



ฟิสิกส์

(แม่เหล็กไฟฟ้า)

ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า

$$f_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_o} \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

$$f_m = \frac{\mu_o}{4\pi} \frac{i_1 \delta l_1 \times (i_2 \delta l_2 \times \hat{r})}{r^2}$$

$$\text{div } \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_o}$$

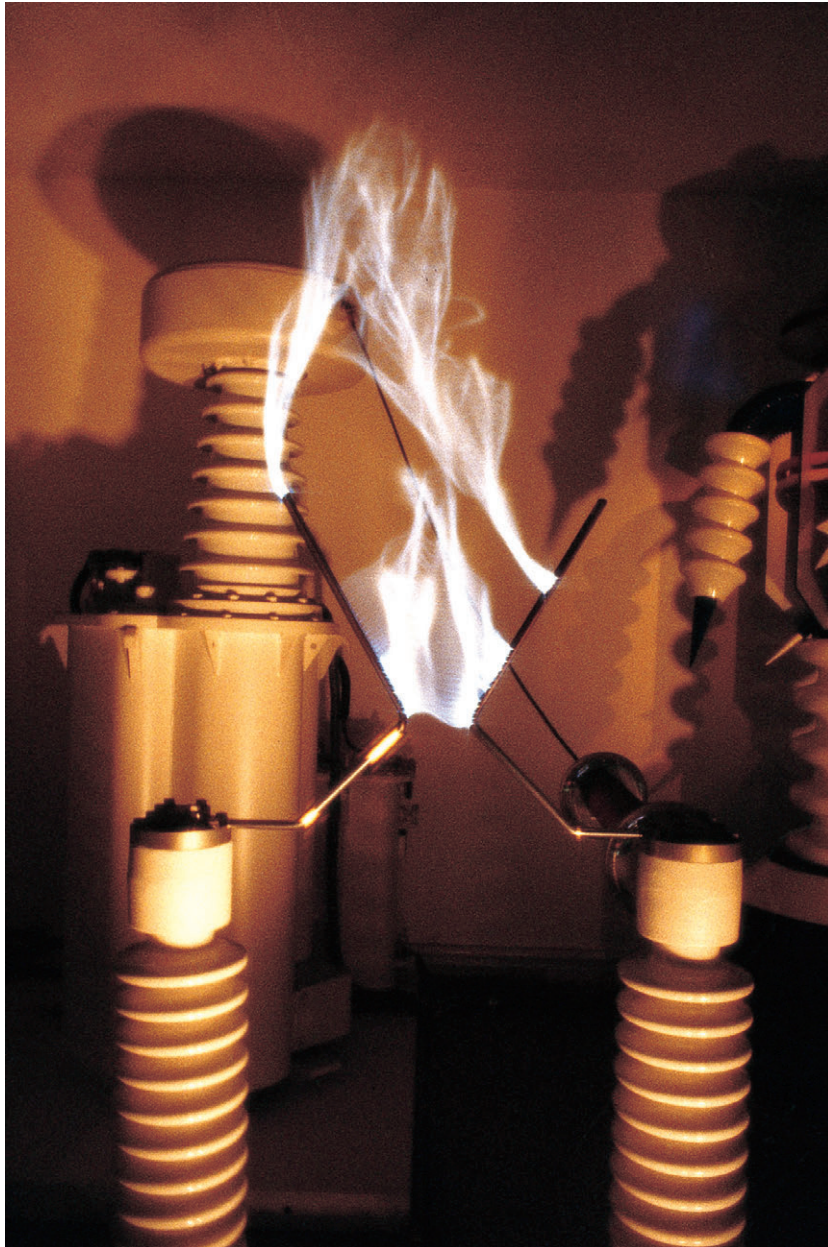
$$\text{curl } \mathbf{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{B}$$

$$\text{div } \mathbf{B} = 0$$

$$\text{curl } \mathbf{B} = \mu_o \mathbf{J} + \mu_o \epsilon_o \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{E}$$

ฟลิกส์

(แม่เหล็กไฟฟ้า)



โครงการตำราวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์มูลนิธิ สอน.



**มูลนิธิส่งเสริมโอลิมปิกวิชาการและพัฒนามาตรฐานวิทยาศาสตร์ศึกษา
ในพระอุปถัมภ์สมเด็จพระเจ้าพี่นางเธอ เจ้าฟ้ากัลยาณิวัฒนา
กรมหลวงนราธิวาสราชนครินทร์ (สอวน.)**

ความเป็นมา

ประเทศไทยส่งนักเรียนเข้าแข่งขันคณิตศาสตร์โอลิมปิกระหว่างประเทศครั้งแรกในปี พ.ศ. 2532 ที่ประเทศเยอรมนี โดยความร่วมมือระหว่างสมาคมวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ และสมาคมคณิตศาสตร์แห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ สมเด็จพระเจ้าพี่นางเธอ เจ้าฟ้ากัลยาณิวัฒนา (พระยศในขณะนั้น) ได้พระราชทานเงินส่วนพระองค์จำนวนหนึ่งเพื่อเป็นค่าใช้จ่าย

การคัดเลือกนักเรียนเพื่อไปแข่งขันคณิตศาสตร์โอลิมปิกระหว่างประเทศ ครั้งที่ 30 สมาคมคณิตศาสตร์แห่งประเทศไทยฯ ได้จัดคณะกรรมการมหาวิทยาลัยจำนวนหนึ่งมาช่วยฝึกอบรมรวมเป็นเวลาประมาณสองเดือน เพื่อให้นักเรียนได้เรียนรู้เนื้อหาเพิ่มเติมครอบคลุมหลักสูตรที่จะใช้แข่งขัน ซึ่งอยู่ในระดับชั้นปีที่ 1-2 ของมหาวิทยาลัย จากผลสำเร็จในปีแรก ทำให้รัฐบาลเห็นความสำคัญจึงได้จัดสรรงบประมาณให้กับโครงการนี้ผ่านสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2533 เป็นต้นมา สมทบกับเงินพระราชทานเป็นรายปีจากสมเด็จพระเจ้าพี่นางเธอ เจ้าฟ้ากัลยาณิวัฒนา กรมหลวงนราธิวาสราชนครินทร์ เพื่อสนับสนุนการส่งนักเรียนไทยไปแข่งขันโอลิมปิกวิชาการระหว่างประเทศ 5 สาขา จนถึงปัจจุบันรวม 14 ปี นักเรียนไทยได้ทำชื่อเสียงได้เหรียญทองรวม 17 เหรียญ เหรียญเงิน 53 เหรียญ เหรียญทองแดง 93 เหรียญ และเกียรติคุณประกาศ 35 ราย รวมทั้งสิ้น 198 รางวัล จากจำนวนนักเรียนที่ส่งไปแข่งขัน 276 คน (72%)

อย่างไรก็ตาม จากการที่ประเทศไทยดำเนินการจัดส่งนักเรียนเข้าร่วมการแข่งขันคณิตศาสตร์ วิทยาศาสตร์ โอลิมปิกระหว่างประเทศ ตั้งแต่ พ.ศ.2532 จนถึงปัจจุบัน ทำให้เห็นว่ามาตรฐานการศึกษาด้านคณิตศาสตร์และวิทยาศาสตร์ของไทยยังต่ำกว่ามาตรฐานสากล การเตรียมตัวของนักเรียนยังใช้เวลาน้อยเกินไป

เพื่อให้การส่งเสริมและสนับสนุน โครงการจัดส่งผู้แทนประเทศไทยไปแข่งขันโอลิมปิกวิชาการระหว่างประเทศมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นสมเด็จพระเจ้า พี่นางเธอ เจ้าฟ้ากัลยาณิวัฒนา กรมหลวงนราธิวาสราชนครินทร์ จึงมีพระดำริให้จัดตั้งมูลนิธิ สอวน. และได้รับอนุมัติจากกระทรวงมหาดไทยเมื่อวันที่ 12 ตุลาคม 2542 โดยมีวัตถุประสงค์หลัก 2 ประการ

วัตถุประสงค์

1. ส่งเสริมให้นักเรียนในระดับมัธยมศึกษาตอนปลายทั่วประเทศที่มีความสามารถทางวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ มีโอกาสได้รับการพัฒนาศักยภาพทางด้านคณิตศาสตร์ คอมพิวเตอร์ เคมี ฟิสิกส์ และชีววิทยา ตามความถนัดทั้งด้านทฤษฎีและทักษะด้านปฏิบัติ ให้สามารถคิดวิเคราะห์และแก้ปัญหาที่ซับซ้อนได้ โดยจัดให้มีศูนย์อบรมทั่วประเทศเป็นการเพิ่มเวลาฝึกอบรม เพื่อช่วยให้นักเรียนมีความพร้อมที่จะเข้ารับการคัดเลือกไปแข่งขันโอลิมปิกวิชาการระหว่างประเทศให้ได้ผลดียิ่งขึ้น ตามพระดำริของสมเด็จพระเจ้าพี่นางเธอเจ้าฟ้ากัลยาณิวัฒนา กรมหลวงนราธิวาสราชนครินทร์ องค์ประธานมูลนิธิ สอวน.
2. เพื่อนำประสบการณ์ที่ได้จากการแข่งขันโอลิมปิกวิชาการระหว่างประเทศมาพัฒนามาตรฐานคณิตศาสตร์และวิทยาศาสตร์ศึกษาของไทยให้สูงขึ้นเทียบเท่าระดับสากล

โครงการตำราวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์มูลนิธิ สอวน.

