเป็น P และสมมติว่าแสงสามารถวิ่งผ่านลูกแก้วได้ 100%

b) จงหาจำนวนของโฟตอนของลำแสง A ที่วิ่งเข้าสู่ลูกแก้วในช่วงเวลา Δt

[0.3 คะแนน]

c) จงหาขนาดของโมเมนตัมที่ถูกส่งเข้าสู่ลูกแก้วด้วยโฟตอนของลำแสง A ในช่วงเวลา Δt

[0.2 คะแนน]

d) จงหาแรงในแนวแกน x และแกน y ที่ลำแสง A กระทำต่อลูกแก้ว

[2 คะแนน]

e) จงหาความถี่ของการสั่นของลูกแก้วในแนวแกน x เนื่องจากลำแสงเลเซอร์ทั้งสอง

[1 คะแนน]

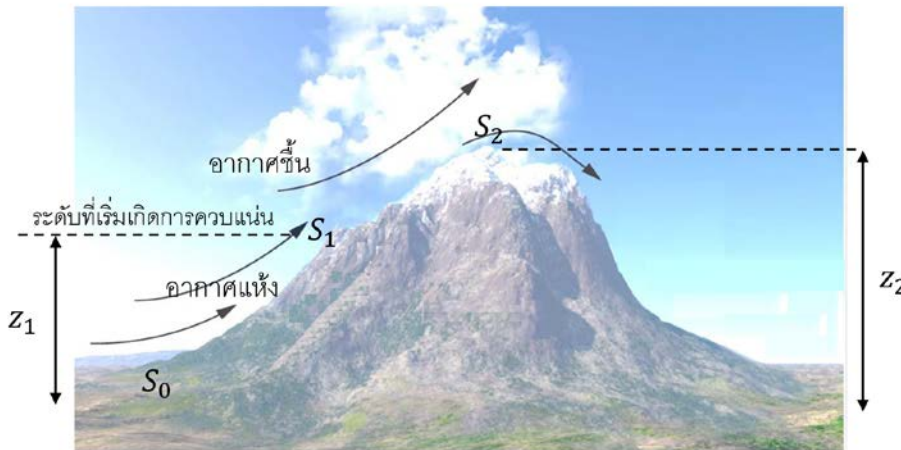
นักเรียนอาจใช้ประโยชน์จาก $\sin(x) \approx x$ และ $\cos(x) \approx 1$ สำหรับ $x \ll 1$

ข้อที่ 2

[10 คะแนน]

ยิ่งสูงยิ่งหนาว

บริเวณพื้นดิน ก้อนอากาศร้อนลอยตัวสูงขึ้น ในขณะที่เดียวกันจะขยายตัวและมีอุณหภูมิลดลง เนื่องจากในอากาศมีไอน้ำเล็กน้อย เมื่อก้อนอากาศลอยตัวสูงขึ้นและมีอุณหภูมิต่ำลงจนถึงอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (dew point temperature) อากาศจะอึมตัวด้วยไอน้ำ (มีความชื้นสัมพัทธ์ 100%) เมื่อก้อนอากาศนี้ลอยตัวสูงขึ้นไปอีก อุณหภูมิของก้อนอากาศจะลดลงไปอีก ทำให้ไอน้ำในก้อนอากาศควบแน่นกลายเป็นหยดน้ำซึ่งก่อตัวเป็นก้อนเมฆ เราจะเรียกก้อนอากาศที่ยังไม่เกิดการควบแน่นของไอน้ำว่าเป็น **อากาศแห้ง** และเมื่อเกิดการควบแน่นแล้วจะเรียกว่า **อากาศชื้น** รูปที่ 2.1 แสดงช่วงที่ก้อนอากาศแห้งขยายตัวและลอยสูงขึ้นในช่วงความสูง $0 \leq z \leq z_1$ และช่วงที่ก้อนอากาศชื้นลอยสูงขึ้นและขยายตัวหลังจากเกิดการควบแน่นในช่วงความสูง $z_1 \leq z \leq z_2$ ก้อนอากาศในทั้งสองช่วงมีอัตราการลดลงของอุณหภูมิไม่เท่ากัน ในโจทย์ข้อนี้เราจะมองก้อนอากาศว่าประกอบด้วยส่วนที่เป็นแก๊สอุดมคติและส่วนที่เป็นไอน้ำ สมมติให้ความดันของก้อนอากาศเป็นความดันของแก๊สอุดมคติเท่านั้น ส่วนไอน้ำและหยดน้ำไม่มีผลต่อความดัน

