

อหุกรรมวิทยาสาสตร์

# แม่เหล็ก-ไฟฟ้าภาคทฤษฎี

ตอห 1-2

## แม่เหล็กและไฟฟ้าสถิต



กรมอาชีวศึกษา  
กระทรวงศึกษาธิการ

ป  
๕๓๓  
๑



ก 06108 - ก 06109



อนุกรมวิทยาศาสตร์  
**แม่เหล็กไฟฟ้าภาคทฤษฎี**

ตอน 1 - 2

**แม่เหล็กและไฟฟ้าสถิต**

นายบุญถิ่น อัตถากร B. Sc., A.R.C.S.

อาจารย์ประจำกรม กระทรวงศึกษาธิการ

เรียบเรียง:

พิมพ์ครั้งที่หนึ่ง 1000 ฉบับ

พ.ศ. 2490

ราคาเล่มละ 12 บาท

สงวนลิขสิทธิ์

ก 06108 41





## คำนำ

หนังสืออนุกรมวิทยาศาสตร์ ว่าด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าเล่มนี้ นายบุญถิ่น  
อรรถากร เป็นผู้เรียบเรียง และได้พิมพ์ขึ้นจำหน่ายมาครั้งหนึ่งแล้ว บัดนี้  
ผู้เรียบเรียงได้แก้ไขให้ดีขึ้นและเหมาะสมยิ่งขึ้น เพื่อให้ใช้ได้ในระดับมัธยมศึกษา  
ศึกษาและอาชีวศึกษาชั้นสูง ตลอดจนครูประถมและมัธยม ผู้เรียบเรียง  
ได้มีจิตศรัทธา มอบลิขสิทธิ์หนังสือนี้ให้แก่กระทรวงศึกษาธิการ เพื่อเป็น  
วิทยาทานให้กุลบุตรและกุลธิดาของประเทศไทยได้ใช้เล่าเรียนสืบไป กระทรวง  
ศึกษาธิการขอขอบคุณในกุศลเจตนาทั้งนี้เป็นอย่างยิ่ง และได้จัดพิมพ์หนังสือ  
ขึ้นจำหน่ายให้แพร่หลายต่อไป.

กระทรวงศึกษาธิการ



# บัญชีเรื่อง

## ตอนที่ 1 แม่เหล็ก

บทที่ 1 สมบัติทั่ว ๆ ไปของแม่เหล็ก — แม่เหล็กธรรมชาติและแม่เหล็กประดิษฐ์ — สมบัติ และ กริยาต่าง ๆ ของแม่เหล็ก — การเหนี่ยวนำ — แม่เหล็กชั่วคราวและแม่เหล็กถาวร — แม่เหล็กไฟฟ้าและแม่เหล็กถาวร — โลกคือแม่เหล็กแท่งใหญ่ — วิธีทำแม่เหล็ก — แม่เหล็กในรูปและลักษณะต่าง ๆ — การเป็นแม่เหล็กตามส่วนต่าง ๆ ของแท่งเหล็ก — การอิมตัวและการอิมตัวขึง — การเก็บรักษาแม่เหล็กให้ม่กำลึงลงตัว — อำนาจการยกของแท่งแม่เหล็ก — สนามแม่เหล็กเส้นแรงและเส้นเหนี่ยวนำ — หลอดแรง หลอดเหนี่ยวนำ และฟลักซ์แม่เหล็ก — การบิดและหดตัวของสารแม่เหล็ก เมื่อเวลากลายเป็นแม่เหล็ก — ทฤษฎีแม่เหล็ก หน้า 1—20

บทที่ 2 ทฤษฎีเบื้องต้น — กฎของคูลอมบ์ — ความแรงขั้ว — ความเข้มของสนามแม่เหล็ก — แรงระหว่างแท่งแม่เหล็ก — ศักดา หน้า 21—49

บทที่ 3 เครื่องมือสำหรับใช้ในการทดลอง — แม็กนีโตมิเตอร์ให้ — การเปรียบเทียบความเข้มของสนามแม่เหล็ก — ความยาวจริงของแท่งแม่เหล็ก — แม็กนีโตสโคป — แม็กนีโตมิเตอร์แกว่งกวัด — การหาความเข้มของสนามแม่เหล็ก และ โมเมนต์แม่เหล็ก — คาข้งความบิด — โจรบัตวอข้าง หน้า 49—72

(ข)

บทที่ 4 สมบัติของสารแม่เหล็ก - ความซาบซึมได้  $\mu$  - และอำนาจการรับ  
เป็นแม่เหล็ก  $k$  - การเหนี่ยวนำและความเข้มของสนาม - กฎ  
ของเกาส์ - การเหนี่ยวนำในเหล็กและชนิดของสารในวิชาแม่  
เหล็ก - การวัด  $\mu$  และ  $k$  - อีส์ตริซึส หน้า 73-90

บทที่ 5 แม่เหล็กโลก - มุมเท. มุมบ่ายเบน และความเข้มของสนามแม่  
เหล็กโลก - แผนที่แม่เหล็กโลก - การเปลี่ยนแปลงของสนาม  
แม่เหล็กโลก - เข็มทิศเดินเรือ - โจทย์เปิดเคล็ด หน้า 90-106

## ตอนที่ 2 ไฟฟ้าสถิต

บทที่ 6 สมบัติทั่ว ๆ ไป - กิริยาระหว่างประจุ - ทฤษฎีไฟฟ้าสถิต -  
ตัวนำและฉนวน - อิเล็กโตรสโคป - การเหนี่ยวนำ - ศักดา -  
ศักดาของดิน - การประจุไฟฟ้าโดยการเหนี่ยวนำ - การใช้อิเล็กทรอนิกส์  
โคโรสโคป - ประจุบนส่วนต่างๆ ของตัวนำ - ไดอิเล็กตริก -  
สนามไฟฟ้าสถิต หน้า 107-134

บทที่ 7 คำนวณเกี่ยวกับไฟฟ้าสถิต - หน่วยประจุ. แรง และสนาม -  
ศักดา - ความจุของตัวนำ - พลังงานศักยะ - ตัวนำที่มีประจุ  
สัมผัสกัน หน้า 135-156

บทที่ 8 เครื่องตัวเรขไฟฟ้าสถิตต่าง ๆ - เครื่องควบแน่น (Condenser)  
ต่าง ๆ - การต่อเครื่องควบแน่น - เครื่องวัดควอดรนต์อิเล็กทรอนิกส์  
มิเตอร์ - อิเล็กโตรฟอรัส - เครื่องกลวิมเชิสต์ - ฟ้ำผ่า ฟ้ำร้อง  
สายล่อฟ้า. หน้า 156-177

# แม่เหล็ก

## บทที่ 1

### สมบัติทั่ว ๆ ไปของแม่เหล็ก

การดำเนินการเกี่ยวกับอุปกรณ์ หรือ เครื่อง สำเร็จ ไฟฟ้า ทุกประเภท ย่อมมี ความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับแม่เหล็ก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทบทวนความรู้เกี่ยวกับแม่เหล็ก ซึ่งเป็นพื้นฐานของเครื่องเหล่านี้ให้ละเอียด

แม่เหล็กที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินการทั่ว ๆ ไปในชีวิตของมนุษย์นั้นอาจแบ่งออก ได้เป็นสองชนิดใหญ่ ๆ คือ แม่เหล็กถาวร และ แม่เหล็กไฟฟ้า แม่เหล็กถาวรนั้น เป็นแท่งเหล็กกล้า หรือ โลหะเจือซึ่งมีสมบัติเป็นแม่เหล็กในตัวเอง และรักษาสภาพแม่เหล็ก นี้ได้เป็นเวลานาน ๆ ส่วนแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นเหล็กอ่อนซึ่งลวดไฟฟ้าพันรอบ ส่วนจากกระแสไฟฟ้าตรงที่ผ่านเข้าไปในลวดทำให้เหล็กอ่อนเปลี่ยนสภาพเป็นแม่เหล็กได้แรงมาก ในการทำแม่เหล็กนั้นจะเห็นได้ว่าจำเป็นต้องใช้ลวดบางชนิดซึ่งกลายเป็น แม่เหล็กได้ เมื่อมีอำนาจ แม่เหล็ก เหนี่ยวนำ วัสดุเช่นนี้ เขาเรียกว่า สารแม่เหล็ก หรือ วัสดุแม่เหล็ก วัสดุสำหรับทำ แม่เหล็กถาวรเมื่อ ถูกเหนี่ยวนำแล้วจะรักษาสภาพแม่เหล็กที่เกิดขึ้นไว้ ได้ ส่วนวัสดุสำหรับทำแม่เหล็ก ไฟฟ้า รับรียา แม่เหล็ก จาก กระแสไฟฟ้า ซึ่ง ถ้าถึง โหลด หยุด แต่มันจะกลับไปอยู่ใน สภาพธรรมดา อย่าง เดิม เมื่อ กระแส ไฟฟ้าหยุดไหล ดังนั้น จะเห็นได้ว่าวัสดุแม่เหล็กมีสมบัติในเชิงแม่เหล็กแตกต่างกันดังกล่าวแล้ว และอาจได้ผลผลิตกันได้มากในกรณีต่าง ๆ เหตุฉะนั้นในการทำแม่เหล็กจึงจำเป็นต้องเลือกวัสดุให้เหมาะสมกับ หน้าที่ที่เราจะใช้ เหล็กมีสมบัติแม่เหล็กดีกว่าวัสดุชนิดอื่น ๆ นิกเกิลและโคบอลต์มีสมบัติ ก่อนข้างแล้ว แม่เหล็กที่ดีต้องออกซิเจนเหลือน้อย โลหะเจือซึ่งมีเหล็กโคบอลต์ นิกเกิลและโลหะ อื่น ๆ เช่น ฮาตุมีเนียมเป็นแม่เหล็กถาวรได้แรงมาก ส่วนโลหะเจือซึ่งมีเหล็กกับซิลิกอน

หรือ เหล็กกับนิกเกิลเหมาะสำหรับทำแม่เหล็กไฟฟ้า

## 1. แม่เหล็กธรรมชาติและแม่เหล็กประดิษฐ์

แม่เหล็กธรรมชาติเป็นสารประกอบชนิดหนึ่งของเหล็กและออกซิเจน ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )  
มีสมบัติดึงดูดผงตะไบเหล็กและขี้เหล็กเห็นอยู่      สารประกอบชนิดนี้เกิดขึ้นตามธรรมชาติ  
และเป็นแม่เหล็กชนิดถาวร