มูลนิธิส่งเสริมโอลิมปิกวิชาการและพัฒนามาตรฐานวิทยาศาสตร์ศึกษา ในพระอุปถัมภ์สมเด็จพระเจ้าพี่นางเธอ เจ้าฟ้ากัลยาณิวัฒนา กรมหลวงนราธิวาสราชนครินทร์ (สอวน.) ได้ร่วมมือกับคณาจารย์มหาวิทยาลัยของรัฐ 20 แห่ง และกระทรวงศึกษาธิการ ดำเนินการจัดตั้งศูนย์ สอวน. ในภูมิภาค 12 ศูนย์ และในกรุงเทพฯ 1 ศูนย์ (5 โรงเรียน) เพื่อพัฒนาศักยภาพทางปัญญาของนักเรียนที่มีความพร้อมในด้านวิทยาศาสตร์ คณิตศาสตร์และคอมพิวเตอร์จากทั่วประเทศ เพื่อให้นักเรียนได้มีความรู้ความสามารถเทียบเท่ามาตรฐานสากล และพร้อมที่จะสอบคัดเลือกเป็นผู้แทนประเทศไทยไปร่วมการแข่งขันโอลิมปิกวิชาการระหว่างประเทศในสาขาวิชาต่างๆ ได้ และเพื่อขยายผลจากประสบการณ์ที่ได้เข้าแข่งขันโอลิมปิกวิชาการระหว่างประเทศมาพัฒนามาตรฐานวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ของไทยให้สูงขึ้นเทียบเท่าสากล

ในการอบรมนักเรียนของศูนย์ สอวน. มูลนิธิ สอวน. ได้พิจารณาเห็นว่าตำราที่มีความสมบูรณ์ของเนื้อหาตามหลักสูตรของ สอวน. จะช่วยพัฒนาศักยภาพของนักเรียนในศูนย์ สอวน. ให้สูงขึ้นได้ นอกจากนั้นตำราเรียนในวิชาวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ในระดับมัธยมศึกษาตอนปลายที่มีความสมบูรณ์ถูกต้องยังขาดแคลน นักเรียนและครูสามารถนำตำราที่พัฒนาขึ้นมาไปใช้เป็นหนังสืออ้างอิงประกอบการเรียนการสอนได้อีกด้วย มูลนิธิ สอวน. จึงได้มี “โครงการจัดทำตำราส่งเสริมพัฒนาศักยภาพของนักเรียนด้านวิทยาศาสตร์ คณิตศาสตร์และคอมพิวเตอร์” ขึ้น เพื่อผลิตตำราคณิตศาสตร์ คอมพิวเตอร์ เคมี ชีววิทยาและฟิสิกส์ที่มีเนื้อหาหลักสูตรตามมาตรฐานสากล โดยมีวัตถุประสงค์

1. เพื่อเป็นที่ระลึกในมหามงคลสมัยที่สมเด็จพระเจ้าพี่นางเธอ เจ้าฟ้ากัลยาณิวัฒนา กรมหลวงนราธิวาสราชนครินทร์ ทรงเจริญพระชนมายุ 80 พรรษา ซึ่งพระองค์ทรงมีพระมหากรุณาธิคุณต่อโครงการจัดส่งผู้แทนประเทศไทยไปแข่งขันโอลิมปิกวิชาการระหว่างประเทศและทรงสนับสนุนการดำเนินงานเพื่อพัฒนามาตรฐานการศึกษาวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ของไทยอย่างหาที่สุดมิได้

2. เพื่อผลิตหนังสือคณิตศาสตร์ คอมพิวเตอร์ เคมี ชีววิทยาและฟิสิกส์ระดับมัธยมศึกษาตอนปลายถึงระดับชั้นปีที่ 1 ของคณะวิทยาศาสตร์ในมหาวิทยาลัยให้มีคุณภาพเทียบเท่าสากล เรียบเรียงโดยคณาจารย์จากมหาวิทยาลัยของรัฐที่มีประสบการณ์สูงและที่มีส่วนร่วมในการฝึกอบรมนักเรียนในค่าย สอวน. ค่าย สสวท. และควบคุมนักเรียนไปแข่งขันโอลิมปิกวิชาการระหว่างประเทศ เนื้อหาในหนังสือเน้นกระบวนการคิดแบบวิทยาศาสตร์ เพื่อฝึกฝนให้นักเรียนสามารถคิดวิเคราะห์และแก้ปัญหาที่ซับซ้อนทั้งในเชิงทฤษฎีและประยุกต์ได้โดยจัดพิมพ์บนกระดาษอาร์ตอย่างดีและมีภาพสีประกอบคำบรรยาย

โครงการตำราวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ของมูลนิธิ สอวน. มีเป้าหมายในการผลิตตำราคณิตศาสตร์ รวม 5 เล่ม คอมพิวเตอร์ 3 เล่ม เคมี 4 เล่ม ชีววิทยา 5 เล่ม และฟิสิกส์ 3 เล่ม โดยหนังสือชุดแรกจะนำขึ้นทูลเกล้าถวายในวันที่ 6 มิถุนายน 2547 ซึ่งเป็นวันประชุมสามัญประจำปี พ.ศ. 2547 ของคณะกรรมการบริหาร และสมเด็จพระเจ้าพี่นางเธอ เจ้าฟ้ากัลยาณิวัฒนา กรมหลวงนราธิวาสราชนครินทร์ เสด็จเป็นองค์ประธานที่ประชุม ส่วนที่เหลือคาดว่าจะจัดพิมพ์ให้แล้วเสร็จภายในปี พ.ศ. 2547 นี้ นอกจากนั้นคณะกรรมการโครงการผลิตตำราวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์มูลนิธิ สอวน. มีเป้าหมายจะผลิตตำราที่มีคุณภาพสูงนี้ในระดับมัธยมศึกษาตอนต้น โดยคณาจารย์จากมหาวิทยาลัย เพื่อวางรากฐานวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์พื้นฐานและเพื่อสร้างแรงบันดาลใจและความสนใจทางด้านวิทยาศาสตร์ คณิตศาสตร์แก่เยาวชนอีกด้วย หากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลือด้านงบประมาณจากภาครัฐและเอกชน

คณะจัดทำหนังสือคณิตศาสตร์ วิทยาศาสตร์หวังว่าโครงการตำราคณิตศาสตร์ วิทยาศาสตร์ของมูลนิธิ สอวน. จะมีส่วนร่วมในการปฏิรูปการเรียนรู้และยกระดับมาตรฐานวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ของไทยให้เทียบเท่ากับระดับสากลเพื่อสนองพระดำริของสมเด็จพระเจ้าพี่นางเธอ เจ้าฟ้ากัลยาณิวัฒนา กรมหลวงนราธิวาสราชนครินทร์

*คำขอบคุณ : คณะกรรมการดำเนินงานโครงการตำราฯ ขอขอบคุณพิพิธภัณฑสถาน Science Museum, London

ที่อนุญาตให้ประธานคณะกรรมการฯ เข้าถ่ายภาพในพิพิธภัณฑสถาน เพื่อนำมาเผยแพร่

คณะกรรมการโครงการตำราวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์มูลนิธิ สอวน.

คณะกรรมการที่ปรึกษา

1. ศาสตราจารย์ นายแพทย์ จรัส สุวรรณเวลา	รองประธานมูลนิธิ สอวน.
2. รองศาสตราจารย์ ดร.กำจัด มงคลกุล	กรรมการมูลนิธิฯ
3. ดร. คุณหญิงกษมา วรวรรณ ณ อยุธยา	กรรมการมูลนิธิฯ
4. รองศาสตราจารย์ ดร. คุณหญิงสุมณฑา พรหมบุญ	กรรมการมูลนิธิฯ
5. นายเชาว์ อรรถมานะ (อดีต)	กรรมการมูลนิธิฯ
6. นายสมนึก พิมลเสถียร	กรรมการมูลนิธิฯ
7. นายสุนทร อรุณานนท์ชัย	กรรมการมูลนิธิฯ
8. รองศาสตราจารย์บุญรักษา สุนทรธรรม	กรรมการมูลนิธิฯ

คณะกรรมการดำเนินงานโครงการตำราฯ

1. ศาสตราจารย์ศักดิ์ ศิริพันธุ์ (ราชบัณฑิต) เลขานุการมูลนิธิ สอวน.	ประธาน
2. รองศาสตราจารย์เย็นใจ สมวิเชียร	รองประธาน
3. รองศาสตราจารย์ ดร. ณรงค์ ปั่นนัม	กรรมการ (วิชาคณิตศาสตร์)
4. รองศาสตราจารย์ยืน ภู่วรวรรณ	กรรมการ (วิชาคอมพิวเตอร์)
5. รองศาสตราจารย์ ดร. พินิติ รตะนานุกูล	กรรมการ (วิชาเคมี)
6. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วุทธิพันธุ์ ปรัชญพฤทธิ์	กรรมการ (วิชาฟิสิกส์)
7. ศาสตราจารย์อักษร ศรีเปล่ง	กรรมการ (วิชาชีววิทยา ประเภทพืช)
8. รองศาสตราจารย์ ดร. อุษณีย์ ยศยิ่งยวด	กรรมการ (วิชาชีววิทยา ประเภทสัตว์)

คณะผู้เขียนวิชาฟิสิกส์

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วุทธิพันธุ์ ปรัชญพฤทธิ์	ประธานคณะอนุกรรมการ
2. รองศาสตราจารย์สุวรรณ คูสำราญ	อนุกรรมการ