รูปที่ 2.1 อากาศแห้งที่ความสูงต่ำกว่า z_1 และอากาศชื้นที่ความสูงมากกว่า z_1

สถานีอุตุนิยมวิทยา S_0 บนพื้นดินวัดความดันได้ p_0 และวัดอุณหภูมิได้ T_0 ที่สถานี S_1 ซึ่งอยู่ที่ความสูง z_1 จากพื้นดิน ไอน้ำเริ่มเกิดการควบแน่น วัดความดันได้ p_1 และที่สถานี S_2 บนยอดของภูเขาอยู่ที่ความสูง z_2 วัดความดันได้ p_2

ในโจทย์ข้อนี้ แก๊สอุดมคติ (อะตอมคู่) n โมลที่อุณหภูมิ T มีพลังงานภายใน $U = (5/2)nRT$ และมีการเปลี่ยนแปลงความดัน Δp ปริมาตร ΔV และอุณหภูมิ ΔT เป็นไปตามสมการ $p\Delta V + V\Delta p = nR\Delta T$

ตอนที่ 1 อากาศแห้ง

[3 คะแนน]

ในตอนนี้นำพิจารณาส่วนของอากาศที่เป็นแก๊สอุดมคติ (อะตอมคู่) กำหนดให้การขยายตัวของแก๊สอุดมคติเป็นไปตามกระบวนการ adiabatic มีความจุความร้อนต่อโมลที่ความดันคงที่ $c_p = 7R/2$ และความจุความร้อนต่อโมลที่ปริมาตรคงที่ $c_v = 5R/2$ โดยที่ R คือค่าคงที่ของแก๊สอุดมคติ

2.1 ในกระบวนการ adiabatic เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ T และความดัน p ของแก๊สอุดมคติในรูปของ $T \propto p^k$ จงระบุค่าของตัวเลข k [0.8 คะแนน]

2.2 จงหาอุณหภูมิ T_1 ของแก๊สอุดมคติที่สถานี S_1 (ตอบในรูปของ T_0, p_0 และ p_1) [0.2 คะแนน]

ความดันของแก๊สอุดมคติเปลี่ยนแปลงตามความสูง z จากพื้นตามสมการ

$$\frac{dp}{dz} = -\rho g$$

โดยที่ ρ คือความหนาแน่นของแก๊สอุดมคติ และ g คือความเร่งจากสนามโน้มถ่วงซึ่งถือว่าไม่เปลี่ยนแปลง

2.3 จงพิสูจน์ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทียบกับความสูงคือ

$$\frac{dT}{dz} = -\alpha, \quad \alpha = \frac{2g\mu}{7R}$$

โดยที่ μ คือมวลโมเลกุลเฉลี่ยของแก๊สอุดมคติ (มวลของแก๊ส 1 โมล) เมื่อแทนค่าจะพบว่า $\alpha = 9.78 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$

[1.5 คะแนน]

2.4 จงหาความสูง z_1 ของสถานี S_1 (ตอบในรูปของ T_0, p_0, p_1 และค่าคงที่ต่าง ๆ)

[0.5 คะแนน]

