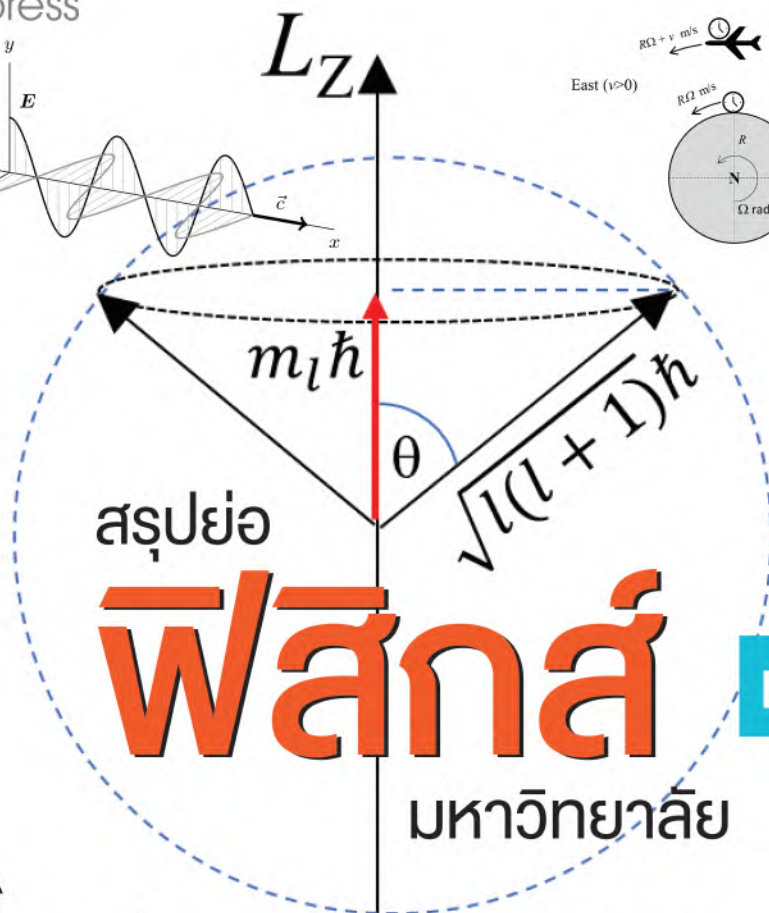
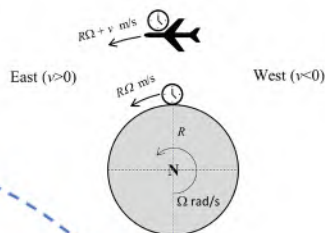
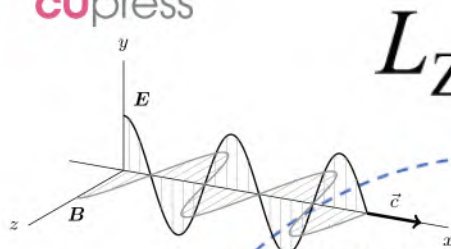
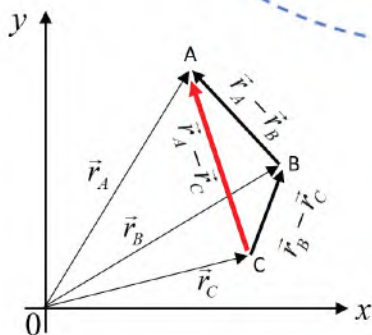




ฟิสิกส์

เล่ม 4

มหาวิทยาลัย



- คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
- แสงเชิงกายภาพ
- สัมพัทธภาพพิเศษ
- ฟิสิกส์ควอนตัมและอะตอม
- ฟิสิกส์นิวเคลียร์

สมชาย เกียรติกุลชัย

สรุปย่อฟิสิกส์มหาวิทยาลัย เล่ม 4
Summary of University Physics
Vol. 4

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
แสงเชิงกายภาพ
สัมพันธภาพพิเศษ
ฟิสิกส์ควอนตัมและอะตอม
ฟิสิกส์นิวเคลียร์

สรุปย่อฟิสิกส์มหาวิทยาลัย เล่ม 4
Summary of University Physics
Vol. 4

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
แสงเชิงกายภาพ
สัมพันธภาพพิเศษ
ฟิสิกส์ควอนตัมและอะตอม
ฟิสิกส์นิวเคลียร์

สมชาย เกียรติกมลชัย

สมชาย เกียรติกมลชัย

สรุปย่อฟิสิกส์มหาวิทยาลัย เล่ม 4 / สมชาย เกียรติกมลชัย

1. ฟิสิกส์. 2. ฟิสิกส์ – แบบฝึกหัด.