คำนำของผู้เขียน

ตำรานี้จัดพิมพ์ขึ้นเพื่อใช้ในการอบรมนักเรียนของมูลนิธิส่งเสริมโอลิมปิกวิชาการและพัฒนามาตรฐานวิทยาศาสตร์ศึกษา ในพระอุปถัมภ์สมเด็จพระเจ้าพี่นางเธอเจ้าฟ้ากัลยาณิวัฒนา กรมหลวงนราธิวาสราชนครินทร์ (สอวน.) ให้ฝึกฝนเพื่อเตรียมความพร้อมสำหรับการแข่งขันโอลิมปิกวิชาการระดับนานาชาติและระดับเอเชีย การฝึกฝนนี้เน้นความเข้าใจเป็นสำคัญ และพัฒนาความสามารถในการวิเคราะห์

นักเรียนทั่วไปที่มีความสนใจและชื่นชอบในวิชาฟิสิกส์และประสงค์จะเป็นนักฟิสิกส์หรือศึกษาต่อในสาขาที่ใช้ฟิสิกส์เป็นรากฐานสำคัญต่อไป รวมทั้งนักศึกษาที่เรียนในสายวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในระดับมหาวิทยาลัย ครู-อาจารย์ที่สอนวิชาฟิสิกส์ในระดับมัธยมศึกษาตอนปลายก็สามารถใช้ตำรานี้ประกอบการสอนได้เช่นกัน

การใช้แบบเรียนนี้ควรทำความเข้าใจในทฤษฎีแล้วหัดเฉลยตัวอย่างด้วยตัวเองก่อนทุกตัวอย่างว่าได้ผลตรงกับที่แสดงไว้หรือไม่ นอกเหนือจากตัวอย่างเหล่านี้ยังมีแบบฝึกหัดซึ่งรวบรวมไว้ท้ายเล่มอีกจำนวนหนึ่งซึ่งอิงเนื้อหาในเล่ม ให้ฝึกแก้ปัญหาด้วย

การศึกษาตำราเล่มนี้จำเป็นต้องมีความรู้พื้นฐานของวิชาแคลคูลัสเพียงพอ และต้องมีแนวคิดเกี่ยวกับวิชาเวกเตอร์เชิงแคลคูลัส เวกเตอร์วิเคราะห์บ้าง ซึ่งอาจพบทวนได้จากหนังสือฟิสิกส์ (กลศาสตร์) ในโครงการตำราวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ มูลนิธิ สอวน.

การพิมพ์ครั้งนี้ได้แก้ไขสิ่งที่ผิดที่ได้รับความแจ้งจากนักเรียนในโครงการสอวน. โครงการโอลิมปิกวิชาการ รวมทั้งผู้อ่านอื่น ๆ และได้เปลี่ยนแปลงหน้าปกใหม่เป็นสมการที่เป็นศูนย์กลางของวิชา

ผู้เขียน

วุทธิพันธุ์ ปรัชญพฤทธิ

B.Sc. (Queensland), M.Sc., Ph.D. (Birmingham)

ISBN : 978-616-8242-06-3

สงวนลิขสิทธิ์

จัดพิมพ์โดย มูลนิธิ สอวน.

พิมพ์ครั้งที่ 4 พ.ศ. 2563 (2020)

พิมพ์แก้ไขและจัดทำหน้าปก : นายปณต นพทศพร นักศึกษาปริญญาเอก มหาวิทยาลัยมหิดล

พิมพ์ที่ บริษัท ด้านสุทธาการพิมพ์ จำกัด

แยกสี / เพลท บริษัทอีเลฟเว่นคัลเลอรัส จำกัด

ผู้จัดจำหน่าย ศูนย์หนังสือจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

CALL CENTER โทร. 0-2255-4433 <http://www.chulabook.com>

ร้านค้า ติดต่อแผนกขายส่ง สาขาหัวหมาก โทร. 0-2374-1374-5 โทรสาร 0-2374-1377

	หน้า
บทนำ	1
บทที่ 1 แรงไฟฟ้าและสนามไฟฟ้า	5
1.1 ระบบอ้างอิง	6
1.2 ประจุไฟฟ้า	6
1.3 กฎของคูลอมบ์	6
1.4 สนามไฟฟ้าในเชิงทฤษฎี	8
1.5 สนามไฟฟ้าในทางปฏิบัติ	9
1.6 สนามไฟฟ้าของกลุ่มประจุ	10
1.7 กฎของเกาส์	24
1.8 แรงแม่เหล็กของกลุ่มประจุ	33
1.9 งานที่ทำโดยแรงไฟฟ้า	41
1.10 งานไม่ขึ้นกับเส้นทาง	49
1.11 พลังงานในสนามไฟฟ้า	51
1.12 ศักย์ไฟฟ้า	55
1.13 พลังงานศักย์ไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้า	58
1.14 เส้นแรงของสนามไฟฟ้า	70
1.15 ผิวนิพจน์คงที่	78
1.16 ความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้า สนามไฟฟ้า ความหนาแน่นประจุ	84
1.17 ตัวเก็บประจุ	90
1.18 พลังงานในตัวเก็บประจุ	99
1.19 สารไดอิเล็กตริกและตัวเก็บประจุ	100
1.20 เมื่อสาร ไดอิเล็กตริกไม่สามารถต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้า	111
1.21 ไฟฟ้ากระแส	112
1.22 แหล่งขับเคลื่อนกระแสไฟฟ้า	114
1.23 กฎของโอห์ม	118
1.24 กฎของเคิร์คฮอฟ	130
1.25 การสูญเสียพลังงานไฟฟ้า	140

บทที่ 2	แรงแม่เหล็กและสนามแม่เหล็ก	153
2.1	กฎของบีโอดี-ซาวาร์	154
2.2	สนามแม่เหล็ก	157
2.3	แรงที่สนามแม่เหล็กกระทำต่อประจุ	159
2.4	การคำนวณหาสนามแม่เหล็กจากกระแสที่มีรูปทรงเรขาคณิตง่าย ๆ	164
2.5	แรงระหว่างกระแส คำจำกัดความของหน่วยแอมแปร์	176
2.6	กฎการวนของแอมแปร์	181
2.7	ฟลักซ์แม่เหล็ก	184
2.8	สนามแม่เหล็กประพจน์ตัวเช่นไรที่ตำแหน่งใด ๆ ในสเปซ	188
2.9	สนามแม่เหล็กในเนื้อสาร	193
บทที่ 3	การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า	207
3.1	กฎการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า	211
3.2	การรวมกฎการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าของฟาราเดย์และของเลนซ์	211
3.3	ความเหนี่ยวนำ	220
3.3.1	ความเหนี่ยวนำระหว่างขดลวด	220
3.3.2	ความเหนี่ยวนำตัวเอง	223
3.4	การรวมค่าความเหนี่ยวนำ	227
3.5	พลังงานในสนามแม่เหล็ก	234
3.6	หลักการสำคัญในการวิเคราะห์วงจรที่มีตัวเหนี่ยวนำอยู่ด้วย	243
3.7	ปรากฏการณ์ฮิสเทอรีซิสในสารแม่เหล็ก	257
3.8	การล้าอำนาจแม่เหล็ก	266
3.9	วงจรเส้นแรงแม่เหล็ก	267
3.9.1	แรงดึงดูดที่ขั้วแม่เหล็ก	270
บทที่ 4	คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสุญญากาศ	277
4.1	สมบัติของสนามไฟฟ้าสถิต และสนามแม่เหล็กสถิต	278
4.2	สนามไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา	282
4.3	ส่วนของสนามที่ขาดหายไปจากสมการ	280
4.4	สมการของแมกซ์เวลล์ในสุญญากาศ	283
4.5	คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นอย่างไร	285
4.6	สมการคลื่น	287
4.7	คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบฟังก์ชันไซน์	296
4.8	พลังงานในคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	298

4.9	ความดันอันเนื่องมาจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	300
4.10	จะสร้างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้อย่างไร	304
4.11	คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากไดโพลไฟฟ้าที่สั้น	309
4.12	เสาอากาศแบบครึ่งความยาวคลื่น	314
4.13	คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและคลื่นแสง	318
4.14	การสะท้อนและการหักเหที่ผิวตัวกลาง	321
4.15	สมการของฟรีเนล	324
 หนังสืออ้างอิง		332
แบบฝึกหัด		333
บรรณานุกรม		343

ประวัติโดยย่อของการพัฒนาทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า

เมื่อประมาณ 550 ปี ก่อนคริสตกาล นักปราชญ์ชาวกรีกชื่อ **ทาลีส** (Thales of Miletus, 624-546 B.C.) บันทึกไว้ว่า แท่งอำพันเมื่อถูด้วยขนสัตว์จะสามารถดูดของเบา ๆ ขึ้นได้ คนโบราณสมัยนั้นคงรู้จักเพราะเสี้ยนสัตว์ก็สวมกันมานานแล้ว และบางคนก็มีอำพันเป็นเครื่องประดับด้วย

ประมาณ ค.ศ. 1600 **กิลเบิร์ต** (William Gilbert, 1544-1603) ซึ่งเป็นนักปราชญ์ร่วมสมัยกับกาลิเลโอ (Galilei Galileo, 1564-1642) และได้ศึกษาเรื่องแม่เหล็กเสนอว่าโลกเราเป็นเสมือนแม่เหล็กแท่งใหญ่ นอกจากเรื่องแม่เหล็กท่านก็สนใจเรื่องไฟฟ้าด้วย และพบว่า วัสดุอื่น ๆ นอกเหนือจากอำพัน ก็สามารถทำให้เกิดแรงไฟฟ้าดูดวัตถุเบา ๆ ได้เช่นกัน กิลเบิร์ตเรียกสารที่สามารถให้แรงไฟฟ้าได้เหล่านี้ว่า **electrics** นับได้ว่ากิลเบิร์ตเป็นคนแรกที่ใช้คำนี้

นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน ชื่อ **ฟอน กือริกเก** (Otto von Guericke, 1602-1686) ก็สนใจเรื่องไฟฟ้า ท่านประดิษฐ์เครื่องสร้างไฟฟ้าสถิตแบบใช้การถู (frictional electrostatic machines) เครื่องแรกเพื่อศึกษาและพบว่าไฟฟ้าสามารถถ่ายเทจากวัตถุหนึ่งไปยังอีกวัตถุหนึ่งได้โดยการแตะกัน ด้วยเชือกเปียกก็ได้ และด้วยลวดจะยิ่งดี ท่านสังเกตด้วยว่าสารที่ถูกทำให้มีไฟฟ้า (ภาษาอังกฤษใช้คำว่า ถูก “electrified”) สามารถผลักรันได้ด้วย นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศส ชื่อ **ดู เฟ** (Charles Francois de Cisternay Du Fay, 1698-1739) ศึกษาเรื่องนี้ต่อมาอย่างละเอียดและพบว่าสารชนิดเดียวกันที่ถูกทำให้เกิดไฟฟ้าโดยวิธีเดียวกันจะผลักรัน ท่านเสนอสมมติฐานว่า ไฟฟ้าเป็นของไหลและมีอยู่สองชนิด ชนิดเดียวกันผลักรัน ชนิดต่างกันดูดกัน

นักปราชญ์ชาวอเมริกัน ชื่อ **เบนจามิน แฟรงคลิน** (Benjamin Franklin, 1706-1790) เสนอเรียกไฟฟ้าสองชนิดนี้ว่า **ไฟฟ้าบวก** และ**ไฟฟ้าลบ** แต่ท่านเสนอ (ในปี ค.ศ. 1752) ว่าไฟฟ้าซึ่งเป็นของไหลนั้นมีเพียงชนิดเดียว วัตถุใดมีไฟฟ้าชนิดนี้มากเกินไปก็จะเป็นบวก มีน้อยเกินไปก็จะเป็นลบ และไฟฟ้าจะไหลจากวัตถุที่เป็นบวกไปยังวัตถุที่เป็นลบ ซึ่งตรงกันข้ามกับที่เราารู้ในปัจจุบันว่า อิเล็กตรอนเป็นอนุภาคที่เคลื่อนที่จากวัตถุที่เป็นลบไปสู่วัตถุที่เป็นบวก แต่ว่าในวงจรไฟฟ้าปัจจุบันนี้ เรายังถือเสมือนกับว่าประจุบวกเคลื่อนที่จากขั้วบวกของเซลล์ไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำ ผ่านตัวต้านทานต่าง ๆ ไปยังขั้วลบของเซลล์ไฟฟ้า

ในยุคที่การศึกษาเรื่องไฟฟ้าสถิตยังดำเนินอยู่อย่างเข้มข้นนั้น นักฟิสิกส์ได้ประดิษฐ์อุปกรณ์ง่าย ๆ แต่สำคัญมากขึ้นมาอีกสองชนิดเพื่อช่วยในการศึกษาค้นคว้าของเขา คือ **อิเล็กโตรสโคป** (electroscopes) กับ**ตัว (ถ้วย) เก็บประจุลีเดน** (Leyden jar) อิเล็กโตรสโคปใช้สำหรับตรวจสอบว่าวัตถุมีไฟฟ้าหรือไม่ ประดิษฐ์ขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1705 โดย **ฮอกสบี** (Francis Hauksbee, 1670-1713) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษลูกศิษย์ของ **โรเบิร์ต บอยล์** (Robert Boyle, 1627-1691) ส่วนถ้วยเก็บประจุลีเดนนั้นสร้างขึ้นครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1745 โดยนักฟิสิกส์กลุ่มหนึ่งที่มหาวิทยาลัยลีเดน (The University of Leyden, The Netherlands) ใช้สำหรับเก็บประจุจากเครื่องกำเนิดประจุเอาไว้ และปล่อยออกมาเมื่อต้องการใช้

ค.ศ. 1785 **คูลอมบ์** (Charles Augustin de Coulomb, 1736-1806) พบกฎกำลังสองผกผันสำหรับแรงระหว่างประจุไฟฟ้า แต่ความจริง **คาเวนดิช** (Henry Cavendish, 1731-1810) พบกฎนี้ก่อนแล้ว แต่ไม่เคยตีพิมพ์รายงานผล มีการนำข้อเท็จจริงนี้มาเผยแพร่ในวงการฟิสิกส์หลังจากคาเวนดิชเสียชีวิตไปแล้วตั้งครึ่งศตวรรษ

อันที่จริงการศึกษาเรื่องแรงแม่เหล็กได้ดำเนินมาตั้งแต่โบราณกาลเช่นเดียวกับการศึกษาเรื่องแรงไฟฟ้า นักปราชญ์ชาวกรีก ชื่อทาเลส นั้น นอกจากจะศึกษาเรื่องแรงไฟฟ้า ก็ศึกษาเรื่องแรงแม่เหล็กด้วย ในสมัยโบราณนั้นพบกันว่าแร่ที่เรียกว่า **lodestone** สามารถดูดเหล็กได้และดูดแร่เหล็กเท่านั้น สองพันปีต่อมา กิลเบิร์ตเป็นคนค้นคิดว่า โลกของเราเป็นเสมือนแม่เหล็กแท่งใหญ่มีขั้วเหนือแม่เหล็กอยู่ทางขั้วใต้ภูมิศาสตร์ของโลก และขั้วใต้แม่เหล็กอยู่ทางขั้วเหนือภูมิศาสตร์ของโลก ว่ากันว่า ชาวจีนเป็นชนชาติแรกที่ใช้แม่เหล็กประดิษฐ์เป็นเข็มทิศเพื่อใช้ในการเดินทางข้ามแผ่นดินอันกว้างใหญ่ของเอเชียกลาง จริงอยู่ที่ว่าเราสามารถใช้ดวงดาวในเวลากลางคืนและใช้ดวงอาทิตย์ในเวลากลางวันสำหรับบอกทิศทางได้ แต่เข็มทิศก็เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สะดวกและอาจเป็นเหตุผลที่ชาวยุโรปกล้าเดินทางออกไปในทะเลเพื่อสำรวจโลก เป็นการเริ่มยุคของการสำรวจด้วยเข็มทิศเล็ก ๆ นี่เอง!

ในเรื่องแรงแม่เหล็ก นักปราชญ์โบราณก็พบเช่นเดียวกันกับในเรื่องแรงไฟฟ้าว่า ขั้วแม่เหล็กที่เหมือนกันผลักกัน และขั้วต่างกันดูดกัน คูลอมบ์ทดลองพบในปี ค.ศ. 1785 เช่นกันว่า แรงระหว่างขั้วแม่เหล็กเป็นไปตามกฎกำลังสองผกผันเช่นเดียวกันกับแรงไฟฟ้า คาเวนดิชเองก็พบกฎเกี่ยวกับแรงแม่เหล็กนี้ แต่ก็ได้ตีพิมพ์ผลงานจนกระทั่งหนึ่งศตวรรษต่อมาจึงมีการนำมาจัดพิมพ์ให้โดย **แมกซ์เวลล์** (James Clerk Maxwell, 1831-1879) เมื่อปี ค.ศ. 1879 ซึ่งเป็นปีที่แมกซ์เวลล์เสียชีวิต

เกาส์ (Karl Friedrich Gauss, 1777-1855) นักคณิตศาสตร์ผู้ยิ่งใหญ่คนหนึ่งของโลกชาวเยอรมัน ได้เขียนคัมภีร์ทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับสนามแม่เหล็กของโลกไว้เมื่อประมาณต้นศตวรรษที่ 19 ซึ่งมีบทบาทอย่างมากในการกระตุ้นการศึกษาค้นคว้าเรื่องสนามแม่เหล็กและเป็นผลให้ชื่อของท่านได้รับการตั้งเป็นหน่วยของสนามแม่เหล็กด้วย

เรื่องแรงไฟฟ้าและแรงแม่เหล็กดูราวกับจะไม่เกี่ยวข้องกัน จนกระทั่งปี ค.ศ. 1819 เมื่อ **เออสเตด** (Hans Christian Oersted, 1777-1851) นักฟิสิกส์ชาวเดนมาร์ก ในขณะที่ทำการบรรยายและสาธิตในห้องเรียน พบว่าไฟฟ้ากระแสสามารถทำให้เข็มทิศเบนได้ นั่นคือ มีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นเมื่อประจุเคลื่อนที่

ข่าวการค้นพบนี้แพร่สะพัดไปในยุโรปราวกับพายุโหม นักฟิสิกส์อื่นโดดเข้าทำการศึกษาค้นคว้าเรื่องความสัมพันธ์ระหว่างไฟฟ้ากับแรงแม่เหล็กทันที และภายในเวลาไม่ถึงหนึ่งเดือนก็เป็นที่ยืนยันว่าไฟฟ้ากับแม่เหล็กนั้นผูกพันกันแนบแน่นยิ่งกว่าใด ๆ การศึกษาเรื่อง **ไฟฟ้า** กับเรื่อง **แม่เหล็ก** จึงกลายเป็นการศึกษาเรื่อง **แม่เหล็กไฟฟ้า** ไปในบัดดล