ถ้าเอาแม่เหล็กธรรมชาตินี้กับ เหล็กกล้า แท่งเหล็กล้วนๆ จะกลายเป็นแม่เหล็ก

ซึ่งมีสมบัติเหมือนกับแม่เหล็กธรรมชาติ คือ

จะดึงดูดเหล็กและเมื่อแขวนให้อยู่ในแนวนอน

ก็จะชี้ไปในทิศทางหนึ่งทิศทางใดเสมอ

แม่เหล็กที่พบเห็นและใช้ประกอบในการ

ทดลองในทุกวันนี้ เป็นแม่เหล็กที่ทำขึ้น



รูปที่ 1

ส่วนแม่เหล็กธรรมชาติก็มีตามพิพจน์ที่ สำหรับเป็นตัวอย่าง

## 2. สมบัติและกิริยาต่างๆ ของแม่เหล็ก

### ก. ขั้ว

จุดสองจุดที่ปลาย ของแท่ง แม่เหล็ก ซึ่งเป็นขั้ว กดาง แท่งการ ดุด  
ดึงดูดเหล็ก เรียกว่า ขั้ว และเมื่อแขวนตรงกลาง ปลายทั้งสองไปทางทิศเหนือเรียกว่า  
ขั้วเหนือ N ปลายทั้งสองไปทางทิศใต้เรียกว่า ขั้วใต้ S

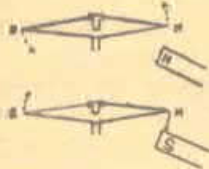
ตามปรกติขั้วของแม่เหล็กจะไม่อยู่ที่ปลายทีเดียว อาจอยู่ห่างจากปลาย  
ถึงหลายมิลลิเมตร เรา อาจจะทดลองให้เห็นชัดได้โดยเอาผงตะไบ โรยบนแผ่นกระดาษ  
แข็ง ซึ่งวางทับแท่งแม่เหล็ก แล้วเคาะแผ่นกระดาษแข็งนั้นเบาๆ ผงเหล็กจะไปรวม  
อยู่รอบจุดทั้งสองซึ่งเรียกว่า ขั้ว มากที่สุด และแทบจะไม่ อยู่ส่วน กดาง ของแท่ง  
แม่เหล็กเลย จากการทดลองนี้ จะเห็นได้ว่า ขั้วของแม่เหล็กไม่เป็นจุดจริง ๆ และ  
แสดงว่ามีอาณาเขต

ไม่ว่าจะพลิกแม่เหล็กให้ข้างใดขึ้นก็ตาม แล้วแขวน จะมีเส้นหนึ่งของแม่เหล็กที่

ตามแนวเค็มเดิม  $\vec{u}$  จะผ่าน  $\vec{v}$  ทั้งสองของแม่เหล็ก และเขาให้ชื่อว่า แกนแม่เหล็ก และแนวที่เข็มทิศเรียกว่า เวนิเดียนแม่เหล็ก

### ข. กิริยาระหว่างขั้ว

เวลาเขาขั้วทั้งสองไปทางทิศเหนือของแม่เหล็ก 2 แท่งมาวางไว้ใกล้ ๆ กัน ขั้วทั้งสองนั้นจะดึงดูดกันหรือผลักกัน ขั้วใดของขั้วใดที่ปรากฏว่าดึงดูดกัน แต่ขั้วหนึ่งพยายามดึงดูด



รูปที่ 2

ขั้วใดเขามาหาเดิม  $\vec{u}$  จะทำการทดลองได้ง่าย ๆ โดยเขาแท่งแม่เหล็กเขามาใกล้เข็มทิศที่แรกเขาปลายเหนือเขาหาขั้วเหนือ จะเห็นว่า ขั้วเหนือดึงดูดขั้วเหนือ และเขาขั้วใดเขาหาขั้วใด  $\vec{u}$  มันก็จะดึงดูดกันอีก นั่นคือของเขา

ขั้วเหนือเขาหาขั้วใด  $\vec{u}$  เราจะเห็นว่า มันดึงดูดกัน และขั้วใดของแท่งแม่เหล็กก็จะดึงดูดขั้วเหนือของเข็มทิศ เพราะฉะนั้นจึงอาจรวมความได้ว่า

1. ขั้วเหมือนกันจะดึงดูดกัน
2. ขั้วไม่เหมือนกันจะผลักกัน

### ค. ขั้วทั้งสองของแม่เหล็กจะเกิดขึ้นพร้อมกันเสมอ

เมื่อเขาแท่งแม่เหล็กถาวรมา 'หัก' เป็นชิ้น ๆ ทุก ๆ ชิ้นจะเป็นแม่เหล็ก นั่นคือมีขั้วแม่เหล็กทุกประการ เช่น มีขั้วเหนือและขั้วใต้ จากการทดลอง ไม่เคยปรากฏเลยว่าขั้วหนึ่งขั้วใดของแม่เหล็กจะอยู่โดด ๆ ได้ นั่นคือ ไม่มีแท่งแม่เหล็กใด ๆ ที่มีเฉพาะขั้วเหนือหรือเฉพาะขั้วใต้

### ง. ขั้วทั้งสองของแท่งแม่เหล็กแท่งหนึ่งมีความแรงของขั้วเท่ากัน

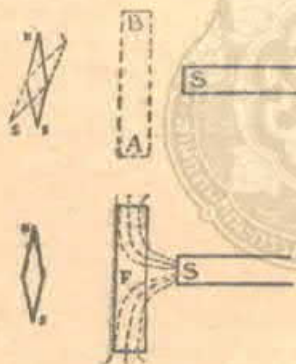
นี้หมายความว่า แรงดึงดูดหรือแรงขับเคลื่อนขั้วใด ๆ จาก ขั้วทั้งสองของแม่เหล็กเท่า ๆ กัน จะเท่ากัน

เหตุผลซึ่งแสดงว่า ขั้วมีความแรงเท่ากัน ก็คือ —

1. เมื่อเอาแม่เหล็กวางลงบนไม้กอร์ก ใต้อวน้ำ แม่เหล็กจะหมุนรอบตัวเองจนขั้วเหนือชี้ได้ แล้วก็จะหยุด แต่จะไม่เคลื่อนที่ตามแนวตั้งตรงเลย นี่แสดงให้เห็นว่าการดึงดูดและการขจัด เนื่องจากแม่เหล็กโลกเท่ากัน แต่เพราะว่า สนาม แม่เหล็ก (บริเวณที่มีอำนาจแม่เหล็ก) ที่จุดนั้นเป็นเขตรูป หนึ่งคือมีค่าสม่ำเสมอ ฉะนั้นความแรงของขั้วก็เท่ากัน

2. เหล็กกล้า เมื่อยังไม่เป็นแม่เหล็กและเมื่อเป็นแม่เหล็กแล้วน้ำหนักเท่ากัน นี่แสดงว่าแรงดึงดูดและแรงขจัดบนแท่งแม่เหล็ก เนื่องจากสนามแม่เหล็กโลกเท่ากัน และน้ำหนักที่ขจัดโลกบนและห้อยเป็นแม่เหล็กก็เนื่อง จากความ ล่อง ของ โลกล้วนนี้ ส่วนอำนาจแม่เหล็ก เนื่องจากแม่เหล็กโลกเท่ากัน และตรงกันข้ามจึงทำลายกันพอดี

#### จ. ถริยาแม่เหล็กผ่านและในตุ๊กกลางต่าง ๆ



รูปที่ 3

อำนาจของแม่เหล็ก อาจปรากฏในตุ๊กกลางต่าง ๆ ได้ โดยมากเจตนาเอาเอาแม่เหล็กมาวางข้าง ๆ เข็มทิศ เข็มทิศก็จะเหวี่ยงไปจากแนวเมริเดียนแม่เหล็ก และเมื่อนำเอาแผ่นไม้ กระดาษหรือทองเหลือง AB มาวางบนเข็มทิศก็จะเหวี่ยงอย่างเดิม แต่ถ้านำเอา แผ่นเหล็กหรือนิกเกิล F มา ขึ้น

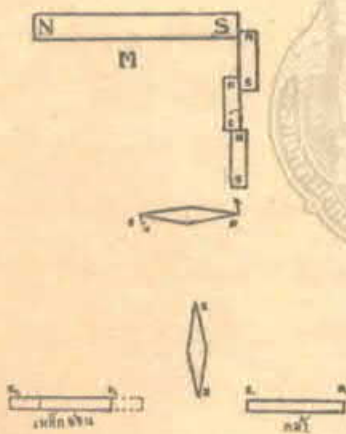
เข็มทิศจะเหวี่ยงของ ถูแผ่นเหล็กหรือนิกเกิลนั้นหนาแน่นเข็มทิศจะไม่เหวี่ยง นี่แสดงให้เห็นว่า เหล็กและนิกเกิลบังกันอำนาจแม่เหล็กไม่ให้ ผ่านไปในตุ๊กกลาง ซึ่งอยู่ถัดไปและเราเรียกสิ่งที่ทำหน้าที่เช่นนั้นว่า ฉากแม่เหล็ก (Magnetic Screen)

ฉะนั้นถ้าไม่ต้องการให้อำนาจแม่เหล็กแผ่เข้าไปในบริเวณใด ก็ต้องใช้ฉากแม่เหล็กหุ้มบริเวณนั้นไว้

ฉากแม่เหล็กที่ใช้กันมักเป็นทรงกลมกลวงทำด้วยเหล็กอ่อนซึ่งมีความหนาพอสมควร ถึงแม้ว่าฉากนั้นจะกันสนามแม่เหล็กที่ไม่ต้องการไม่ให้เข้าไปในเครื่องสำเร็จ สำหรับวัดปริมาณไฟฟ้าเช่น กัลวานอมิเตอร์ได้ทั้งหมด แต่ก็ยังนับว่าช่วยลดความเข้มที่ผ่านเข้าไปในบริเวณที่ไม่ต้องการได้มาก เพื่อให้ได้ผลดีขึ้น บางทีเขาใช้ทรงกลมกลวงบางๆ หลายอันซ้อนกัน แทนที่จะใช้อันเดียวซึ่งมีเนื้อเหล็กหนาเท่ากัน

#### ฉ. การเหนี่ยวนำแม่เหล็ก

เมื่อแท่งเหล็กอ่อนวางอยู่ใกล้แท่งแม่เหล็ก เหล็กอ่อนก็จะกลายเป็นแม่เหล็กทันที ปรากฏการณ์ของแม่เหล็กต่อวัตถุแม่เหล็กเราให้ชื่อว่า การเหนี่ยวนำแม่เหล็กพูดโดยทั่วๆ ไป ฉากแม่เหล็กทั้งหลาย เมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก จะถูกเหนี่ยวนำให้เป็นแม่เหล็กไม่มากนักเลย และจะมากเท่าใดขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ของฉากนั้น ปลาย