530

ISBN (e-book) 978-974-03-4312-7

สพจ. 2656



สสค.คุณค่าวิชาการสู่สังคม

Knowledge to All

www.cupress.chula.ac.th

สิทธิในการผลิตและพิมพ์หนังสือเล่มนี้เป็นของสำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยแต่ผู้เดียว

การผลิตและการลอกเลียนหนังสือเล่มนี้ไม่ว่ารูปแบบใดทั้งสิ้น

ต้องได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากสำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จัดทำโดย สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ครั้งที่ 1 พ.ศ. 2567

www.cupress.chula.ac.th [CUB6611-002]

โทร. 0-2218-3562-3

บรรณาธิการอำนวยการ : ศาสตราจารย์ ดร.อรรักษ์ หาญสืบสาย นางอรทัย นันทนาดิษฐ์

กองบรรณาธิการฝ่ายวิชาการ : ศาสตราจารย์กิตติคุณ ดร.ปิยนดา บุณนา

ศาสตราจารย์ นายแพทย์ชิษณุ พันธุ์เจริญ

รองศาสตราจารย์ ดร.พิมพ์พันธ์ เดชะคุปต์

รองศาสตราจารย์ ดร.วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์

ผู้ประสานงาน : วาสนา ชำเซ็น

พิสูจน์อักษร : ทิพวรรณ โทละสุต

ออกแบบปกและรูปเล่ม : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สั่งซื้อได้ที่ ศูนย์หนังสือแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

<http://www.chulabook.com>

โทร. 08-6323-3703-4

customer@cubook.chula.ac.th, info@cubook.chula.ac.th

Apps: CU-eBook Store

คำนำ

หนังสือสรุปย่อฟิสิกส์มหาวิทยาลัย เล่ม 4 นี้ ถูกเขียนขึ้นด้วยความตั้งใจที่จะให้เป็นหนังสือรูปเล่มขนาดกระทัดรัด ซึ่งย่อเอาเฉพาะแก่นความรู้ของวิชาฟิสิกส์ทั่วไป 2 สำหรับการเตรียมตัวสอบครั้งหลังของเทอมปลาย. แต่ละย่อหน้า แต่ละบทถูกเขียนด้วยความระมัดระวังเพื่อให้ผู้อ่านเกิดความเข้าใจที่ถูกต้องและสมบูรณ์ โดยใช้เวลาในการเรียนรู้ไม่นานนัก. มีการใช้สมการเท่าที่จำเป็นและเพียงพอต่อการเตรียมตัวสอบ. เลี่ยงการพิสูจน์สูตรหรือเล่าที่มาของประวัติศาสตร์ของเนื้อหาวิชาเพื่อให้ผู้เรียนได้มุ่งไปที่องค์ความรู้ ความเข้าใจ ข้อสรุป และการประยุกต์ความรู้ดังกล่าวต่อการแก้ปัญหา. การพิสูจน์สูตรจะถูกจัดกลุ่มไว้โดยเฉพาะ ซึ่งผู้อ่านสามารถข้ามไปได้. ในแต่ละหัวข้อจะมีตัวอย่างให้ทำความเข้าใจและมีแบบฝึกหัดปริมาณพอสมควรที่จะให้ผู้อ่านได้ตรวจสอบว่าตนเองมีความเข้าใจถูกต้องหรือไม่. คำตอบและเฉลยมีให้ในทุกบท. ในหนังสือเล่มนี้มีการใช้เครื่องหมายมหัพภาค (.) เพื่อช่วยตัดประโยคให้ผู้อ่านเห็นชัดเจนขึ้น. ความสำคัญของเครื่องหมายมหัพภาคจะเห็นชัดเจนขึ้นสำหรับกรณีที่หนึ่งประโยคประกอบด้วยข้อความภาษาไทย สมการ ตัวเลข และตัวแปร ผสมกันและผู้อ่านไม่ทราบว่าเป็นประโยคนั้น ๆ สิ้นสุดที่จุดใด.

ผู้เขียนหวังว่าหนังสือเล่มนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้อ่านทุกท่านที่ต้องการอ่านหนังสือที่มีเนื้อหากระชับ ตรงประเด็น และรวมแก่นวิชาของฟิสิกส์ระดับมหาวิทยาลัย. ถ้าหากผู้อ่านมีคำแนะนำหรือพบข้อผิดพลาดประการใด ได้โปรดกรุณาแจ้งที่ปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ somchai.k@chula.ac.th หรือ skchula@gmail.com จักเป็นพระคุณอย่างยิ่ง. ผู้เขียนขอภัยสำหรับข้อผิดพลาดต่าง ๆ มา ณ ที่นี้ด้วย.