ในทันทีหลังจากการค้นพบของเออสเตดดังที่กล่าวมาข้างต้น **อะราโก** (Dominique Francois Jean Arago, 1786-1853) พบว่าลวดที่นำกระแสไฟฟ้าไม่เพียงแต่มีผลต่อเข็มทิศ แต่สามารถดูดผงเหล็กธรรมดาด้วย เหมือน ๆ กับที่แท่งแม่เหล็กถาวรดูดผงเหล็ก การพบนี้บ่งว่า กระแสไฟฟ้าทำตัวเป็นแม่เหล็ก ซึ่งถ้าเป็นเช่นนั้นจริง ลวดสองเส้นที่กำลังนำไฟฟ้าอยู่ย่อมดูดหรือผลักกันได้ และก็เป็นเช่นนั้นจริง ในปี ค.ศ. 1820 **แอมแปร์** (Andre Marie Ampere, 1775-1836) พบกฎเกณฑ์เกี่ยวกับแรงดูดหรือผลักระหว่างกระแส (**current elements**)

ก่อนหน้าการค้นพบของแอมแปร์เล็กน้อย **บิโอด** (Jean Baptiste Biot, 1774-1862) กับ **ซาวาร์** (Felix Savart, 1791-1841) นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศสทั้งคู่ ก็พบกฎเกณฑ์เกี่ยวกับแรงระหว่างลวดที่กำลังนำกระแสไฟฟ้าอยู่ด้วย

ขั้วแม่เหล็กถาวร ทั้งสามท่านจึงได้รับการยกย่องทัดเทียมกัน และทำให้มีการเรียกชื่อกฎนั้นด้วยชื่อต่าง ๆ (ของทั้งสามท่าน) เช่น **กฎของแอมแปร์** **กฎของบิโอต์-ซาวาร์** เป็นต้น

การค้นคว้าศึกษาเรื่องไฟฟ้ากระแสทั้งที่เกี่ยวกับการไหลของมัน และเกี่ยวกับสนามแม่เหล็กของมัน กระตุ้นให้มีการพัฒนาแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสขึ้น **กัลวานี** (Luigi Galvani, 1737-1798) พบเมื่อปี ค.ศ. 1791 ว่า กล้ามเนื้อขาอ่อนของกบจะกระตุกเมื่อปล่อยไฟฟ้าจากขดลวดดีบุกใส่ หรือไม้ก็เมื่อนำโลหะสองชนิดที่ต่างกันไปแตะกล้ามเนื้อพร้อมกัน ซึ่งบ่งว่าโลหะต่างชนิดกันทำให้เกิดไฟฟ้าได้เมื่อแตะกัน ในปี ค.ศ. 1800 **โวลตา** (Alessandro Volta, 1745-1827) ประสบความสำเร็จในการสร้างแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแส โดยการวางแผ่นโลหะทองแดงสลับกับแผ่นเหล็กหรือแผ่นสังกะสีมีผ้าชุบน้ำเกลือกั้นขวางอยู่ระหว่างแผ่นทุกคู่ และวางซ้อนกันหลาย ๆ ชั้น อุปกรณ์นี้เรียกว่า **Volta's pile** หรือ **voltaic pile** ซึ่งเป็นต้นแบบของเซลล์ไฟฟ้าและแบตเตอรี่แบบต่าง ๆ ในปัจจุบัน อุปกรณ์นี้ช่วยให้การศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับไฟฟ้าและแม่เหล็กในสมัยนั้นก้าวหน้าอย่างรวดเร็วราวจรวด!

เพียงหกสัปดาห์หลังรายงานของโวลตาออกเผยแพร่ ก็มีการค้นพบว่า ไฟฟ้ากระแสสามารถแยกน้ำออกเป็น ส่วนประกอบย่อย คือ ไฮโดรเจน กับ ออกซิเจน ด้วยกระบวนการที่ตั้งชื่อว่า **electrolysis** และผู้ที่ค้นพบคือ **นิคอลสัน** (William Nicholson, 1753-1815) กับ **คาร์ลิล** (Antony Carlisle, 1768-1840) แต่นักวิทยาศาสตร์ผู้นี้ก็ได้ก่อเรื่องที่น่าอับอายขึ้นด้วย โดยการพยายามแอบอ้างความคิดของโวลตาเป็นของตนเอง จึงถูกประณามจากแวดวงวิทยาศาสตร์ไปตลอดชีวิตเลย

ปี ค.ศ. 1826 **โอห์ม** (Georg Simon Ohm, 1787-1854) พบกฎที่สำคัญมากกฎหนึ่งที่เรารู้จักกันทุกวันนี้ในชื่อที่ตั้งเพื่อเป็นเกียรติแก่ท่านว่า **กฎของโอห์ม** (Ohm's law) โอห์มพบว่า กระแสที่ไหลผ่านลวดตัวนำเป็นปริมาณตรงกับความต่างศักย์ ส่วนกลับของค่าคงที่ของการแปรนี้เรียกว่า **ความต้านทาน** ของเส้นลวด โอห์มพบด้วยว่า ความต้านทานของเส้นลวดเป็นปริมาณตรงกับความยาว และเป็นปริมาณกลับกับพื้นที่ภาคตัดขวางของเส้นลวดนั้น การค้นพบนี้ได้รับการยกย่องอย่างสูงส่งโดย The Royal Society (ราชบัณฑิตยสมาคม) แห่งสหราชอาณาจักร ก่อนที่จะได้รับการยกย่องในประเทศของท่านเอง คือ เยอรมัน ที่แต่งตั้งให้ท่านเป็นอาจารย์ในมหาวิทยาลัยมิวนิกเมื่อปี ค.ศ. 1849 (ทำให้ความฝันของท่านเป็นจริง หลังจากรอคอยมาถึง 23 ปี!) มีการสร้างอนุสาวรีย์รูปปั้นของท่านที่เมืองมิวนิก และตั้งชื่อถนนสายหนึ่งตามชื่อของท่าน

หลังจากการค้นพบของโอห์ม นักฟิสิกส์ชาวเยอรมันอีกท่านหนึ่ง คือ **เคิร์คฮอฟ** (Gustav Robert Kirchhoff, 1824-1887) ได้เสนอกฎสองข้อที่เราเรียกว่า **กฎของเคิร์คฮอฟ** (Kirchhoff's rules) ซึ่งเป็นหลักในการคำนวณเกี่ยวกับกระแสและความต่างศักย์ในวงจรไฟฟ้าอย่างมีระบบ

ในปี ค.ศ. 1831 **ฟาราเดย์** (Micheal Faraday, 1791-1867) และ **เฮนรี** (Joseph Henry, 1797-1878) ต่างคนต่างค้นพบหลักการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า (ฟาราเดย์อยู่ในประเทศอังกฤษ ส่วนเฮนรีอยู่ในสหรัฐอเมริกา) กฎเกี่ยวกับทิศทางของกระแสเหนี่ยวนำนั้นพบในปี ค.ศ. 1834 โดย **เลนซ์** (Heinrich Friedrich Emil Lenz, 1804-1865) ซึ่งเป็นนักฟิสิกส์ชาวรัสเซีย กฎการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้านี้มักเรียกชื่อว่า **กฎของฟาราเดย์-เลนซ์** (Faraday-Lenz law)

ฟาราเดย์มีบทบาทที่สำคัญในหลายเรื่อง เช่น ท่านพบว่าสนามแม่เหล็กสามารถหมุนระนาบของแสงโพลาไรซ์ได้ (The Faraday effect) ท่านพบ**กฎเกี่ยวกับอิเล็กโทรลิซิส** (The law of electrolysis) เมื่อปี ค.ศ. 1833 เป็นต้น ท่าน

เป็นผู้ตั้งคำว่า **แอโนด** (anode) และ **แคโทด** (cathode) ขึ้นมาใช้ด้วย แต่ที่สำคัญที่สุดในแง่ทฤษฎีจากฟาราเดย์ก็คือ การเสนอแนวคิดเกี่ยวกับ **สนามของแรง** (field of force) ขึ้นมาใช้ นับเป็นก้าวที่สำคัญมากในทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า ฟาราเดย์สามารถเสนอแนวคิดนี้ได้ทั้ง ๆ ที่ไม่เคยศึกษาในมหาวิทยาลัยเลย (แต่ถ้าได้เคยศึกษาก็อาจจะคิดไม่ออก เพราะถูกครอบงำเชิงความคิดหมด!) **แมกซ์เวลล์** (James Clerk Maxwell, 1831-1879) นักฟิสิกส์ชาวสกอตเป็นผู้สานต่อเรื่องสนามของแรง และด้วยความสามารถทางคณิตศาสตร์อันสูงส่งของท่านจึงก่อให้เกิด**ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า**อันสวยงามขึ้นมา

แมกซ์เวลล์ไม่เพียงแต่สังเคราะห์ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นมาเท่านั้น ท่านยังทำประโยชน์เรื่องอื่น ๆ ไว้มากมาย แมกซ์เวลล์เสนอวิธีการเขียนรูปวงรีตั้งแต่อายุ 15 ปี ซึ่งนักคณิตศาสตร์ที่เชี่ยวชาญไม่อยากจะเชื่อว่าเป็นงานที่เด็กทำขึ้น ท่านริเริ่มหลักการที่สำคัญของการถ่ายภาพสี วางรากฐานทฤษฎีคลื่นของแก๊สที่ **เบอร์นูลลี** (Daniel Bernoulli, 1700-1782) นักคณิตศาสตร์ชาวสวิสเคยพยายามเมื่อหนึ่งศตวรรษก่อนหน้านั้น ท่านอธิบายธรรมชาติของวงแหวนของดาวเสาร์ได้อย่างแม่นยำ ท่านสังเคราะห์สมการที่สำคัญในวิชาอุณหพลศาสตร์ที่เราจำกันทุกวันนี้ในชื่อ **ความสัมพันธ์ของแมกซ์เวลล์** (Maxwell relations ซึ่งสมการนี้เป็นคนละชุดกับชุดสมการที่เรียกว่า Maxwell's equations) ท่านเสนอความคิดเรื่องสิ่งประดิษฐ์ทางทฤษฎีที่เรียกว่า **The Maxwell's demon** ท่านก่อตั้งห้องทดลองคาเวนดิช (The Cavendish Laboratory) อันมีชื่อเสียงก้องโลกที่ผลิตผลงานระดับรางวัลโนเบลจำนวนมาก แทบจะกล่าวได้ว่านักฟิสิกส์ที่นั่งในห้องทดลองนั้นได้รับรางวัลโนเบลกันแทบทั้งนั้น เป็นที่น่าเสียดายอย่างยิ่งที่ท่านเสียชีวิตตั้งแต่อายุเพียง 48 ปี เท่านั้นด้วยโรคมะเร็ง