รูปที่ 4

ใกล้ของแท่งเหล็กอ่อนจะมีชนิดขั้วตรงกันข้ามกับขั้วของแม่เหล็ก ซึ่ง ขั้วใกล้เสมอ ซึ่งอาจจะแสดงได้โดยนำเอาเข็มทิศมาวางไว้ใกล้ปลายอีก ข้างหนึ่งของเหล็กอ่อน ดังในรูป 4 ก. ขั้วใต้ของเข็มทิศจะถูกดึงดูดเข้า ไปหาเหล็กอ่อน เมื่อนำเอาเหล็กอ่อนหลายๆชิ้นมาต่อกัน ผลก็จะเป็นเช่นเดียวกัน เมื่อเอาเหล็กอ่อนวางไว้ ทาง ขั้วใต้ของ

แม่เหล็ก ปลายของแท่งเหล็กอ่อนที่อยู่ห่างจากแท่งแม่เหล็กจะเป็น ขั้วใต้และจะถูกดึงดูดของเข็มทิศ

อำนาจการเหนี่ยวนำในวัตถุต่าง ๆ โดยเข็มทิศอันเดียวกันเกิดขึ้นไม่เท่ากัน เช่น ถ้านำเอาแท่งเหล็กเข้ามาล้อมแท่งๆ หนึ่งเป็นเหล็กอ่อน และอีกแท่งเป็นเหล็กกล้า มาวาง

ไว้สองข้างของเข็มทิศ ให้ระยะห่างเท่า ๆ กัน ดังในรูป 4 ข. เข็มทิศจะเหวี่ยงไปหาข้างที่เป็นเหล็กอ่อนมากกว่า นี่แสดงว่าเหล็กอ่อนมีความแรงกว่า ถ้าไม่ต้องการให้เข็มทิศเหวี่ยง ต้องเคลื่อนแท่งเหล็กอ่อนให้ห่างไปอีกพอสมควร นี่แสดงว่าเหล็กอ่อนถูกเหนี่ยวนำได้ง่ายกว่าเหล็กกล้า

ถ้าใช้แท่งแม่เหล็กแทนเข็มทิศ เมื่อนำเอาแท่งแม่เหล็กออกไปแล้วเคาะแท่งเหล็กทั้งสองข้างวางอยู่ข้าง ๆ ก็จะได้ปรากฏว่า เหล็กอ่อนหมดอำนาจการเป็นแม่เหล็ก ส่วนเหล็กกล้านั้นคงจะมีสถานะแม่เหล็กเหลืออยู่ (Residual Magnetism หรือ Remanence) นี่แสดงให้เห็นว่า เหล็กกล้าจะกลายเป็นแม่เหล็กและหมดสถานะแม่เหล็กได้ยาก กว่าเหล็กอ่อน เราจึงถือว่าเหล็กกล้ามีความยึดเหนี่ยวสถานะแม่เหล็กดี (Retentivity) มากกว่าเหล็กอ่อน แรงซึ่งจะทำให้แม่เหล็กหมดอำนาจนี้เราเรียกว่า แรงบังคับโมเลกุล แรงนี้จะรักษาสถานะแม่เหล็กด้วย (Coercive Force) ฉะนั้นเราจึงใช้อำนาจแม่เหล็กเหนี่ยวนำหรือบังคับ โมเลกุล ของเหล็กกล้าให้ตรงตัวกัน เป็นระเบียบได้ยาก และเมื่อมันเรียงตัวอย่างไรแล้ว ก็ยากที่เราจะ ให้มันเปลี่ยนสภาพได้ ส่วนในเหล็กอ่อนนั้น โมเลกุลจะเรียงตัวง่าย เมื่อมีอำนาจแม่เหล็กบังคับ แต่เมื่อไม่มีอำนาจแม่เหล็ก มันก็จะเปลี่ยนสภาพได้ง่ายและเร็วด้วย

อนึ่งถ้าแม่เหล็กสองแท่งซึ่งมีความแรงมากกว่ากันหลายเท่ามาวางให้ ขั้วชนิดเดียวกันหันเข้าใกล้กัน แลรตัวนำแท่งที่มีความแรงมากกว่าเข้าไปเร็ว ๆ ขั้วแม่เหล็กทั้งสองนั้นจะปรากฏว่าดูดกัน แทนที่จะผลักกัน อาการเช่นนี้จะขัดแย้งกับกฎของคูลอมบ์ แต่ความจริงหาได้ขัดแย้งกับกฎนี้ไม่ การที่แม่เหล็กดูดดึงดูดกันก็เพราะว่าขั้วแม่เหล็กซึ่งมีความแรงมากกว่ากันนั้นเหนี่ยวนำเอาขั้วที่มีความแรงน้อยกว่าได้ และทำให้ขั้วที่มีความแรงน้อยกลับลักษณะขั้ว เป็นชนิดตรงกัน ข้ามตาม หลักการเหนี่ยวนำจึงเกิดการดึงดูดกันขึ้น ฉะนั้นในการเก็บแท่งแม่เหล็กสองแท่งไว้ด้วยกันในหีบ เราจึงวาง

ซึ่งต่างชนิดไว้ด้วยกัน และเขาเหล็กอ่อนสองแท่งคุมไว้ที่ปลายทั้งสองเพื่อบัง กัน การ  
เหนียวนำคัตเอง

### 3. แม่เหล็กชั่วคราวและแม่เหล็กถาวร

เหล็กเมื่ออยู่ใกล้แท่งแม่เหล็ก ก็จะกลายเป็นแท่งแม่เหล็กโดยอำนาจสนาม  
คัตที่ได้กล่าวมาแล้ว เมื่อนำเอาแม่เหล็กออกไปไกล ๆ เหล็กบางชนิดก็กลับ สภาพเป็น  
เหล็กธรรมดาอย่างเดิม แต่เหล็กบางชนิดก็ยังคงเป็นแม่เหล็กอยู่ นี่แสดงให้เห็นว่า  
เหล็กชนิดแรกดำรงการเป็นแม่เหล็กโดยอำนาจของตัวเองไม่ได้ แม่เหล็กชนิดนี้เรียกว่า  
แม่เหล็กชั่วคราว เหล็กชนิดนี้ไม่มีสมบัติที่จะยึดเหนี่ยวสภาพแม่เหล็ก (Retentivity)  
ไว้เลย ส่วนชนิดที่สองมีอำนาจที่จะรักษาสภาพแม่เหล็กที่ได้รับจากการเหนียวนำได้ และแม่  
เหล็กซึ่งทำจากเหล็กชนิดหลังนี้ คือ แม่เหล็กถาวร ถ้าหากว่าสารใดเป็นแม่เหล็กได้แรง  
กว่าสารชนิดหนึ่ง เมื่อเราหยุดใช้หรือขจัดหรือถอนแม่เหล็กแล้ว สารนั้นก็มีอำนาจ  
ยึดเหนี่ยวสมบัติแม่เหล็ก ได้ดีกว่าอีกสารหนึ่ง

ควรจะเข้าใจให้แจ่มแจ้งว่า แม่เหล็กถาวรไม่จำเป็น ต้อง เป็น สาร ประกอบ  
( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) ซึ่งเกิดขึ้นตามธรรมชาติเท่านั้น อาจจะเป็นเหล็กกล้าธรรมดาหรือเหล็ก  
ที่ผสมกับธาตุชนิดอื่น ตามปกติแม่เหล็กชั่วคราวเป็นเหล็กอ่อน และเหล็กที่ผสมด้วย  
คาร์บอน 0.4 ถึง 0.6 % กับ คังเด็น 5 ถึง 8 % หรือกับโมลิบดีนัมราว 4 %  
จะช่วยให้เป็นแม่เหล็กถาวรได้ เพราะฉะนั้นควรจำไว้ด้วยว่าสิ่งใดจะเป็นแม่เหล็กถาวร  
ได้หรือไม่ ก็ย่อมแล้วแต่ว่าถึงนั้นทำด้วยอะไรและอย่างไร ไม่เนื่องจากบ่งเกิดของสนาม  
แม่เหล็กที่ใช้ทำให้นั้นกลายเป็นแม่เหล็ก (ดูหัวข้อ 4-6 ประกอบ) แต่จะทำให้ได้แรงคัต  
หรือไม่เหนียวแน่นแล้วแต่จะทำได้ (ดูตอนว่าด้วยวิธีทำแม่เหล็ก)

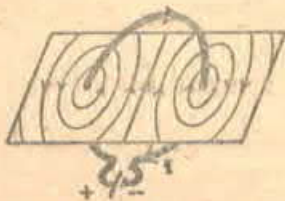
เหล็กกล้าธรรมดา (Steel) คือ เหล็กที่ผสมกับคาร์บอนราว 0.2 - 1.5 %

เหล็กกล้าสำหรับทำแม่เหล็กบางชนิดมีส่วนผสมต่างไปจากนี้ เช่น อาจจะมี

โครเมียมและนิกเกิลผสมกับเหล็กก็ได้ (ดูในหัวข้อต่อไป)

#### 4. แม่เหล็กไฟฟ้าและแม่เหล็กถาวร

แม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อกระแสไฟฟ้าตรงผ่านไปตามลวดก็จะมีอำนาจแม่เหล็กเกิดขึ้นรอบๆ ทั้งๆ ที่ลวดนั้นมิได้กลายเป็นแม่เหล็ก อำนาจแม่เหล็กเนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลไปตามลวดนั้น อาจเห็นได้ชัดโดยวางลวดให้ตั้งตรงขึ้น เมื่อนำเข็มทิศเข้าไปใกล้ๆ เข็มทิศก็เบนไปจากแนวเมริเดียนแม่เหล็กโลก ถ้าขดลวดให้เป็นวงด้านปลายทั้งสอง



รูปที่ 5

ของขดลวดก็จะได้ดังคล้ายกับว่ามีขั้วแม่เหล็ก ถ้าขดลวดเป็นขดยาวๆ คล้ายกระบอง อำนาจของขดลวดจะปรากฏชัด และขดลวดเช่นนี้จะทำหน้าที่คล้ายแท่งแม่เหล็กยาวๆ เราเรียกขดลวดเช่นนี้ว่า โซลินอยด์ ดังนั้นแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าเท่านั้นไม่ค่อยเข้มนัก แต่ถ้าเอาเหล็กอ่อนหรือเหล็ก