สมชาย เกียรติกมลชัย

29/02/2567

สารบัญ

คำนำ

i

1	คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Waves)	1
1.1	สมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equations)	1
1.2	ผลเฉลยของสมการของแมกซ์เวลล์	3
1.3	พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	6
1.4	โมเมนตัมและความดันการแผ่รังสี (Momentum and Radiation Pressure)	9
1.5	การสร้างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากเสาอากาศ	12
1.6	สมบัติบางประการของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	15
1.7	คำตอบและเฉลย	17
2	แสงเชิงกายภาพ (Physical Optics)	21
2.1	สมการคลื่นและผลรวมของคลื่น	21
2.2	การแทรกสอดของสลิตคู่	26
2.3	การกระจายตัวของความเข้มของสลายการแทรกสอดจากสลิตคู่	28
2.4	การแทรกสอดในฟิล์มบาง	29
2.5	เกรตติงเลี้ยวเบน (Diffraction Grating)	37
2.6	การเลี้ยวเบนผ่านสลิตเดี่ยว	43
2.7	กำลังแยกของสลิตเดี่ยวและรูกลม	47

2.8	การผสมผสานระหว่างการแทรกสอดและการเลี้ยวเบน	52
2.9	กำลังแยกของเกรตติง	54
2.10	การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	56
2.11	โพลาไรเซชันของแสง	57
2.12	คำตอบและเฉลย	60
3	สัมพัทธภาพพิเศษ (Special Relativity)	67
3.1	สัมพัทธภาพแบบกาลิเลโอ (Galileon Relativity)	67
3.2	สัจพจน์ของไอน์สไตน์ (Einstein's Principle)	69
3.3	การยืดออกของเวลา (Time Dilation)	70
3.4	การหดสั้นของระยะทาง (Lenth Contraction)	76
3.5	การแปลงแบบลอเรนซ์ (Lorentz Transformation)	78
3.6	สัมพัทธภาพพิเศษของโมเมนตัมเชิงเส้นและพลังงาน	82
3.7	คำตอบและเฉลย	86
4	ฟิสิกส์ควอนตัมและอะตอม (Quantum and Atomic Physics)	89
4.1	การแผ่รังสีของวัตถุดำ (Blackbody Radiation)	90
4.2	สเปกตรัมของแสงจากแก๊ส	92
4.3	แบบจำลองอะตอมไฮโดรเจนของโบร์ (Bohr's Model of the Hydrogen Atom)	95
4.4	ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric Effect)	96
4.5	การกระเจิงคอมป์ตัน (Compton Scattering)	99
4.6	สมบัติเชิงคลื่นของอนุภาค	101
4.7	กลุ่มคลื่นอิเล็กตรอน	103
4.8	หลักความไม่แน่นอนไฮเซนเบิร์ก (Heisenberg Uncertainty Principle)	105
4.9	ฟังก์ชันคลื่นของอนุภาค	107
4.10	แบบจำลองควอนตัมสำหรับอะตอมไฮโดรเจน	111

4.11	คำตอบและเฉลย	117
5	ฟิสิกส์นิวเคลียร์ (Nuclear Physics)	123
5.1	สมบัติทั่วไปของนิวเคลียส	123
5.2	พลังงานยึดเหนี่ยวในนิวเคลียส	125
5.3	แบบจำลองนิวเคลียร์	127
5.4	กัมมันตภาพรังสี (Radioactivity)	129
5.5	การสลายตัวให้รังสีแอลฟา บีตา แกมมา	131
5.6	การสลายตัวต่อเนื่อง	134
5.7	ปฏิกิริยานิวเคลียร์	136
5.8	คำตอบและเฉลย	139
	บรรณานุกรม	143
	ดัชนี	145

บทที่ 1

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Waves)

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นที่ประกอบไปด้วยสนามแม่เหล็ก ($\vec{B}$) และสนามไฟฟ้า ($\vec{E}$) ซึ่งเคลื่อนที่ไปในเส้นทางเดียวกัน. สนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำให้เกิดสนามแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำทำให้เกิดสนามไฟฟ้า. สนามทั้งสองล้วนต่างสั่นในแนวตั้งฉากกับเส้นทางการเคลื่อนที่และสั่นในทิศตั้งฉากซึ่งกันและกัน. ดังนั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจึงจัดเป็นคลื่นตามขวาง. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปได้โดยไม่จำเป็นต้องอาศัยตัวกลาง กล่าวคือ สามารถเคลื่อนที่ในสุญญากาศได้. การเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางจะทำให้อัตราเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าลดลง