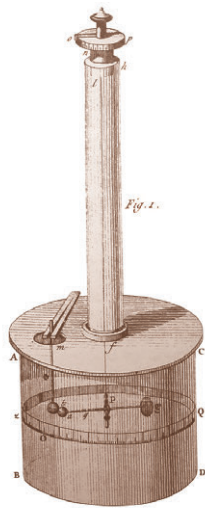
แมกซ์เวลล์สังเคราะห์ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าจากกฎ 4 กฎ กับจากสมองอันปราดเปรื่องบวกกับความสามารถอันสูงส่งทางคณิตศาสตร์ของท่าน ทำให้ได้ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าอันสวยงามเมื่อปี ค.ศ. 1864 กฎทั้ง 4 กฎ นั้นได้แก่ **กฎของคูลอมบ์** (Coulomb's law) **กฎของบิโอต์-ซาวาร์** (Biot-Savart law ซึ่งบางครั้งก็เรียกว่า **กฎของแอมแปร์** (Ampere's law)) **กฎของฟาราเดย์-เลนซ์** (Faraday-Lenz law) และ**กฎวงจรของแอมแปร์** (Ampere's circuital law)

ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าที่แมกซ์เวลล์สังเคราะห์ขึ้นมานั้น ถือเป็นงานที่ยิ่งใหญ่ของมนุษยชาติ ยิ่งใหญ่เทียบเคียงกับ **ทฤษฎีกลศาสตร์** (The Principia, 1686) ของ **เซอร์ไอแซก นิวตัน** (Sir Isaac Newton, 1642-1727) ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าทำนายว่า สามารถมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ และบ่งบอกว่า แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

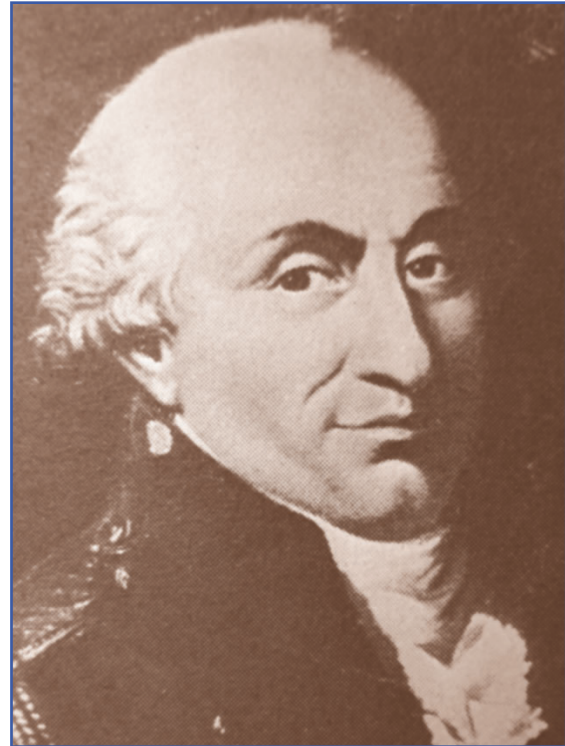
ในปี ค.ศ. 1888 **เฮิร์ตซ์** (Heinrich Rudolf Hertz, 1857-1894) ประสบความสำเร็จในการสร้างและตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้จริงตรงตามคำทำนายของทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า แต่ความอายุน้อยของแมกซ์เวลล์ทำให้ท่านไม่เห็นความสำเร็จนี้ ในการทดลองเดียวกันนั้น เฮิร์ตซ์ได้พบด้วยว่า แสงทำให้เกิด**สปาร์ก** (spark) เกิดได้ง่ายขึ้น (เกี่ยวข้องกับเรื่อง**ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก** (photoelectric effect)) ซึ่งต่อมา **ไอน์สไตน์** (Albert Einstein, 1879-1955) เป็นผู้อธิบายปรากฏการณ์นี้ได้ โดยถือว่า แสงมีความเป็นอนุภาคด้วย

บทที่ 1

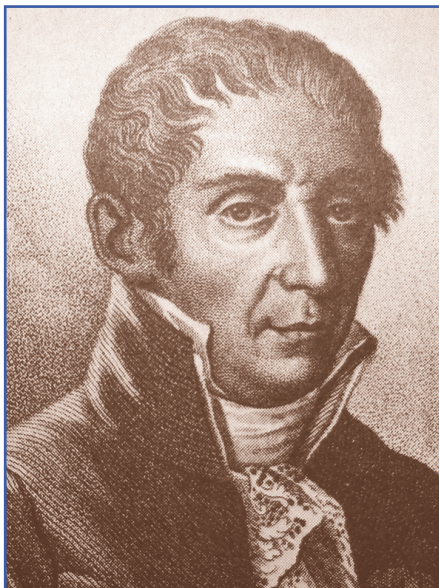
แรงไฟฟ้าและสนามไฟฟ้า



Torsion Balance



Charles Augustin de Coulomb
(1736-1806)



Count Alessandro Volta
(1745-1827)



Volta's Original Voltaic Battery

1.1 ระบบอ้างอิง

ปรากฏการณ์ทางไฟฟ้า ทางแม่เหล็ก และทางแม่เหล็กไฟฟ้า ต่างก็เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในสเปซ-เวลา เราต้องมีระบบอ้างอิงเพื่อบรรยายปรากฏการณ์เหล่านี้ และระบบอ้างอิงที่ใช้ต้องเป็นระบบอ้างอิงเฉื่อยเช่นเดียวกับที่ใช้ในทฤษฎีกลศาสตร์ ระบบอ้างอิงเฉื่อยหมายถึงระบบอ้างอิงที่กฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 1 ของนิวตันเป็นจริง ซึ่งในทางปฏิบัติเรามักถือว่าระบบอ้างอิงที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่เทียบกับดาวไกล ๆ เป็นระบบอ้างอิงเฉื่อย สังเกตด้วยว่าระบบที่หมุนเทียบกับระบบอ้างอิงเฉื่อยไม่สามารถเป็นระบบอ้างอิงเฉื่อยได้

จริงอยู่ ที่ว่าการค้นพบทางไฟฟ้าและทางแม่เหล็กทั้งหลายนั้นเป็นการค้นพบบนโลกของเราซึ่งหมุนรอบตัวเอง หมุนรอบดวงอาทิตย์ซึ่งโคจรไปรอบศูนย์กลางของกาแล็กซีของเราด้วย ดังนั้นโลกของเราไม่สามารถเป็นระบบอ้างอิงเฉื่อยได้อย่างแน่นอน แต่โดยประมาณแล้ว ก็พอถือว่าเป็นระบบอ้างอิงเฉื่อยได้ เป็นที่น่าทึ่งที่เราสามารถพบกฎเกณฑ์ที่แม่นยำ (เรากล่าวเช่นนี้ได้เพราะว่าทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าที่แมกซ์เวลล์สังเคราะห์ขึ้นนั้นยืนยันมาจนถึงทุกวันนี้) จากสถานการณ์ที่ไม่ค่อยแม่นยำนัก

1.2 ประจุไฟฟ้า

ในขั้นตอนนี้ เราจะถือว่าประจุไฟฟ้าเป็นแบบที่เรียกว่า **จุดประจุ** (point charges) นั่นคือ ไม่มีความกว้าง ยาว หนา เป็นจุดในเชิงคณิตศาสตร์เช่นเดียวกับที่เราใช้ในเรื่องจุดมวล (point masses) ในวิชากลศาสตร์ เราจึงสามารถกำหนดตำแหน่งของจุดประจุได้อย่างแม่นยำในระบบอ้างอิง โดยกำหนดหนึ่งจุดพิชิตต่อหนึ่งจุดประจุ ณ ขณะเวลาที่เกี่ยวข้อง ตัวอย่างเช่น ประจุ q_1 อยู่ที่ตำแหน่ง (x_1, y_1, z_1) ในสเปซ ที่เวลา t_1 เป็นต้น ในกรณีที่สเปซเป็นแบบสามมิติ ซึ่งสำหรับกรณีนี้ เราอาจเลือกที่บอกตำแหน่งของประจุ q_1 ในสเปซ-เวลาโดยใช้พิชิตในสเปซ-เวลาเป็น (x_1, y_1, z_1, t_1) เลยก็น่าได้

สเปซ-เวลาแบบ (x, t) เป็นแบบสองมิติ (x, y, t) เป็นแบบสามมิติ และ (x, y, z, t) เป็นแบบสี่มิติ ระบบอ้างอิงที่เราจะเลือกใช้ในการบอกตำแหน่งของประจุในสเปซ จะเป็นแบบระบบมุมฉาก ระบบโพลาไร่ ระบบทรงกลม ระบบทรงกระบอก หรือระบบใดก็ตาม (ที่เป็นระบบเฉื่อย) นั้นขึ้นอยู่กับความสมมาตรของปัญหาที่กำลังพิจารณา จริงอยู่ที่ว่าเราสามารถแปลงพิชิตจากระบบหนึ่งไปเป็นอีกระบบหนึ่งได้ แต่การตั้งต้นด้วยระบบที่เหมาะสมจะสะดวกกว่า