กล้าละมุด (Mild steel) ดัดเข้าไปในขดลวดให้เป็นแกน ก็จะได้อำนาจแม่เหล็กเพิ่มขึ้นอีกมาก แกนเหล็กหรือเหล็กกล้าธรรมดาจะทำให้อำนาจแม่เหล็กแรงขึ้นประมาณ 40 ถึง 2000 เท่าของเมื่อไม่มีแกน ถ้าใช้เหล็กกล้าชนิดที่เรียกว่า ไดร์ริงขึ้นประมาณ 5700 ถึง 8700 เท่า ดังนั้นถ้าต้องการอำนาจแม่เหล็กเข้มๆ เราจึงใช้โซลินอยด์แม่เหล็กหรือเหล็กแข็งเป็นแกน เราเรียกแม่เหล็กชนิดนี้ว่า แม่เหล็กไฟฟ้า

แม้ว่าทั่วๆ ไป เรามักใช้เหล็กหล่อเป็นแกนของแม่เหล็กไฟฟ้า แต่ในบางกรณีเหล็กหล่อก็ไม่ค่อยเหมาะ เช่นในกรณีที่อำนาจเหนี่ยวนำมีความเข้มต่ำ เหล็กกล้าชนิดหนึ่งที่มีขดลวดเหนี่ยวนำประมาณ 2 ถึง 4 % มีคุณภาพดีกว่าเหล็กหล่อแต่ในกรณีที่ค่าของกระแสไฟฟ้าไม่คงตัวหรือเป็นกระแสสลับ เหล็กกล้าชนิดหนึ่งที่มีขดลวดเหนี่ยวนำ 40 ถึง 60 % จะมีคุณภาพและเหมาะสมกว่าเหล็กกล้าชนิดหนึ่ง เหล็กกล้าชนิดที่ดีที่สุด คือ เปรอมนิกเกิลชนิดหนึ่งที่มีขดลวดเหนี่ยวนำถึง 78.2 % และเหล็กประมาณ 21.4 % นอกนั้นเป็นธาตุอื่น ๆ

แม่เหล็กไฟฟ้ามีรูปค่าง ๆ กัน ถ้าต้องการอำนาจเข้มมากเราทำให้ขั้วอยู่ใกล้

กัน (ดูในหัวข้อต่อไป) และพันธุ์ดัดหลาย ๆ รอยและหลาย ๆ ชั้น ถ้าต้องการสำเนาไม่  
ค่อยเข้มนัก ก็ทำตามอธิบายไว้คร่าว ๆ ข้างบน และดังในรูปที่ 8

**แม่เหล็กถาวร** แม่เหล็กไฟฟ้ามีลักษณะทำนองเดียวกับแม่เหล็กชั่วคราว คือ  
มีอำนาจแม่เหล็กเฉพาะขณะที่มีกระแสไฟฟ้า และอำนาจจะมากหรือน้อยก็อาศัยสมบัติ  
ของแกนและค่าของกระแสไฟฟ้า ดังนั้นจึงมีประโยชน์มากในเมื่อเราต้องการบังคับควบคุม  
อำนาจและต้องการความเข้มมาก ๆ แต่แม่เหล็กไฟฟ้านี้ยอมไม่สะดวกสำหรับของเคลื่อนที่  
และในเมื่อไม่มีกระแสไฟฟ้า ดังนั้นจึงจำกัดจนกว่าหาวัสดุที่มีเทคนิควัด และแรงโคเอซิฟ  
สูง ๆ เพื่อให้เป็นแม่เหล็กถาวรที่มีอำนาจมากและทนทานต่อการกระทบกระเทือนต่าง ๆ  
ความก้าวหน้าในการประดิษฐ์แม่เหล็กถาวรได้รวดเร็วขึ้นในสมัยวิทยุ เมื่อ 20 ปีก่อน  
เหล็กกล้าดีดัดเค้น ถิ่นว่าเป็นวัสดุดี คือมีน้ำหนักดีกล้างชาติมีน้ำหนักได้ค้นพบวัสดุใหม่ ๆ  
ซึ่งดีขึ้นเป็นลำดับดังนี้ เหล็กกล้าโคบอลต์ของ สอนดา เหล็กกล้า निकเกิล-ฮาตัมเนียม  
ของมิชิมา และโลหะเจือ निकเกิล-โคบอลต์-ดีคาเนียม ของฮอนดาง นอกจากนี้ยังมีโลหะเจือ  
ของอเมริกาชื่อ อัลนิโก ส่วนผสมคิดเป็นร้อยละของวัสดุแม่เหล็กถาวรบางชนิดมีดังนี้:-

เหล็กกล้าดีดัดเค้น C. 0.65, Si 0.20, Mn 0.40, W = 6.0, Cr 0.50 นอก  
นั้นเป็นเหล็ก มี He 65

เหล็กกล้าโคบอลต์ของ สอนดา: Co. 35, W 5, Mn 0.30, Si 0.20, C 0.95, Mo  
0.5 มี He = 240

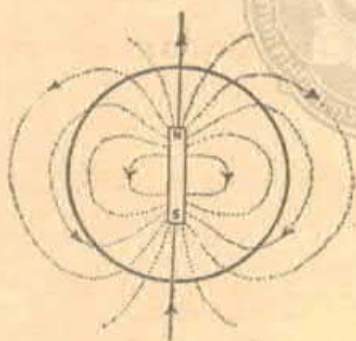
โลหะเจือของมิชิมา Ni 25, Al 10, เหล็ก 56 มี He = 500

โลหะเจือ निकเกิล - โคบอลต์ - ดีคาเนียมของ สอนดา C 0.50, Co 25, Ni 25,  
Al 0.25 Ti 12

อัลนิโกประกอบด้วยฮาตัมเนียม เหล็ก निकเกิล และ โคบอลต์ มี He = 480 และ  
เทคนิควัดสูง (He แทนแรงโคเอซิฟ)

## 5. โลก คือ แม่เหล็กใหญ่แห่งหนึ่ง

เมื่อเขาแม่เหล็กมาแขวน ตามปกติจะชี้เหนือและใต้ หรือไม่ก็จะชี้ไปคามทิศทางใดทิศทางหนึ่งโดยเฉพาะ เนื่องจากสมบัติของมันเขาจึงใช้เข็มทิศในการเดินเรือ ปรากฏว่าชาวจีนได้ใช้เข็มทิศในการเดินทางบกและทางน้ำมาเป็นเวลาหลายร้อยปี ก่อนที่ความรู้นี้จะแพร่หลายไปในยุโรปเมื่อราวคริสต์ศตวรรษที่ 12 ที่แรกเขากล่าวกันว่า เข็มทิศจะชี้ตรงไปยังดาวเหนือ แต่ในปี ค.ศ. 1269 อัดไซเกอร์ ค้นพบว่า เข็มทิศไม่ชี้ไปเหนือไปได้ทีเดียว ต่อมาราว ค.ศ. 1492 เมื่อคราวแล่นเรือใบข้ามมหาสมุทรแอตแลนติก โคลัมบัสได้ค้นพบอีกว่า เข็มทิศย้ายเบนไปจากทั่วโลกเหนือภูมิศาสตร์ และนอกจากนั้นมุมที่เบนไปนั้นไม่คงตัว มุมระหว่างเข็มทิศนั้นคือเมริเดียนแม่เหล็กกับเมริเดียนภูมิศาสตร์ เขาเรียกว่า มุมย้ายเบน (เมริเดียนภูมิศาสตร์คือแนวผ่านทั่วโลกเหนือใต้) ใน ค.ศ. 1576 นอร์มัน ค้นพบ มุมเท หรือ มุมเอียง คือ ว่าเมื่อเขาแม่เหล็กแขวนบนแกนขนานที่ผ่านศูนย์กลาง แม่เหล็กจะเอียงลงทำมุมกับแนวอนัน มุมนี้เขาเรียกว่า มุมเท ที่กรุงเทพฯ มุมเทมีค่าราว  $12^{\circ}$



รูปที่ 6

ราว ๆ ค.ศ. 1600 กิลเบิร์ต ทำการทดลองค้นคว้าเกี่ยวกับแม่เหล็ก และไฟฟ้า และออกความเห็นว่าเป็นว่าโลกทำหน้าที่อย่างแม่เหล็กแห่งใหญ่ เขาสร้างรูปโลกจำลองด้วยดินแร่แม่เหล็กธรรมชาติ และแสดงให้เห็นว่าเมื่อเอาเข็มทิศเล็ก ๆ มาวางไว้ที่ผิวโลกจำลองนั้น เข็มทิศจะพยายามชี้ของแม่เหล็ก และนอกจากนั้นชี้เห็นของเข็มทิศจะเอียงลงเมื่อหยุดเหนือขั้วเหนือ และชี้ขึ้นเมื่อหยุดเหนือขั้วใต้ และเข็มทิศจะชี้ตรงเข้าหาขั้วเมื่อหยุดเหนือหรือใต้ของแม่เหล็ก

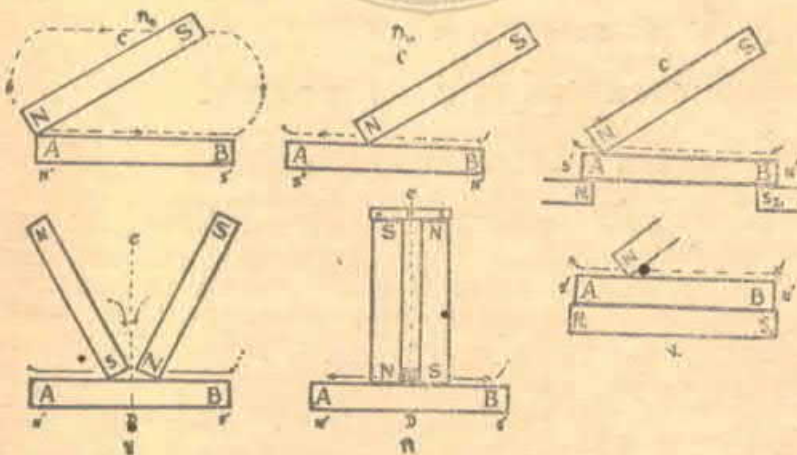
สำหรับแม่เหล็กโลก ขั้วของมันไม่เป็นจุด แต่มีบริเวณ และนอกจากนั้นโลกเป็นแม่เหล็กที่ไม่สม่ำเสมอ เหตุฉะนั้นแรงดึงดูดและของดึงดูดภูมิศาสตร์อันเดียวกัน มุมย้ายเบนและมุมเทจึงไม่เท่ากันทุกแห่ง