1.1 สมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equations)

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกพยากรณ์ไว้ว่ามีอยู่ในธรรมชาติ โดยเป็นผลเฉลยจากสมการทางคณิตศาสตร์ 4 สมการ ซึ่งรวบรวมและหาคำตอบโดยแมกซ์เวลล์ (Maxwell). สมการดังกล่าวประกอบไปด้วย

1. กฎของเกาส์สำหรับสนามไฟฟ้า (Gauss's Law for Electric Field) ซึ่งกล่าวไว้ว่า

“ฟลักซ์ไฟฟ้า Φ_E ที่ผ่านผิวปิดหนึ่ง ๆ จะเท่ากับประจุสุทธิ Q_{net} ที่อยู่ภายในผิวปิดนั้น ๆ หาด้วยค่าสภาพยอมของสุญญากาศ (vacuum permittivity) $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ” ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{net}}{\epsilon_0}$$

2. กฎของเกาส์สำหรับสนามแม่เหล็ก (Gauss' s Law for Magnetic Field) ซึ่งกล่าวไว้ว่า “ฟลักซ์แม่เหล็ก Φ_B ที่ผ่านผิวปิดหนึ่ง ๆ เท่ากับศูนย์เสมอ” ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\Phi_B = \oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

เลขศูนย์ทางขวามือสื่อให้เห็นว่าเราจะไม่สามารถมีขั้วแม่เหล็กเหนือหรือใต้เดี่ยว ๆ ได้. แม่เหล็กทุกชิ้นมีขั้วเหนือและใต้เสมอไม่ว่าจะหักให้เล็กลงเท่าใด ดังนั้น “แหล่งกำเนิดสุทธิของสนามแม่เหล็ก” จึงเป็นศูนย์เสมอ. ความจริงข้อนี้จะต่างไปจากแหล่งกำเนิดสุทธิของสนามไฟฟ้าที่อาจเป็นบวก ศูนย์ หรือลบก็ได้

3. กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ (Faraday's Law of Induction) ซึ่งกล่าวไว้ว่า “แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (ΔV) สำหรับวงลวดตัวนำปิดใด ๆ จะมีทิศต่อต้านการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็ก (Φ_B) และมีขนาดแปรผันตามอัตราการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านวงปิดนั้น ๆ” เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\Delta V = \oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

4. กฎของแอมแปร์-แมกซ์เวลล์ (Ampere-Maxwell Law) กฎของแอมแปร์แต่เดิมจะกล่าวไว้ว่าเส้นลวดที่กำลังมีกระแสไฟฟ้า I ไหลผ่านจะเกิดสนามแม่เหล็กรอบ ๆ เส้นลวดดังกล่าว. สำหรับเส้นทางเดินปิดสมมติที่ล้อมรอบเส้นลวด สนามแม่เหล็กจะสอดคล้องกับสมการ

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I$$

โดย μ_0 คือสภาพให้ซึมผ่านได้ของสุญญากาศ (vacuum permeability) ซึ่งเท่ากับ

$4\pi \times 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m/A}$. ต่อมาแมกซ์เวลล์ได้เพิ่มเทอม $\mu_0\epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$ เข้ามาในด้านขวามือของสมการ ซึ่งทำให้กฎของแอมแปร์-แมกซ์เวลล์เป็นไปตามสมการ

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I + \mu_0\epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

เพื่อให้ครอบคลุมกรณีของตัวเก็บประจุแบบแผ่นโลหะคู่ขนานที่ไม่มี “กระแสจริง” วิ่งข้ามช่องแคบแต่ก็มีสนามแม่เหล็กโดยรอบหากใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ. แมกซ์เวลล์เรียกชื่อเทอม $\epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$ ว่า “กระแสการกระจัด (displacement current)” ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ไฟฟ้าในช่องแคบของโลหะคู่ขนาน. เทอมนี้นำให้สนามไฟฟ้าในสุญญากาศหรือในอากาศสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กได้ถึงแม้จะไม่มีกระแสจริง ๆ ก็ตาม

เราอาจอธิบายการเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นลำดับขั้นได้ดังนี้