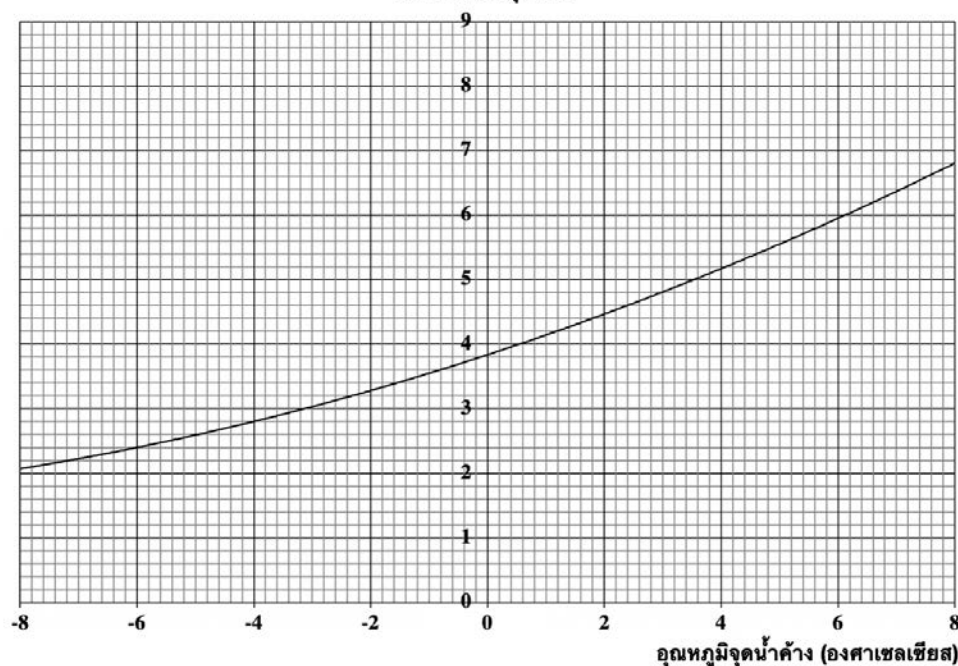
ตอนที่ 2 อากาศชั้น

[7 คะแนน]

ในอากาศมีไอน้ำอยู่เล็กน้อย เมื่ออุณหภูมิลดลงไปถึงอุณหภูมิค่าหนึ่งเรียกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (dew point temperature) ที่อุณหภูมินี้อากาศจะอิ่มตัวด้วยไอน้ำ (อุ้มไอน้ำได้มากที่สุด และมีความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 100%) เมื่อก่อนอากาศลอยสูงขึ้นจากจุดนี้และมีอุณหภูมิลดลงไปอีก อากาศจะมีความสามารถในการอุ้มไอน้ำได้น้อยลง ดังนั้นไอน้ำส่วนที่เกินจะควบแน่นกลายเป็นหยดน้ำซึ่งก่อตัวเป็นก้อนเมฆ เนื่องจากเรามองว่าอากาศประกอบด้วยส่วนที่เป็นแก๊สอุดมคติและส่วนที่เป็นไอน้ำ เมื่อส่วนที่เป็นไอน้ำควบแน่นกลายเป็นหยดน้ำ จะคายความร้อนให้กับส่วนที่เป็นแก๊สอุดมคติ ทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามความสูงของแก๊สอุดมคติดำเนินไปช้ากว่า α

รูปที่ 2.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า β ซึ่งเป็นอัตราส่วนของมวลไอน้ำต่อมวลแก๊สอุดมคติที่อุณหภูมิจุดน้ำค้างต่าง ๆ สมมติให้ก่อนอากาศมีความชื้นสัมพัทธ์ 100% ตลอดเวลาจากจุดที่มีความสูง z_1 และอุณหภูมิ T_1 ไปจนถึงยอดเขาที่มีความสูง z_2 และอุณหภูมิ T_2 กำหนดให้ความจุความร้อนแฝง L_v มีค่าคงที่

$$\beta = \frac{\text{มวลของไอน้ำ}}{\text{มวลของแก๊สอุดมคติ}} (\times 10^{-3})$$



รูปที่ 2.2 อัตราส่วนของมวลไอน้ำที่อากาศสามารถอุ้มได้ต่อมวลแก๊สอุดมคติที่อุณหภูมิจุดน้ำค้างต่าง ๆ