ข้อสำคัญที่ควรจะต้องสังเกตอย่างใกล้ชิด คือ ขั้วเหนือของแม่เหล็กโลกเป็นขั้วชนิดเดียวกับขั้วใต้ของแท่งแม่เหล็ก และขั้วใต้เป็นขั้วชนิดเดียวกับขั้วเหนือของแท่งแม่เหล็ก และแม่เหล็กบนผิวโลกจะหมุนรอบศูนย์กลางของมันเท่านั้น และจะไม่เคลื่อนจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง (ดูรูป 2 ง.) ที่เป็นเช่นนี้อาจจะถือได้ว่า ปลายทั้งสองของแม่เหล็กแท่งหนึ่ง ๆ อยู่ห่างจากขั้วทั้งสองของแม่เหล็กโลกเท่า ๆ กัน ดังนั้นแรงบนขั้วทั้งสองของแม่เหล็กแท่งหนึ่งจะเท่ากัน แต่จะไปทางทิศตรงกันข้าม หรืออาจจะพูดไปได้อีกอย่างหนึ่งว่า สนามแม่เหล็กโลกเป็น สนามเอกรูป ในบริเวณหนึ่ง ๆ ซึ่งไม่เหมือนกับสนามเนื่องจากแท่งแม่เหล็ก

## 6. วิธีทำแม่เหล็ก

### 1. วิธีใช้แท่งแม่เหล็ก

เมื่อเราเหล็กวางไว้ในสนามแม่เหล็ก เหล็กนั้นก็จะกลายเป็นแม่เหล็กโดยการเหนี่ยวนำ และถ้าเราช่วยเคาะแท่งเหล็ก แท่งเหล็กนั้นก็จะกลายเป็นแม่เหล็กได้เร็วและดีขึ้น ถึงแม้ว่าสนามแม่เหล็กโลกจะไม่ค่อยเข้มข้น เราก็อาจใช้สนามแม่เหล็กโลกทำแม่เหล็กอ่อน ๆ ได้โดยวิธีนี้ แต่วิธีที่เราเคยใช้กันนั้นเราใช้อำนาจเหนี่ยวนำโดยการถู และอาจจะแบ่งออกได้เป็น 3 วิธี ดังต่อไปนี้ :-



รูปที่ 7

A B คือแท่งเหล็ก

ก. วิธีใช้แม่เหล็กแท่งเดียวไปทางเดียว รูปที่ 7 ก. 1, ก. 2

เอาแท่งเหล็ก วางราบแล้ว เอาปลายของแม่เหล็ก ข้างหนึ่งจับปลาย A ของแท่งเหล็ก แล้วลากแม่เหล็กจาก A ไป B ปลาย ๆ หน (ต้องไม่ลากกลับไปยังหน้า หรือ เบียดปลายของแม่เหล็ก) ถ้าเอาขั้วเหนือจับปลาย A แล้วเคลื่อนขั้วเหนือไปตาม ABC ปลาย B ที่เรายกแม่เหล็กออกก็จะเป็นขั้วได้ และปลาย A จะเป็นขั้วเหนือ ถ้าถวนกลับไปตาม BAC ผลคือ A จะเป็นขั้วได้ และ B เป็นขั้วเหนือ เวลาถวนเอาขั้วได้ ผลก็จะตรงกันข้าม

วิธีนี้ไม่ค่อยเป็นที่พอใจนัก เพราะเหล็กจะไม่กลายเป็นแม่เหล็กที่ถวนได้เต็มที่ และสม่ำเสมอ

ข. วิธีใช้แม่เหล็กสองแท่งถวนแยกไปคนละทาง รูปที่ 7 ข

เอาแม่เหล็กสองแท่ง N1 และ N2 วางลงบนแท่งเหล็ก A B ให้ขั้วต่างกันวางจุดกันที่ตรงกลาง D ของแท่งเหล็ก A B และเอาแม่เหล็กทั้งสองออกจากกัน ไปทาง A และ B แล้วนำเอาแม่เหล็กทั้งสองวางไว้ข้างเดิม แล้วลากออกไปอีก ทำอย่างนี้หลาย ๆ หน

ปรากฏว่าวิธีนี้ ได้ผลดีที่สุดในพวกวิธีถวนกัน และบางครั้งเราใช้วิธีนี้ในการทำเข็มทิศเล็ก ๆ เพื่อประกอบการทดลอง

ค. วิธีใช้แม่เหล็กสองแท่งถวนคู่กันไป รูปที่ 7 ค.

ในที่นี้ เราใช้แม่เหล็กสองแท่งขนาดเท่า ๆ กัน วางขนานกัน และให้ขั้วแม่เหล็กไม่เหมือนกันอยู่ด้วยกัน ใช้ไม้หรือสิ่งที่ไม่เป็นแม่เหล็กได้แยกปลายของแท่งแม่เหล็กไม่ควรใช้โลหะ และอีกข้างหนึ่งใช้เหล็กกัน ฉะนั้นแม่เหล็กสองแท่งนี้ทำหน้าที่อย่างแม่เหล็กรูปเกือกม้า (เราอาจใช้แม่เหล็กเกือกม้าแทนก็ได้) วางแม่เหล็กข้างที่ถูกลูกด้วยไม้ลงที่ D ซึ่งเป็นจุดกลางระหว่าง A B ลากแม่เหล็กจาก D ไป B หลาย ๆ หน และดึงขึ้นจาก D เหมือนกัน ลากแม่เหล็กไปตาม D A เท่ากับจำนวนครั้งที่ลากไปตาม D B ขั้วที่เกิดขึ้นจะตรงกันข้ามกับขั้วของแท่งแม่เหล็กที่เรายกขึ้นทีหลัง นอกจากรูปนี้

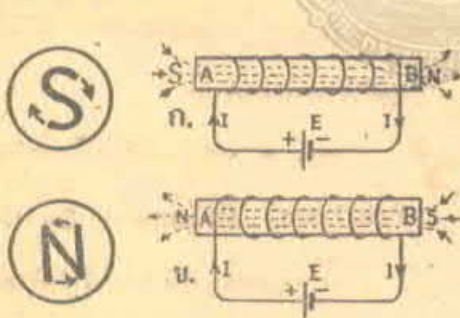
ซึ่งเราลากแท่งแม่เหล็กคู่หนึ่งจากปลายหนึ่งไปยังอีกปลายหนึ่ง แล้วทำอย่างนี้ซ้ำ ๆ อย่างในวิธี ก.

ข้อควรระวัง:— หลังจากลากไปแล้ว ต้องวนกลับมาตั้งต้นจากปลายเดิมทุกๆ ครั้ง ในวิธี ก. เราจะได้ A เป็นขั้วเหนือ และ B เป็นขั้วใต้ในภาพ ถ้าเราวางขั้วแม่เหล็กกลับกันกับที่แสดงไว้ เราจะได้ A เป็นขั้วใต้ และ B เป็นขั้วเหนือ

เราอาจทำให้วิธีเหล่านี้ดีขึ้น โดยใช้หมอนแม่เหล็กหนึ่งหรือสองแท่งสำหรับรองแท่งเหล็ก A B ดังอย่างในวิธี ก เดียว, รูป 7 จ. เราอาจหมอนให้ขั้วที่ A (หรือ B) เหมือนกับขั้วของแม่เหล็กที่ใช้ก็ได้ ถ้ายกจาก A (หรือ B ตามลำดับ) หรือเราอาจพูดอีกอย่างหนึ่งได้ว่า ให้ขั้วของหมอนที่ A (หรือ B) ตรงกันข้ามกับขั้วของแม่เหล็กที่ติดจาก A (หรือ B ตามลำดับ) นั่นคือตรงกันข้ามกับชนิดของขั้วซึ่งจะเกิดขึ้น

## 2. วิธีไฟฟ้า

เราเส้นลวดทองแดงพันรอบแท่งเหล็ก ดังในรูปที่ 8, แล้วต่อเส้นลวดนี้ไปยังหม้อไฟฟ้า E ถ้าพันลวดและให้กระแสไฟไหลตามลูกศร อย่างในรูป ก. ที่กระแสไหลเข้า A เราจะได้ขั้วใต้ และที่ไหลออกจะเป็นขั้วเหนือ ถ้าเราดัดกระแส B จะเป็นขั้วใต้



รูปที่ 8.

และ A เป็นขั้วเหนือ หรือถ้าเราพันลวดกลับอย่างรูป ข. ผลก็คือ A จะเป็นขั้วเหนือ และ B เป็นขั้วใต้ (อย่างเดียวกับเมื่อเราดัดกระแสข้างบน) และถ้าเราดัดกระแส ผลก็จะตรงกันข้ามอีกครั้ง ความ:— ถ้าพันลวดตามนาฬิกา (มองออกไปจากตัวเรา) รูป ก. ทาง

ที่กระแสไหลเข้าจะเป็นขั้วใต้ และทางที่กระแสไหลออกเป็นขั้วเหนือ ถ้าพันตามนาฬิกา ผลจะตรงกันข้าม ถ้าต้องการแม่เหล็กหรือสนามแม่เหล็กเข้มชั่วคราว ก็ใช้แท่งเหล็กอ่อน ถ้าใช้เหล็กกล้า เราจะได้แม่เหล็กถาวร ซึ่งง่าย ๆ สำหรับจำว่าขั้วใดจะเป็นเหนือและ

ข้อใดจะเป็นได้ เราอาจเปรียบกับการชนของทาง S และ N ถ้ากระแสไหลวนตามทาง  
ตัว S ปลายนั้นจะเป็นขั้วใดและขั้วตรงข้ามจะเป็นขั้วใด

### 3. วิธแม่เหล็กไฟฟ้า

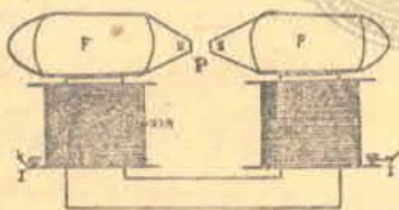
เรามักใช้แม่เหล็กไฟฟ้าที่มีขั้ว (Pole Piece) อยู่ใกล้กัน (ดูหัวข้อต่อไป) เขา  
วัตถุที่ต้องการให้เป็นแม่เหล็กวางระหว่างขั้ว หนึ่งปลายเข้าหาขั้ว แล้วเบียดวัตถุขั้วน้อย  
กระแสไฟฟ้า แล้วขั้วเบียดวัตถุ ถ้าขั้วเดียวไม่พออาจจะมีขั้วเบียดวัตถุสองหรือสามขั้ว  
ก็ได้แต่ความปกติก็น่าพอใจ นี่เป็นวิธีที่เขาใช้กันทุกวันนี้ เพราะเขาจะได้แม่เหล็กที่มีแรงมาก  
อย่างรวดเร็ว

### 7. แม่เหล็ก ในรูปและลักษณะต่าง ๆ

แม่เหล็กที่เราทำขึ้นมีรูปและลักษณะต่าง ๆ กัน เพื่อให้เหมาะกับความประสงค์  
ที่จะนำเอาแม่เหล็กไปใช้ ชนิดที่สำคัญ ก็คือ:-