1. สนามไฟฟ้าที่ไม่คงตัว ทำให้เกิดฟลักซ์ไฟฟ้าที่ไม่คงตัว
2. ฟลักซ์ไฟฟ้าที่ไม่คงตัว ทำให้เกิดกระแสการกระจัดและทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่ไม่คงตัว (กฎของแอมแปร์-แมกซ์เวลล์)
3. สนามแม่เหล็กที่ไม่คงตัว ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งหมายถึงสนามไฟฟ้าที่ไม่คงตัว (กฎแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของฟาราเดย์)
4. กลับไปข้อแรก

1.2 ผลเฉลยของสมการของแมกซ์เวลล์

จากกฎทั้งสี่ข้อได้นำไปสู่ผลเฉลยที่มีลักษณะดังต่อไปนี้และให้ดูรูป 1.1 ประกอบด้วย

1. สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ต่างก็เป็นคลื่นเคลื่อนที่รูปไซน์ (sinusoidal traveling wave) ไปในเส้นทางเดียวกัน.¹ คลื่นทั้งสองสั่นตั้งฉากกันและต่างก็สั่นในทิศที่ตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่. ด้วยเหตุนี้เราจึงเรียกคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าว่าเป็นคลื่นตาม

¹ ให้นักสังเกตวัตถุเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องและทำให้เกิดคลื่นในเส้นเชือกที่วิ่งไปตามแนวความยาวเชือก

ขวาง. คลื่นสนามไฟฟ้าและคลื่นสนามแม่เหล็กมีเฟสตรงกัน กล่าวคือ ที่จุดหนึ่ง ๆ ในที่ว่าง สนามทั้งสองมีความแรงสูงสุดพร้อมกัน เป็นศูนย์พร้อมกัน และกลับทิศพร้อมกัน. สมการรูปทั่วไปของสนามไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ไปในทิศ $\pm x$ เขียนได้เป็น

$$E = E_m \sin(kx \mp \omega t + \phi) \quad (1.1)$$

โดยที่ E_m คือแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้า, k คือเลขคลื่นซึ่งเท่ากับ $\frac{2\pi}{\lambda}$, ω คือความถี่เชิงมุมในหน่วยเรเดียนต่อวินาที และ ϕ คือมุมเริ่มต้นของการพิจารณา. สมการรูปทั่วไปของสนามแม่เหล็กก็เป็นเช่นเดียวกันแต่แทนด้วย B

2. คลื่นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีอัตราเร็วเท่ากันโดยเท่ากับ $\frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$. เมื่อแทนค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของสุญญากาศ (vacuum permeability) $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m/A}$ และสภาพยอมของสุญญากาศ (vacuum permittivity) $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ แล้วจะได้เท่ากับอัตราเร็วแสง $c \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ พอดี
3. ที่ตำแหน่ง x ใด ๆ อัตราส่วนระหว่างขนาดของสนามไฟฟ้าต่อสนามแม่เหล็กมีค่าคงตัวซึ่งเท่ากับ c

$$\frac{E}{B} = c \quad (1.2)$$

4. ทิศการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหาได้จากทิศของปริมาณ $\vec{E} \times \vec{B}$ โดยการใช้กฎมือขวาในการหาทิศ. แบมือขวาตาม $\vec{E}$ และกำมือให้นิ้วทั้ง 4 งอไปหา $\vec{B}$. นิ้วโป้งจะบอกทิศของผลคูณเวกเตอร์ดังกล่าว

การตีความรูป 1.1 นั้นต้องระมัดระวังเป็นอย่างมากเพราะสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมิได้กำลังสั่นเหมือนคลื่นในเส้นเชือกที่เราเห็นได้จริง ๆ. เรามองไม่เห็นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก. คลื่นที่เขียนเป็นภาพ ณ เวลาหนึ่ง ๆ ที่แสดงถึง “ความแรง” และทิศทางของแต่ละสนามที่เกิดขึ้นที่ “แต่ละจุด” ตามเส้นทางเดินแกน x . สำหรับเปลวเทียนที่กำลังให้ความสว่างไปทั่วห้องนั้น แกน x ก็คือแนวรัศมีที่ออกมาจากเปลวเทียนและเรามีเส้นทางเดินตรงแบบนี้จำนวนอนันต์เส้นทาง. แต่ละเส้นก็บานออกจากกัน. ที่ระยะไกลมาก ๆ จากเปลวเทียน หน้าคลื่นทรงกลมนั้นมีขนาดใหญ่มากและพื้นที่เล็ก ๆ บนหน้าคลื่นนั้นก็แทบจะเป็นพื้นราบ เปรียบเช่นเดียวกับพื้นผิวโลกที่ดูแบนถ้าพื้นที่มีขนาดไม่มากนัก (ไม่ใช่กรณีเป็ยีนดูขอบฟ้าที่