1.3 กฎของคูลอมบ์ (Coulomb's law)

กฎนี้มาจากการทดลองโดยตรง ให้ผลว่าแรงระหว่างจุดประจุเป็นปฏิภาคผกผันกับกำลังสองของระยะห่างระหว่างประจุ และเป็นปฏิภาคตรงกับผลคูณเชิงพีชคณิตของประจุ แรงนี้เป็นแรงผลักถ้าประจุเป็นชนิดเดียวกัน และเป็นแรงดูดสำหรับประจุต่างชนิดกัน ทิศของแรงอยู่ในแนวเส้นตรงที่เชื่อมจุดประจุ ประโยคสัญลักษณ์สำหรับแรงนี้ก็คือ

$$f \propto \frac{q_1 q_2}{(r_{12})^2} = k \frac{q_1 q_2}{(r_{12})^2} \dots\dots\dots(1.1)$$

ซึ่งในที่นี้ k เป็นค่าคงที่ของการแปรผัน r_{12} เป็นระยะห่างระหว่างประจุและ q_1 กับ q_2 เป็นค่าของประจุ
ขนาดของ k ขึ้นอยู่กับระบบหน่วยที่ใช้ ซึ่งในระบบเอสไอ (SI units) เราวัดค่าประจุในหน่วยคูลอมบ์ (C)
วัดระยะทางในหน่วยเมตร (m) วัดแรงในหน่วยนิวตัน (N) ค่า k ถูกกำหนดโดยค่าจำกัดความให้มีค่าเป็น

$$k \equiv \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \dots\dots\dots(1.2)$$

เรียก ϵ_0 ว่า **permittivity of free space** ซึ่งคำแปลเป็นภาษาไทยอาจใช้เป็น **สภาพยอมรับของฟรีสเปซ** คำว่า **ฟรีสเปซ** อาจหมายความว่า **สุญญากาศ** ก็พอใช้ได้

ϵ_0 เองถูกจำกัดความให้เท่ากับ $\frac{1}{\mu_0 c^2}$ ซึ่ง μ_0 เป็นค่า **สภาพความซึมซาบได้ของฟรีสเปซ** (permeability of free space) ซึ่งก็ถูกจำกัดความให้มีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7} \text{ NA}^{-2}$ ส่วน c เป็นค่าอัตราเร็วของแสงในฟรีสเปซ ซึ่งก็ถูกจำกัดความเช่นกันให้มีค่าเท่ากับ $299792458 \text{ ms}^{-1}$ พอดี ดังนั้น

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \times 10^{-7} \times (2.99792458 \times 10^8)^2} \approx 8.854187817 \times 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{Nm}^2}$$

และ
$$k \equiv \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \equiv \frac{\mu_0 c^2}{4\pi} \equiv (c^2) \times 10^{-7}$$

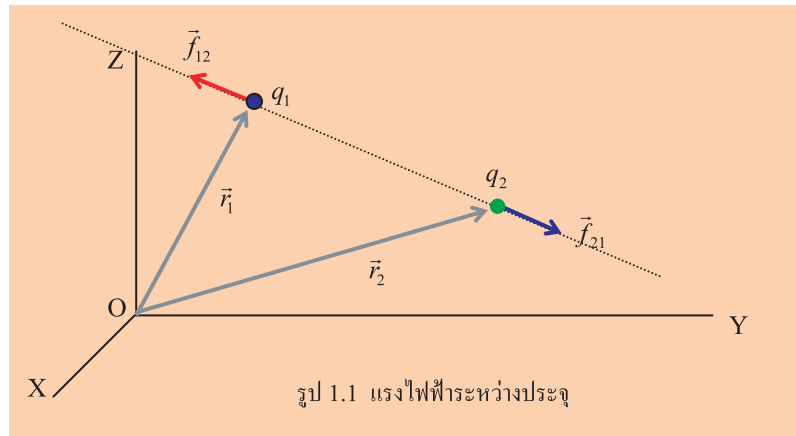
$$\therefore k \equiv 8.9875517873681764 \times 10^9 \approx 8.987551787 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}$$

ข้อสังเกต คำว่า ถูกจำกัดความ หมายความว่า ถูกกำหนดให้เป็น เราจะเห็นเหตุผลที่เขาทำเช่นนี้ชัดเจนขึ้นเมื่อศึกษาต่อไป การใส่เลข 4π ลงไปในสมการ (1.2) นั้นก็เพื่อให้สูตรและสมการที่ออกมาสวยงามในการวิเคราะห์ต่อ ๆ ไปข้างหน้านั้นสะดวกยิ่งขึ้น ไม่ดาบด้นไปด้วยเลข 4π

รูปของกฎของคูลอมบ์ในสมการ (1.1) ที่ใช้กันในปัจจุบันจึงมักเขียนเป็น

$$f = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{(r_{12})^2} \dots\dots\dots(1.3)$$

อย่างไรก็ตาม รูปสมการนี้ไม่ใช่แบบที่ดึกันที่จะก้าวไปสูงขึ้น เราจำเป็นต้องจัดให้อยู่ในรูปที่บอกทั้งขนาดและทิศทางของแรงอย่างชัดเจน การทำเช่นนี้ทำได้สะดวกโดยใช้เวกเตอร์ ดังนี้



OXYZ เป็นระบบอ้างอิงเฉื่อย $\vec{r}_1, \vec{r}_2$ เป็นเวกเตอร์บอกตำแหน่งของ q_1, q_2 ตามลำดับ $\vec{f}_{12}$ เป็นแรงที่ q_2 กระทำต่อ q_1 ส่วน $\vec{f}_{21}$ เป็นแรงที่ q_1 กระทำต่อ q_2 $\hat{r}_{21}$ เป็นเวกเตอร์หน่วยชี้จาก q_1 ไป q_2 และ $\hat{r}_{12}$ เป็นเวกเตอร์หน่วยชี้จาก q_2 ไป q_1

$$\text{และ} \quad \vec{r}_{21} \equiv \vec{r}_2 - \vec{r}_1 = -(\vec{r}_1 - \vec{r}_2)$$

$$|\vec{r}_2 - \vec{r}_1| \equiv \text{ขนาดของ } (\vec{r}_2 - \vec{r}_1), \text{ ซึ่งบ่งว่า } \hat{r}_{21} = \frac{\vec{r}_2 - \vec{r}_1}{|\vec{r}_2 - \vec{r}_1|}$$

และด้วยปริมาณเวกเตอร์เหล่านี้ เราสามารถเขียนสมการ (1.3) ใหม่เป็น

$$\vec{f}_{12} \equiv \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|^2} \hat{r}_{12} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0} \frac{(\vec{r}_1 - \vec{r}_2)}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|^3}$$

$$\vec{f}_{21} \equiv \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{|\vec{r}_2 - \vec{r}_1|^2} \hat{r}_{21} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0} \frac{(\vec{r}_2 - \vec{r}_1)}{|\vec{r}_2 - \vec{r}_1|^3} \quad \dots\dots\dots(1.4)$$

สังเกตด้วยว่า $\vec{f}_{21} = -\vec{f}_{12}$ ซึ่งต้องเป็นเช่นนั้น ตามกฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 3 ของนิวตัน

1.4 สนามไฟฟ้าในเชิงทฤษฎี

เราสามารถตีความหมายของกฎของคูลอมบ์ในสมการ (1.4) ว่า แรงไฟฟ้านั้นเกิดจากอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างประจุไฟฟ้าหนึ่งกับสนามไฟฟ้าของอีกประจุหนึ่งได้เมื่อเขียนสมการ (1.4) เป็น

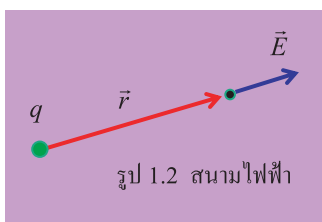
$$\vec{f}_{12} = q_1 \left\{ \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|^2} \hat{r}_{12} \right\}$$

$$\vec{f}_{21} = q_2 \left\{ \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{|\vec{r}_2 - \vec{r}_1|^2} \hat{r}_{21} \right\}$$

ปริมาณในวงเล็บปีกกา {...} คือปริมาณที่เราจะถือเป็น **ความเข้มของสนามไฟฟ้า** (electric field intensity) ดังนั้น $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|^2} \hat{r}_{12}$ เป็นสนามไฟฟ้าของประจุ q_2 ตรงจุดที่ประจุ q_1 อยู่ ส่วน $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{|\vec{r}_2 - \vec{r}_1|^2} \hat{r}_{21}$ เป็นสนามของ q_1 ตรงจุดที่ประจุ q_2 อยู่

แนวคิดนี้เท่ากับการให้คำจำกัดความของความเข้มของสนามไฟฟ้า (ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ $\vec{E}$) ที่ตำแหน่ง $\vec{r}$ ใด ๆ เทียบกับประจุ q ดังนี้

$$\vec{E} \equiv \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{r} \quad \dots\dots\dots(1.5)$$



คำจำกัดความนี้บ่งว่า เราได้เลือกจำกัดความให้สนามไฟฟ้าชี้ออกจากประจุบวก และชี้เข้าหาประจุลบ นั่นคือ สนามไฟฟ้าชี้ออกจากประจุบวก และลงเอยที่ประจุลบ แต่อันที่จริงก็มีใช้การเลือกโดยอิสระของเราแต่อย่างใด เป็นการเลือกที่ถูกกำกับโดยกฎของคูลอมบ์ (โดยกฎเกณฑ์ของธรรมชาติ) นั่นเอง

1.5 สนามไฟฟ้าในทางปฏิบัติ

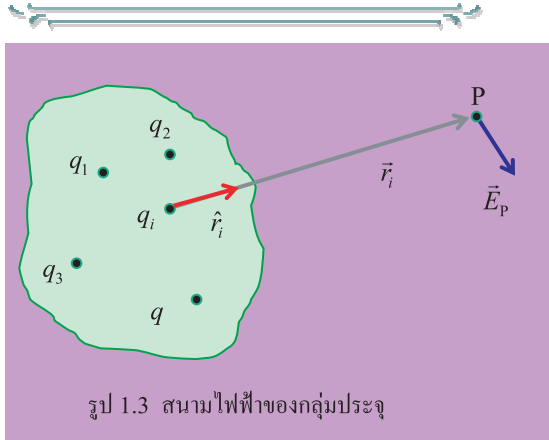
ค่าของสนามไฟฟ้าตามคำจำกัดความในสมการ (1.5) นั้น สามารถคำนวณหาได้ทันทีที่รู้ค่าของ q และ $\vec{r}$ แต่ถ้าเราจะวัดค่าสนามไฟฟ้านี้ตรง ๆ เลย จะทำอย่างไร?