#### ก. แม่เหล็กไฟฟ้า

ในการค้นคว้าบางอย่าง เช่นการใช้ขั้วแม่เหล็กในการ ทำลายอะตอม  
แยกตัวที่มีเด็กตรอนหรือแสง การเก็บขั้วแม่เหล็กจากขยะ หรือยกของที่ทำด้วยเหล็ก เรา



รูปที่ 9

แม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับทำสนาม

เริ่มที่จุด P F = เหล็กอ่อน

I = กระแสไฟฟ้า

และเนื่องจากกระแสไฟฟ้าในเส้นลวดด้วย

สนามจะไม่ทั่วกันอย่างไม่มีที่สิ้นสุด

ต้องการแม่เหล็กที่แรงมาก ดังนั้นแม่เหล็ก  
ไฟฟ้าจึงเหมาะสมยิ่ง

รูปที่ 9 แสดงแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีขั้ว  
(Pole Piece) เหล็กอ่อน F อยู่ใกล้กัน

อำนาจของแม่เหล็กไฟฟ้าจะมากหรือน้อยนั้น

แล้วแต่ปริมาณของกระแสไฟฟ้า

จำนวนรอบของเส้นลวด และชนิดของแกน

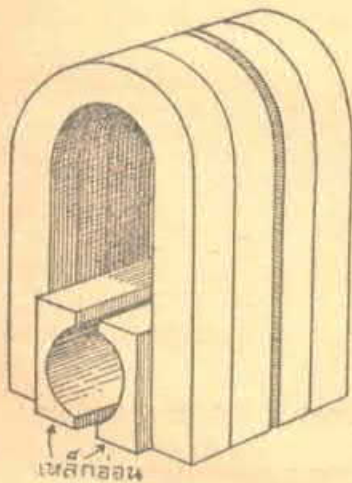
ในที่นี้เราได้สนามเนื่องจากแม่เหล็กโดยตรง

เทคนิสนามจึงอาจเข้มถึงหลายพันเกาส์ แต่

เพราะการเพิ่มกระแสไฟฟ้ามาก ๆ อาจทำให้เกิด

ความร้อนมากเกินไปจนอาจมีอันตรายได้ และนอกจากนั้นพอเหล็กอิ่มตัวแล้ว อานาจเนื่องจากแม่เหล็กก็จะคงที่ถึงแม้ว่าจะเพิ่มชิ้นอีก (การเป็นแม่เหล็กของเหล็กแท่งหนึ่ง ๆ มีขีดชน ดุหัวขีดต่อไป)

แม่เหล็กไฟฟ้ามีใช้กันอย่างกว้างขวางมาก เครื่องใช้เป็นจำนวนมากมีแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบ เช่น แตรรถยนต์ กระจกไฟฟ้า โทรเลข โทรศัพท์ เครื่องสัญญาณหลายชนิด และรถยนต์ เป็นต้น ทั้งนี้เพราะเราอาจควบคุมบังคับมันได้



รูปที่ 10

แม่เหล็กเกือกม้าของแมกนีโต



รูปที่ 11

แม่เหล็กประกอบ

### ข. แม่เหล็กเกือกม้า

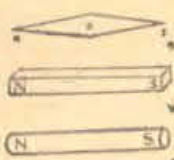
พื้นฐานของ แม่เหล็กถาวร ชนิดที่มีรูปคล้ายเกือกม้า เราทำแม่เหล็กชนิดนี้ขึ้น เมื่อเราต้องการให้ ขั้วแม่เหล็ก อยู่ใกล้กันเพื่อให้มันทำงานได้ดีสำหรับใช้ ติดเหล็กในการ ทดลองเล็ก ๆ น้อย ๆ และใช้เป็นส่วนประกอบในเครื่องมือไฟฟ้าหลายชนิด เช่น กัลวานอมิเตอร์ เครื่องวิทยุ

### ค. แม่เหล็กประกอบ

แม่เหล็กชนิดนี้ประกอบด้วยแม่เหล็กเล็ก ๆ บาง ๆ หลายชิ้นยึดรวมเข้าด้วยกันที่ปลายด้วยเหล็กเป็นมัด ๆ

แต่ก่อนเขาใช้แม่เหล็กชนิดนี้ เมื่อต้องการแม่เหล็กที่มีแรงมากเพราะโดยอำนาจการดึงดูดเหล็กใหญ่ ๆ แท่งเหล็กจะกลายเป็นแม่เหล็กแค่ตามผิว และนอกจากนั้นการเป็นแม่เหล็กจะไม่สม่ำเสมอทุก ๆ ส่วน (ดูข้อ 8 ง.) ด้วยเหตุนี้แม่เหล็กเล็ก ๆ หลาย ๆ แท่งจึงทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็กได้แรงกว่าแท่งใหญ่แท่งเดียวซึ่งมีเหล็กหนักเท่ากัน

## ง. ชนิดอื่น ๆ



รูปที่ 12

1. เข็มทิศ
2. แท่งเหล็ก
3. แท่งกระบอก

ชนิดอื่น ๆ ก็มี เช่นชนิดแท่งซึ่งภาค

ตัดกลมหรือสี่เหลี่ยม รูปเข็มทิศซึ่งมีปลาย  
แหลมทั้งสองข้างเพื่อช่วยให้อ่านมาตราส่วนได้  
ง่าย อีกชนิดหนึ่งมีทรงกลมติดสองปลาย  
ชนิดนี้ มี ขั้ว แทบ เกือบ เป็น จุด และ อยู่ ใกล้กับ  
ศูนย์กลางของทรงกลม

## 8. การเป็นแม่เหล็กตามส่วนต่าง ๆ ของแท่งเหล็ก

ก. ถ้าเราทำแม่เหล็กอย่างระมัดระวัง ขั้วของแม่เหล็กเกือบอยู่ที่ปลายของแท่ง  
แต่จะไม่อยู่ที่ปลายเลยทีเดียว นอกจากนั้นถ้าเราลงตะปูเหล็กโรยแท่งแม่เหล็ก เราจะเห็น  
ว่าขั้วของแท่งแม่เหล็กไม่เป็นจุด (ดูหัวข้อ 2 ก.)

ข. สำหรับแม่เหล็กที่มีลูกเหล็กกลมอยู่ที่ปลาย ขั้วจะอยู่ที่ศูนย์กลางของ  
ทรงกลมทั้งสอง



รูปที่ 13

- ก. พอลขั้วที่ปลายเหมือนกัน
- ข. พอลขั้วที่ปลายต่างกัน

ค. ปลายทั้งสองของแท่งแม่เหล็กบางทมีขั้ว  
เหมือนกัน และมีขั้วขั้วตรงขั้วอยู่ในแท่งแม่เหล็ก  
ปรากฏการณ์นี้ เรียกว่า ปรากฏการณ์แห่ง  
Consequent Poles แม่เหล็กชนิดตามขั้วเหมือนกัน  
อยู่ที่ปลาย เมื่อแฉกตรงกลางจะเข้าไปทางทิศตะวันตก  
ตะวันออก (ซึ่งได้มาจากกับแนวเมริเดียน) เนื่องจาก  
ขั้วที่ปลายทั้งสองถูกผลักหรือดูดโดยแม่เหล็กโลกด้วย  
แรงเท่ากัน ขนาดกัน และขั้วตามแนวเดียวกัน ฉะนั้นขั้ว

แม่เหล็กทั้งสองข้างก็พยายามจะไปตามทิศเดียวกัน เราอาจแบ่งแม่เหล็กชนิดนี้ออกเป็น  
สองพวก คือ ที่มีขั้วเหมือนกันที่ปลาย และขั้วไม่เหมือนกันที่ปลาย สำหรับชนิดแรก  
จำนวนขั้วขั้วตรงขั้วจะเป็นคู่ (นับที่อยู่ด้วยกันต้องขึ้นเป็นหนึ่ง) สำหรับชนิดที่สองจำนวนขั้วจะ  
เป็นคี่

๖. การเป็นแม่เหล็กมักจะหายตามผิวของแท่งแม่เหล็กเท่านั้น ถ้าเอาแม่เหล็กถาวรไปแช่กรดในตริกติกครุแล้วเอาขึ้นมา เราจะเห็นว่าแม่เหล็กนั้นหมดอำนาจ แม่เหล็กเพราะผิวของแท่งเหล็กถูกกรดกัดออกไป หรือถ้าเราเอากระบอกเหล็ก ซึ่งมีแท่งเหล็กขุดแท่งหนึ่งสอดเข้าไว้พอออกมาและทำให้มันเป็นแม่เหล็ก แท่งเหล็กทรงกระบอกจะเป็นแม่เหล็กแต่แท่งที่สอดอยู่ข้างในจะเป็นเหล็กธรรมดาอย่างเต็ม เพราะเมื่อถอดออกจากกันแท่งกลางจะไม่แสดงสมบัติแม่เหล็กเลย.

## 9. การอิมิต์ และการอิมิต์ยั้ง

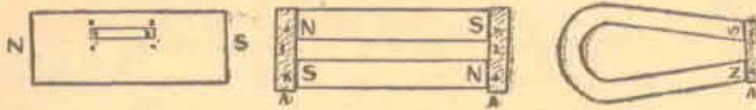
การเป็นแม่เหล็กของแท่งโลหะแท่งหนึ่งมีขีดจนแล้วแต่ตั้งฐาน ส่วนประกอบและชนิดของโลหะ เมื่อถึงขีดจนนั้นแล้ว ถึงแม้ว่าอำนาจที่ใช้ทำแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้นอีกเท่าไร การเป็นเหล็กก็จะคงที่ นั่นคือแรงขั้วจะไม่เพิ่มขึ้นแม่เหล็กจะไม่เพิ่มขึ้น เราเรียกขีดจนนี้ว่าการอิมิต์ ของการเป็นแม่เหล็ก

หลังจากการทำแม่เหล็กใหม่ๆ การเป็นแม่เหล็กของแท่งโลหะ อาจจะมีมากกว่าขีดอิมิต์และที่แท่งโลหะนั้นจะรักษาไว้ได้ แต่ถ้าทิ้งมันไว้ชั่วคราว การเป็นแม่เหล็กก็จะลดลงจนถึงขีดจนการเป็นแม่เหล็กอย่างธรรมดา และการเปลี่ยนสถานะนี้จะเร็วขึ้นถ้าหากว่าเราช่วยดันแท่งโลหะ ปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า การอิมิต์ยั้ง

## 10. การเก็บรักษาแม่เหล็กให้ มีกำลังคงตัว

เราทราบแล้วว่า แม่เหล็กขั้วแม่เหล็กเสรี ที่ไหน ขั้วแม่เหล็กนั้นก็จะทำการเหนี่ยวนำตัวแม่เหล็กทั้งหลายให้เป็นแม่เหล็ก ทั้งนี้ยอมรวมทั้งตัวของมันเองซึ่งเป็นตัวแม่เหล็กด้วย ฉะนั้นแท่งแม่เหล็กเมื่ออยู่โดยลำพัง ก็เหนี่ยวนำและทำลายตัวเอง ดังนั้นจะอธิบายได้ดังนี้ รูปที่ 14 ก. ประกอบ

รูปที่ 14



ก.