2.5 พิจารณาก่อนแก๊สอุดมคติอะตอมคู่ n โมล ปริมาตร V จงเขียนสมการความร้อนที่แก๊สนี้ได้รับในรูปของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ΔT และการเปลี่ยนแปลงความดัน Δp [0.5 คะแนน]

2.6 จงแสดงว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแก๊สอุดมคติ

$$T_2 - T_1 = -\alpha(z_2 - z_1) - \frac{\alpha L_v}{g} \Delta\beta$$

โดยที่ $\Delta\beta = \beta(T_2) - \beta(T_1)$

[2.5 คะแนน]

จากสมการด้านบน จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมาจาก 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นผลจากการขยายตัวของแก๊สอุดมคติแบบ adiabatic เช่นเดียวกับอากาศแห้ง และส่วนที่สองเป็นเทอมแก้ไขซึ่งเป็นผลจากการควบแน่นของไอน้ำ

กำหนดให้

ที่สถานี S_0 มี $p_0 = 100$ kPa และ $T_0 = 20.0^\circ\text{C}$

ที่สถานี S_1 มี $p_1 = 84.2$ kPa

ที่สถานี S_2 มี $p_2 = 70.0$ kPa

ความจุความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ $L_v = 2.5 \times 10^6$ J.kg⁻¹

ค่าคงที่ของแก๊สอุดมคติ $R = 8.31$ J.mol⁻¹.K⁻¹

มวลโมเลกุลของแก๊สอุดมคติ $\mu = 29.0 \times 10^{-3}$ kg.mol⁻¹

ความเร่งเนื่องจากสนามโน้มถ่วง $g = 9.81$ m.s⁻²

2.7 จงคำนวณหาค่า T_1 (หน่วยองศาเซลเซียส) z_1 และ z_2

[1 คะแนน]

แนะนำ: ในการหา z_2 สามารถประมาณว่าใช้การขยายตัวแบบ adiabatic

2.8 จงคำนวณหาอุณหภูมิ T_2 ในหน่วยองศาเซลเซียส

[2.5 คะแนน]

2.9 จงคำนวณหาอัตราเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทียบกับความสูงจากสถานี S_1 ไป S_2

[0.5 คะแนน]

ข้อที่ 3

[10 คะแนน]

เลนส์แรงโน้มถ่วงกับกฎของแฟร์มาต์

ปรากฏการณ์เลนส์แรงโน้มถ่วงเป็นหลักฐานชิ้นสำคัญที่ใช้ทดสอบความถูกต้องของทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป ในข้อนี้เราจะใช้ความรู้ของแสงเชิงเรขาคณิตมาอธิบายปรากฏการณ์เลนส์แรงโน้มถ่วง

ตอนที่ 1 เลนส์แรงโน้มถ่วง

จากความรู้เกี่ยวกับทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป เราพบว่าจุดมวล M ทำให้กาล-อวกาศเกิดความโค้ง ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้แสงเดินทางเป็นเส้นโค้งเมื่อแสงเดินทางเข้าใกล้จุดมวล M เราสามารถเข้าใจปรากฏการณ์ที่แสงเคลื่อนที่เป็นเส้นโค้งได้โดยใช้หลักการเวลาที่สั้นที่สุดของแฟร์มาต์ กล่าวคือ