โดยหลักการ เราสามารถทำได้โดยการนำ **ประจุตรวจสอบ** (test charge) $\Delta q'$ ไปวางที่ตำแหน่งที่ต้องการรู้ค่าของสนามไฟฟ้า $\vec{E}$ นั้น แล้ววัดแรง $\Delta \vec{f}$ ที่กระทำต่อประจุ $\Delta q'$ เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างประจุ $\Delta q'$ กับสนาม $\vec{E}$ ตรงนั้น ประจุ $\Delta q'$ ที่ใช้นั้นจะต้องมีขนาดเล็กมาก ๆ (มีค่าเล็กมาก ๆ) เพื่อว่าแหล่งกำเนิดของสนามไฟฟ้าจะไม่ถูกรบกวนมากจนกระทั่งอะไรที่เราวัดได้ไม่ใช่อะไรที่เราตั้งใจวัด ดังนั้นกฎของคูลอมบ์และคำจำกัดความของสนามไฟฟ้าตามสมการ (1.5) จึงบ่งว่า

$$\vec{E} = \lim_{\Delta q' \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{f}}{\Delta q'} \quad \dots\dots\dots(1.6)$$

ความสำคัญของ limit $\Delta q' \rightarrow 0$ นี้ จะชัดเจนขึ้นเมื่อเราพิจารณาสนามไฟฟ้าจากกลุ่มของจุดประจุ ซึ่งการวางตัวของจุดประจุจำนวนมากเหล่านั้นสามารถถูกเปลี่ยนแปลงจากเดิม (ก่อนทำการวัดโดยใช้ $\Delta q'$) ได้ ถ้า $\Delta q'$ มีค่าโต

1.6 สนามไฟฟ้าของกลุ่มประจุ



คำจำกัดความในสมการ (1.5) สำหรับสนามไฟฟ้าจากจุดประจุหนึ่งประจุนั้น สามารถขยายความให้ครอบคลุมกรณีสนามไฟฟ้าจากกลุ่มจุดประจุโดยอาศัย **หลักการซ้อนทับ** (The Principle of Superposition) หลักการนี้ถูกนำไปใช้เป็นแนวทางที่จะก้าวต่อไปในหลายทฤษฎีทางฟิสิกส์ หลักการนี้บ่งว่า เราควรให้คำจำกัดความสำหรับสนามไฟฟ้าที่จุด P จากกลุ่มจุดประจุ N ประจุ ดังนี้

$$\vec{E}_P \equiv \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{(r_i)^2} \hat{r}_i \quad \dots\dots\dots(1.7)$$

คำจำกัดความนี้เท่ากับกล่าวว่า สนามไฟฟ้าลัพธ์ $\vec{E}_P$ ที่จุด P นั้นมีค่าเท่ากับผลบวกแบบเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าย่อยที่จุด P อันเนื่องมาจากประจุ q_i แต่ละตัว การกระทำเช่นนี้สามารถยอมรับได้เมื่อเราจินตนาการว่าประจุตรวจสอบ $\Delta q'$ อยู่ที่จุด P นั้นมีแรงกระทำต่อมันเป็น $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\Delta q' q_i}{(r_i)^2} \hat{r}_i$ โดยประจุ q_i แต่ละตัว และถ้าแรงลัพธ์บน $\Delta q'$ เป็นผลบวกแบบเวกเตอร์ของแรงเหล่านี้ละก็ สนามไฟฟ้าลัพธ์ที่จุด P ที่วัดได้ก็จะคล้อยจองกับสมการ (1.7) อย่างไม่รู้ผิด เราควรตระหนักว่า คำจำกัดความของการบวกปริมาณเวกเตอร์นั้นอิงอยู่กับการรวมแรงอยู่แล้ว

ต่อไปนี้เป็นตัวอย่างของการคำนวณหาสนามไฟฟ้าจากกลุ่มประจุแบบต่าง ๆ

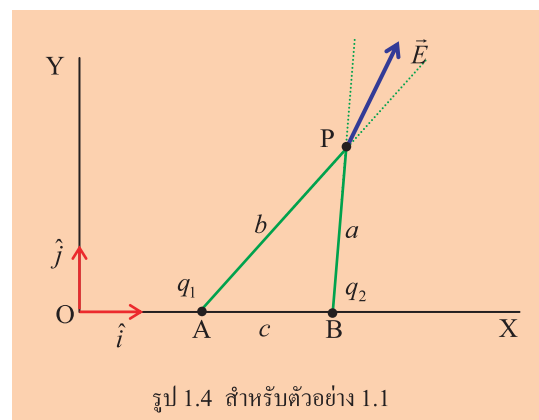
ตัวอย่าง 1.1

ประจุ q_1, q_2 อยู่ที่ตำแหน่งจุด A และ B ตามลำดับ จุด P อยู่ห่างจากจุด A เป็นระยะทาง b และห่างจากจุด B เป็นระยะทาง a ดังรูป จงหาขนาดและทิศทางของสนามไฟฟ้าที่จุด P กำหนดว่าจุด A กับ B ห่างกันเท่ากับ c

วิธีทำ

OXY เป็นระบบอ้างอิงเฉื่อย มี $\hat{i}, \hat{j}$ เป็นเวกเตอร์

หน่วยในแนวแกน $\vec{OX}$ และ $\vec{OY}$ ตามลำดับ



รูป 1.4 สำหรับตัวอย่าง 1.1

สนามไฟฟ้าที่จุด P คือ
$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{q_1}{b^2} \frac{\overrightarrow{AP}}{b} + \frac{q_2}{a^2} \frac{\overrightarrow{BP}}{a} \right]$$

องค์ประกอบของ $\vec{E}$ ในแนวแกน X ก็คือ
$$E_x = \hat{i} \cdot \vec{E}$$

องค์ประกอบของ $\vec{E}$ ในแนวแกน Y ก็คือ
$$E_y = \hat{j} \cdot \vec{E}$$

ได้
$$E_x = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{q_1}{b^2} \cos(\hat{P}\hat{A}\hat{B}) + \frac{q_2}{a^2} \cos(\hat{P}\hat{B}\hat{X}) \right]$$

$$E_y = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{q_1}{b^2} \sin(\hat{P}\hat{A}\hat{B}) + \frac{q_2}{a^2} \sin(\hat{P}\hat{B}\hat{X}) \right]$$

ซึ่งในที่นี้
$$\cos(\hat{P}\hat{A}\hat{B}) = \frac{b^2 + c^2 - a^2}{2bc} \text{ และ } \cos(\hat{P}\hat{B}\hat{X}) = \frac{b^2 - c^2 - a^2}{2ac}$$

สังเกตว่า
$$|\vec{E}| = (E_x^2 + E_y^2)^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\left(\frac{q_1}{b^2} \right)^2 + \left(\frac{q_2}{a^2} \right)^2 + \frac{2q_1q_2}{b^2a^2} \cos\theta \right]^{\frac{1}{2}}$$

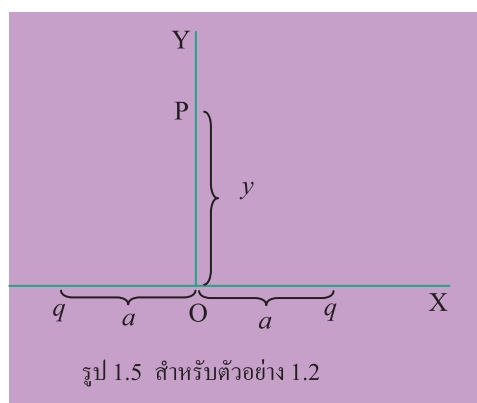
ซึ่ง
$$\cos\theta = \frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab}$$

ตัวอย่าง 1.2

จงหาค่าของ y ในรูปของ a ที่จะทำให้สนามไฟฟ้าที่จุด P มีขนาดโตที่สุด และหาด้วยว่าค่าของสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งนี้เป็นเท่าไร

วิธีทำ

สนามไฟฟ้าลัพท์ที่จุด P มีทิศชี้ขึ้นถ้า q เป็นบวก องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแนวแกน X หักล้างกันหมด



$$E_p = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{qy}{(y^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}} \right] \times 2$$

E_p จะมีค่าโตที่สุดที่ตำแหน่ง y ที่ทำให้ $\frac{d}{dy} E_p = 0$ นั่นคือ ที่ตำแหน่งที่ $(y^2 + a^2)^{\frac{3}{2}} - 3y^2(y^2 + a^2)^{\frac{1}{2}} = 0$

$$\therefore y = \frac{a}{\sqrt{2}} \approx 0.707a$$