ข.

ค.

A คืออาร์มาเจอร์ มีขั้วเหนี่ยวนำ n's' สำหรับ  
ทำสายขั้วอิสระ n s

แท่งแม่เหล็กมีขั้ว

N และ S พิจารณา

AB ซึ่งเป็น 'ชิ้น' หรือ

ส่วนหนึ่งในแม่เหล็ก

NS นี้ จะเห็นว่า A

เป็นขั้วเหนือ และ B

เป็นขั้วใต้ แต่เนื่อง

จากการเหนี่ยวนำ ขั้ว

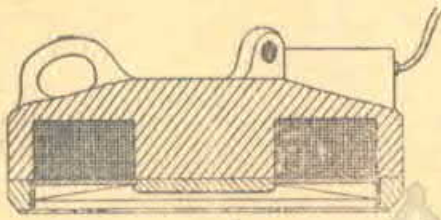
อิสระ N จะพยายามทำให้เกิดขั้วใต้ที่ A และขั้ว n' ที่ B ฉะนั้นอำนาจเนื่องจากแม่เหล็ก  
ns (ตัวของ "แม่เหล็ก" AB เอง) และ s'n' ซึ่งเกิดจากการเหนี่ยวนำจะทำลายกันที่น้อย ๆ  
จนแม่เหล็ก AB หดอำนาจ เหตุฉะนี้จึงเป็นการจำเป็นอย่างยิ่งที่จะไม่ให้แม่เหล็กมีขั้ว  
อิสระ เมื่อเราต้องการรักษแม่เหล็กให้อำนาจคงที่ วิธีที่เราใช้รักษอำนาจแม่เหล็ก  
ก็คือ ถ้าเป็นแม่เหล็กแท่ง เอาแม่เหล็ก 2 แท่งวางคู่กันให้ขั้วที่ไม่เหมือนกันอยู่ด้วยกัน  
และเอาเหล็กอ่อน 2 ชิ้นซึ่งเรียกว่าอาร์มาเจอร์วางคู่ไว้ปลาย สำหรับแม่เหล็กเกือก  
มาใส่เหล็กอ่อนชิ้นเดียว เหล็กอ่อนเหล่านี้กลายเป็นแม่เหล็กโดยการเหนี่ยวนำและจะยัง  
ทำให้เกิดวงจรแม่เหล็กขึ้น เมื่อขั้วอิสระไม่มี การทำลายตัวเองก็จะไม่เกิดขึ้น และนอก  
จากนั้นเหล็กอ่อนยังเหนี่ยวนำให้แม่เหล็กมีความแรงมากขึ้นได้อีกด้วย (รูปที่ 14 ข.ค.)

จากหลักการเหนี่ยวนำที่กล่าวมาแล้ว เราอาจจะอธิบายได้ว่า แท่งแม่เหล็ก  
ยาว ๆ จะรักษาการเป็นแม่เหล็กได้ดีกว่าแท่งแม่เหล็กสั้น ๆ ซึ่งมีพหุภาคคึกเท่ากัน ทั้งนี้  
เพราะขั้วอิสระหุ้ญใกล้กันและไกลจากส่วนต่าง ๆ ของแม่เหล็กที่มีจะเหนี่ยวนำ อำนาจ  
เหนี่ยวนำจึงอ่อนลง และในทำนองเดียวกันก็อาจอธิบายได้ว่าถ้าเราทำแท่งเหล็กให้เป็น  
แม่เหล็กคามกว้าง มันก็จะเป็นแม่เหล็กอยู่ไม่ได้นาน

## 11. อำนาจการยกของแท่งแม่เหล็ก

แฮกเกอร์ ทำการทดลองเกี่ยวกับอำนาจการยกของแม่เหล็กไฟฟ้ารูปเกือกม้า และปรากฏว่า น้ำหนักที่ยกได้และมวลสารของแม่เหล็กมีส่วนเกี่ยวข้องกับกันดังนี้

$$W = am^{\frac{2}{3}}$$



รูปที่ 15

แม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับยกวัตถุที่ทำด้วยเหล็ก

m คือ น้ำหนักของแม่เหล็กที่ขมวด ซึ่งใช้ในการยก

w คือ น้ำหนักที่จะใช้ดึงให้เหล็ก ยื่นหลุดออกจากแม่เหล็ก (น้ำหนักที่ยก)

a มีค่าคงตัว ซึ่งแต่ต่างชนิดของวัตถุที่ใช้ทำแม่เหล็ก สำหรับเหล็ก

a อาจมีค่าตั้ง 10 (หน่วย c.g.s.)

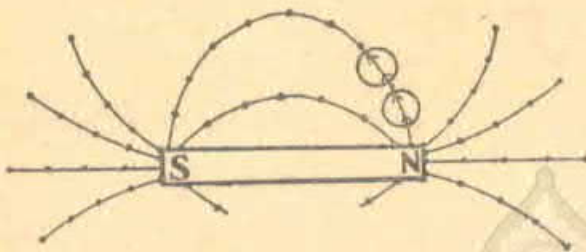
แม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ขมวดและยกของมีที่ใช้กว้างขวางมาก เช่น ใช้ติดผนังเหล็กที่เข้าคา ตามโรงงานเหล็กและเรือและเราใช้ติดยกเหล็กกดมกขึ้นใหญ่ๆ ขึ้น แล้วดึงปล่อยให้ตกลงทุบเศษเหล็กให้เป็นชิ้นเล็กๆ ในกรณีที่ระยะระหว่างขั้วแม่เหล็กและสิ่งที่ถูกคูดน้อยมาก และผิวที่สัมผัสกันราบ แรงดึงดูดจะเท่ากับ  $P = 0.09 \left( \frac{B}{1000} \right)^2$  s ปอนด์ ในเมื่อ B เป็นความหนาแน่นเหนี่ยวนำ และ s เป็นพื้นที่

## 12. สนามแม่เหล็ก เส้นแรง เส้นเหนี่ยวนำ

เมื่อเราเอาเข็มทิศมาวางไว้รอบแม่เหล็กจะปรากฏว่า มีอำนาจซึ่งทำให้เข็มทิศเหไปจากแนวเมริเดียน และที่จุดหนึ่งๆ เข็มทิศก็เหไปทางทิศเดียวเสมอ

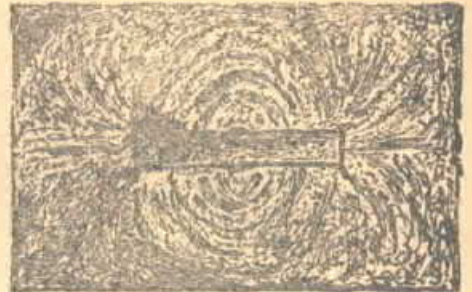
บริเวณซึ่งมีอำนาจแม่เหล็กแสดงเช่นนี้ หรือแสดงโดยวิธีอื่น เราเรียกว่า สนามแม่เหล็ก

ถ้านำเอาแม่เหล็กวางไว้บนโต๊ะ แล้วนำเอาเข็มทิศมาวางไว้ที่จุดข้างข้อเหนือของแม่เหล็ก ขั้วใต้ของเข็มทิศจะถูกดูดเข้าไป และถ้าเลื่อนเข็มทิศไปตามแนวที่เข็มทิศจะได้เดินโค้งจากข้อเหนือไปยังขั้วใต้ของแท่งแม่เหล็ก และถ้าตั้งคันที่จุดใหม่ข้างๆจุดเดิม ก็จะได้เดินโค้งใหม่อีกเส้นหนึ่ง ดังในรูปที่ 16 ก.



รูปที่ 16 ก.

หาเส้นแรงโดยใช้เข็มทิศ



รูปที่ 16 ข.

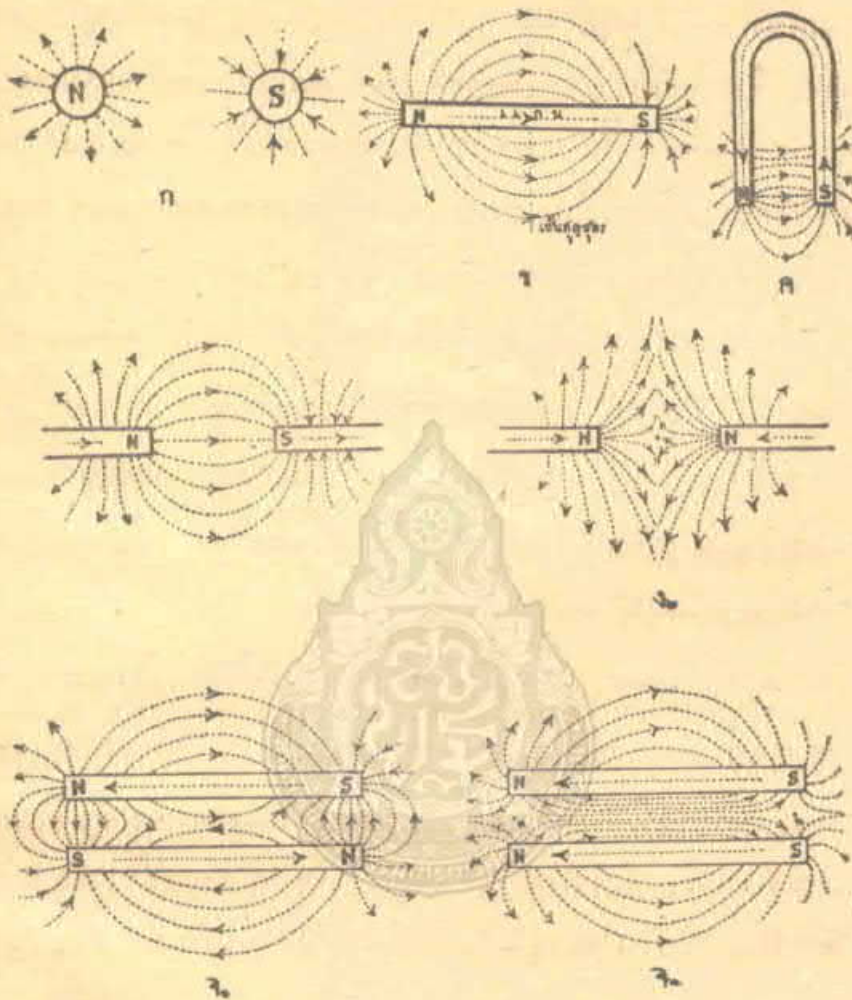
หาเส้นแรงโดยใช้ผงตะไบเหล็ก

ถ้าเอาแผ่นกระดาษแข็งวางไว้บนแม่เหล็ก และเอาผงตะไบเหล็กโรยบางๆ แล้วเคาะแผ่นกระดาษเบาๆ ผงตะไบเหล็กก็จะเรียงตัวเป็นเส้นโค้ง ซึ่งคล้ายกับเส้นที่เราลากผ่านจุดต่าง ๆ ที่เราวางเข็มทิศอย่างการทดลองข้างบน รูปที่ 16 ข.