แสงจะเดินทางตามเส้นทางที่ใช้เวลาน้อยที่สุด

โดยผลของความโค้งของกาล-อวกาศนั้นให้ผลเสมือนกับว่าดัชนีหักเหแสง n ที่ระยะห่าง r จากจุดมวล M มีค่าเท่ากับ

$$n = 1 + \frac{2G^i M^j}{rc^k}$$

เมื่อ G คือค่าคงที่โน้มถ่วงสากล

c คืออัตราเร็วแสงในสุญญากาศ

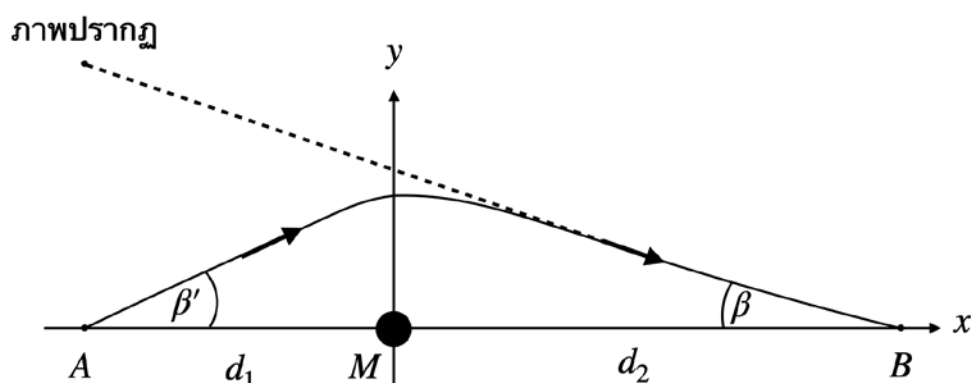
i, j, k คือตัวเลขชี้กำลัง

ดังนั้นเมื่อแสงเดินทางเข้าใกล้จุดมวล M จึงเกิดการหักเห

3.1 จงหาเลขชี้กำลัง i, j และ k

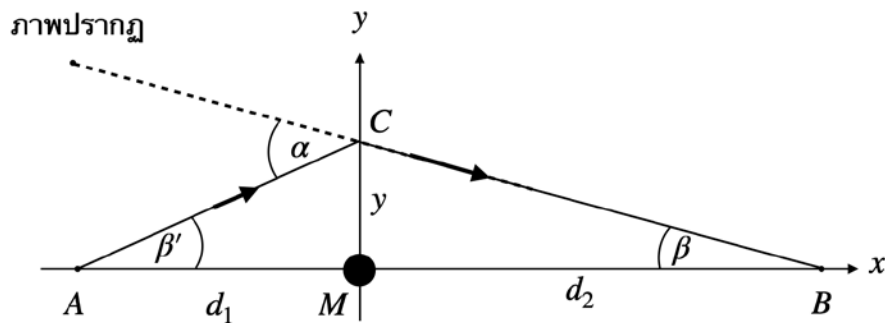
[1.3 คะแนน]

สมมติให้แสงเดินทางจากแหล่งกำเนิดแสง ณ จุด A ไปยังผู้สังเกต ณ จุด B โดยจุด A นั้นอยู่ห่างจากจุดมวล M (ซึ่งอาจจะเป็นกาแล็กซีหรือหลุมดำ) เป็นระยะทาง d_1 และจุด B อยู่ห่างจากจุดมวล M เป็นระยะทาง d_2 ดัชนีหักเหแสงมีค่าเปลี่ยนแปลงเมื่อแสงเคลื่อนที่เข้าใกล้จุดมวล M ทำให้เส้นทางการเคลื่อนที่ของแสงเป็นเส้นโค้งจากจุด A ไปยังจุด B ดังที่แสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของดัชนีหักเหมีค่าน้อยมาก รังสีของแสงที่เกิดการโค้งเบนจึงเป็นรังสีที่อยู่ห่างจากจุดมวล M เป็นระยะทางน้อย ๆ ด้วยเหตุนี้นักเรียนสามารถทำการประมาณเส้นโค้งทางเดินของแสงเป็นรังสีตรงที่เคลื่อนที่มาจากจุด A และเกิดการเปลี่ยนทิศทางทันที ณ จุด C หลังจากนั้นแสงจะเดินทางเป็นเส้นตรงจากจุด C ไปยังจุด B ดังที่แสดงในรูปที่ 3.2 โดยจุด C อยู่ห่างจากจุดมวล M เป็นระยะ y เมื่อ $y/d_1 \ll 1$ และ $y/d_2 \ll 1$



รูปที่ 3.2

3.2 กำหนดให้ ℓ_1 คือระยะทาง ACB ที่แสงเดินทางจากจุด A ไปยังจุด B

จงเขียนและทำการประมาณ ℓ_1 ให้อยู่ในรูปอย่างง่ายในรูปของ d_1 d_2 และ y

[1.4 คะแนน]

แนะนำ: ใช้การประมาณ $(1 + \delta)^p \approx 1 + p\delta$ เมื่อ $\delta \ll 1$

เพื่อที่จะคำนวณหาเวลาที่แสงใช้ในการเดินทางตามเส้นทาง ACB เนื่องจากแสงเดินทางด้วยอัตราเร็วไม่คงที่ การหาเวลาที่แสงใช้ในการเดินทางสามารถทำได้โดยพิจารณาช่วงเวลาสั้น ๆ dt ที่แสงใช้ในการเดินทางเป็นระยะทาง $d\ell$

3.3 จงเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง dt และ $d\ell$

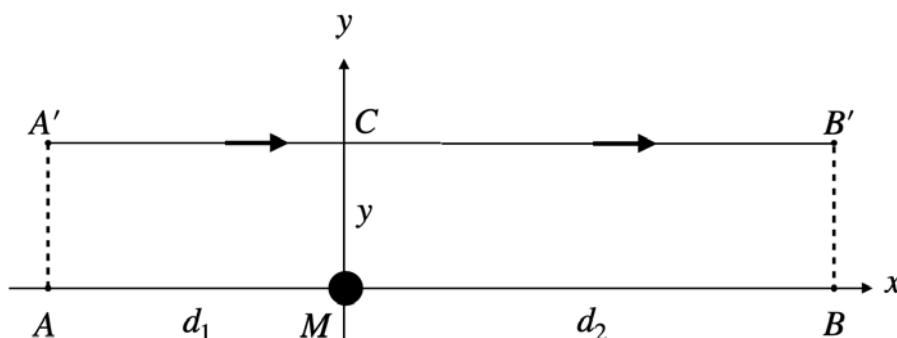
[0.4 คะแนน]

หากช่วงเวลาที่ใช้แสงใช้ในการเดินทางจากจุด A ไปยังจุด B มีค่าเท่ากับ t โดยที่

$$t = \frac{\ell_1}{c} + \int f(x) dx$$

เมื่อ $f(x)$ คือฟังก์ชันของ x

ในการหา $\int f(x) dx$ นักเรียนสามารถทำการประมาณเพิ่มได้ว่าเส้นทาง ACB นั้นเกือบจะเป็นเส้นตรง $A'B'$ ที่มีระยะห่างจากจุดมวล M เป็นระยะทาง y เนื่องจาก $y/d_1 \ll 1$ และ $y/d_2 \ll 1$ ดังที่แสดงในรูป 3.3



รูปที่ 3.3

3.4 จงแสดงว่า $\int f(x)dx$ ตลอดเส้นทางการเคลื่อนที่ของแสงมีค่าประมาณ

$$\frac{2GM}{c^3} \ln\left(\frac{4d_1 d_2}{y^2}\right)$$

[2.8 คะแนน]

แนะนำ: นักเรียนอาจจำเป็นต้องใช้

1. การประมาณ $(1 + \delta)^p \approx 1 + p\delta$ เมื่อ $\delta \ll 1$
2. สูตรอินทิเกรต

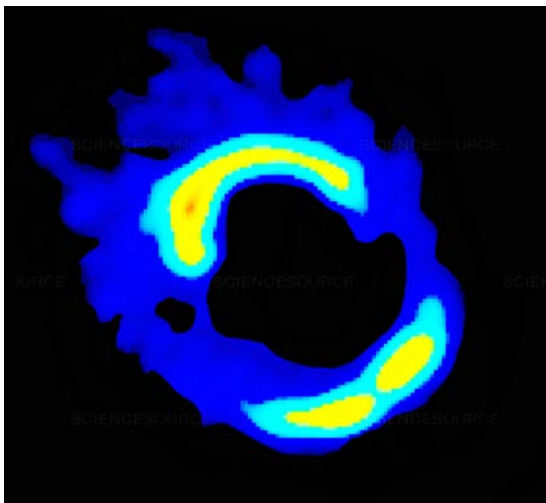
$$\int \frac{1}{\sqrt{a^2 + x^2}} dx = \ln(x + \sqrt{a^2 + x^2}) + C$$

โดยที่ C คือค่าคงที่ของการอินทิเกรต

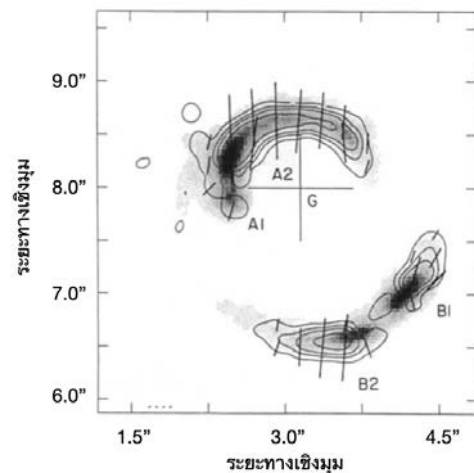
3.5 จงหาระยะ y ที่ทำให้แสงใช้เวลาเดินทางน้อยที่สุดจากจุด A ไปยังจุด B (ตอบในรูปของ $G M c d_1$ และ d_2) [1.2 คะแนน]

3.6 ผู้สังเกตที่จุด B จะสังเกตเห็นภาพปรากฏของแหล่งกำเนิดแสงอยู่ที่ระยะเชิงมุม β (ในรูป 3.2) เทียบกับแนวเล็งที่ผ่านจุดมวล M จงหาระยะเชิงมุม β ในรูปของ $G M c d_1$ และ d_2 [0.7 คะแนน]

ตอนที่ 2 วงแหวนของไอน์สไตน์



รูปที่ 3.4 (ก)



รูปที่ 3.4 (ข)

รูปที่ 3.4 (ก) แสดงปรากฏการณ์ที่มีชื่อว่า “วงแหวนของไอน์สไตน์” ที่มีชื่อว่า MG1654+1346 โดยปรากฏการณ์นี้เป็นหลักฐานข้อพิสูจน์ของเลนส์แรงโน้มถ่วง คลื่นวิทยุจากควอซาร์เกิดการโค้งเบนเมื่อเคลื่อนที่ผ่านกาแล็กซีรูปทรงรี โดยควอซาร์กาแล็กซีรูปทรงรีและโลกค่อนข้างอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน ทำให้ผู้สังเกตบนโลกเห็นสัญญาณคลื่นวิทยุเป็นรูปวงแหวนที่มีความสมมาตรสูง โดยระยะทางเชิงมุมที่วัดในหน่วยฟิลิปดา (") กำหนดให้ระยะทางระหว่างโลกกับควอซาร์มีค่าเท่ากับ 3300 Mpc และระยะทางระหว่างโลกถึงกาแล็กซีรูปทรงรีมีค่าเท่ากับ 940 Mpc เมื่อ pc เป็นหน่วยวัดระยะทางทางดาราศาสตร์ โดย $1 \text{ pc} = 3.086 \times 10^{13} \text{ km}$

$$\text{กำหนดให้ } G = 6.67 \times 10^{-11} \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2} \text{ และ } c = 3.00 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

3.7 จงใช้ข้อมูลจากรูป 3.4 (ข) ประมาณมวลของกาแล็กซีรูปทรงรี

[2.2 คะแนน]

แนะนำ: 1 องศาเท่ากับ 60 ลิปดาและ 1 ลิปดาเท่ากับ 60 ฟิลิปดา