นี่คือวิธีทำการทดลองหาเส้นแรง วิธีที่ 2 เป็นวิธีที่เหมาะสมในเมื่อต้องการรูปถ่าย และเพื่อให้หยิบยกไปมาได้สะดวกเราใช้แผ่นแก้วมีขึงกระดาษบางๆ แทนกระดาษแข็ง เมื่อเคาะและผงตะไบเรียงตัวตามแนวโค้งเรียบร้อยแล้ว เราตบไฟให้ขึงแน่นๆ ผงตะไบเหล็กก็จะจมลงไปและติดอยู่แน่น

ถ้าเราเอาแม่เหล็ก 2 แท่งมาวางชนกัน แล้วใช้เข็มทิศหรือตะไบเหล็กอย่างที่ทำมาแล้ว เราก็จะได้เห็นแรงมีลักษณะโค้งอย่างในรูปที่ 17 จ2, จ3.

ภาพต่อไปนี้แสดงเส้นแรงของแม่เหล็กเมื่อมีขั้วโดย "ถ้าพิ้ง" นั่นคือไม่มีขั้วนามเนื่องจากแม่เหล็กโลกแม่เหล็กอื่น ๆ หรือมีลวดแม่เหล็กอยู่ใกล้ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับและสิ่งอิทธิพลทำให้มันเปลี่ยนทิศทาง



ก. เส้นแรงแพจจากขั้วเหนือและเข้าหาขั้วใต้

ข. เส้นแรงแข่งแม่เหล็กแท่งยาว

ค. .. .. . แกอคม้า

ง 1, ง 2, เส้นแรงแม่เหล็กของแท่งวางเข้าปดวยเข้าหากัน

จ 1, จ 2, เส้นแรงแม่เหล็กของแท่งวางขนานกัน

จุด 'น' ที่เกิดขึ้นในรูป ง 2, จ 3, ชื่อว่า "จุดเสกน" (ไม่มีช่นาม) (Neutral Point)

เส้นโค้งซึ่งปรากฏจากการทดลองข้างบน เราเรียกว่าเส้นแรง ซึ่งถือกัน  
ว่าพุ่งออกจากขั้วเหนือไปยังขั้วใต้ เราจะให้นิยามของเส้นแรงได้ดังนี้ “เส้นแรงที่  
ผ่านจุดใดจุดหนึ่งคือเส้นบอกทิศทางของสนามที่จุดนั้น ๆ หรือเส้นแรงคือเส้นที่  
ขั้วเหนือของแม่เหล็ก (ถ้าหากเราแยกเอามาได้ขั้วเดียว) จะเคลื่อนตามไป และ  
ต้นเจนต์ที่จุดใดบนเส้นโค้งนี้จะแสดงแนวทิศทางของสนามลัทธิที่จุดนั้น”

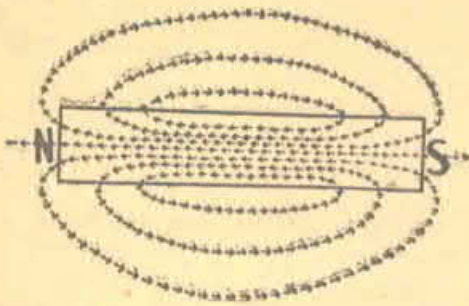
ข้อที่ควรสังเกตอย่างหนึ่งก็คือ โกลด์ ๆ ขั้วแม่เหล็ก เส้นแรงจับกลุ่มกันหนา  
แน่น และยังไกลออกไปจากแท่งแม่เหล็กเส้นแรงก็ยังอยู่ห่างกัน ที่ซึ่งมีเส้นแรงที่มาก  
ที่สุดสนามแม่เหล็กจะเข้มข้นที่สุด เพราะถ้าหากเราเอาแม่เหล็กมาแขวนและให้มัน แม่  
เหล็กก็จะหันเร็วว่านที่ ซึ่งมีจำนวนเส้นแรงน้อย และแรงบนขั้วแม่เหล็ก อีกแท่ง หนึ่งจะ  
มากที่สุดที่จุดซึ่งมีเส้นแรงจับกลุ่มในหนึ่งหน่วยพื้นที่หนาแน่นที่สุด นี่แสดงว่าเราอาจจะวัด  
ความเข้มของสนามได้โดยการนับ “จำนวนเส้นแรง”

ดังนั้นเราจึงถือกันว่า “จำนวนเส้นแรง” ซึ่งผ่านพื้นที่ หนึ่ง หน่วยโดย  
รอบจุดหนึ่ง ๆ เป็นความเข้มของสนามที่จุด ๆ นั้น เพราะฉะนั้น สนามซึ่งมี  
ความเข้มหนึ่งหน่วยจะมี “เส้นแรง” หนึ่งเส้นต่อ 1 ตารางเซนติเมตร

และนอกจากนี้เราก็เห็นได้ว่า เส้นแรงที่พุ่งออกจากขั้ว เหนือเหมือนกันหรือ  
ใต้เหมือนกันผลักกัน ถ้าเราไปคนละข้างจะดูดกันและหันมารวมกันเข้า ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว  
ว่าเส้นแรงออกจากขั้วเดียวกัน ค่อยห่างกันมากขึ้น ๆ เมื่อไกลไปจากแท่งแม่เหล็ก และ  
หันเข้ามาใกล้กันอีกเมื่อจะถึงขั้วใต้

### เส้นเหนี่ยวนำ

เราทราบแล้วว่าเส้นแรงอาจข้ามผ่านเข้าไปในวัตถุต่างต่าง ๆ ได้ และเส้นแรง  
อาจถี่ หรือ ห่างมากขึ้น หรือ อย่างเดิม (นั่นคือ เมื่อไม่มีตัวกลางเลย) ก็ได้  
แล้วแต่สมบัติของตัวกลาง



รูปที่ 18

เส้นเหนี่ยวนำภายในและภายนอกแท่งแม่เหล็ก

ทาง และการเหนี่ยวนำจะเกิดขึ้นตามแนวทิศทางของมัน

สำหรับแท่งแม่เหล็กเรามีเส้นเหนี่ยวนำเป็นวงจร เพราะทุกส่วนของเส้นจะทำการเปลี่ยนสถานะแม่เหล็กของสารได้ แต่ส่วนที่อยู่เฉพาะภายนอกแท่งเรียกว่า เส้นแรง ฉะนั้นในท่อนเส้นแรงเป็นข้อเฉพาะของคอนทิงของเส้นเหนี่ยวนำเท่านั้น

有一部分ของเส้นเหนี่ยวนำอยู่ในแม่เหล็ก ส่วนนี้จะบังคับและทำให้สารเป็นแม่เหล็กโดยตรง ส่วนของเส้นแม่เหล็ก เขาเรียกว่า เส้นทำให้ เป็น แม่เหล็ก (Lines of magnetisation)

จากข้อความเหล่านี้เราสังเกตได้ว่าเส้นต้องจำพวกกันต่างกัน คือ เวลาเราพูดถึงเส้นแรง เราหมายถึงแรงหรือกิริยาที่บังเกิดขึ้นโดยอำนาจแม่เหล็ก ส่วนเส้นเหนี่ยวนำหมายถึงเส้นและแนวทิศทางแม่เหล็กของตัวกลางจะเปลี่ยนหรือเปลี่ยนไปแล้วโดยอำนาจการเหนี่ยวนำ

มีข้อควรสังเกตจากการทดลองข้างบนอย่างหนึ่ง คือเส้นแรงออกจากแม่เหล็กแท่งเดียวกันไม่คัดกันเลย เราอาจอธิบายความจริงนี้ได้ดังนี้ คือ ในสนามแม่เหล็กเขาถึงว่าทุกจุด ๆ หนึ่ง เวกเตอร์ซึ่งแสดงบอกแนวทิศทางของเส้นแรงจะชี้ไปทางหนึ่งทางใดโดยเฉพาะเส้นนี้ แนวอันนี้คือแนวสนามรวม (Total field) ที่จุดนั้น ถ้าเส้นแรง ต้องเส้นคัด

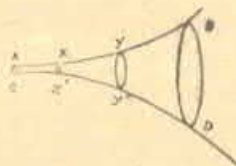
ตัวกลางอื่นแรกเราเรียกว่า พอก สารแม่เหล็กธรรมดา เพราะมันจะมีอำนาจแม่เหล็กขึ้น เมื่อ เส้นแม่เหล็กผ่านมัน เส้นที่ทำให้สมบัติของสารเปลี่ยนแปลงไปเช่นนั้น เราเรียกว่า เส้นเหนี่ยวนำ เพราะมันเหนี่ยวนำอำนาจแม่เหล็กให้เกิดขึ้นในสารนั้น เหมือนกับเส้นแรง เส้นเหนี่ยวนำมีทิศ

กันทุกคู่ ที่จุดนั้นจะมีสนามรวมซึ่งแนวซึ่งขัดกับความจริง ดังนั้นทุกจุดหนึ่ง ๆ จึงไม่มีเส้นแรงแผ่นช่องเดิม นั่นคือเส้นแรงจะไม่ตัดกันโดย

### 13 หลอดแรง หลอดเหนี่ยวนำ และกลุ่มหลอดหรือฟลักซ์แม่เหล็ก

(Tubes of Force, Induction and Magnetic Flux)

ในการทำการทดลองหาเส้นแรงโดยวิธีข้างต้น ที่ได้บรรยายมาแล้ว ถ้าสังเกตให้ละเอียดจะเห็นว่า ในบริเวณสนามแม่เหล็กมีเส้นแรงเต็มไปด้วยหลอด ความจริงเช่นที่เราทำการทดลองหาได้ ก็เป็นแต่เพียง เส้นแรงแบบหรือที่ติดกับระนาบหนึ่ง ๆ เท่านั้น ถ้าเราพิจารณาอีกต่อไปและแบ่งถึงเฉพาะเส้นแรงพวกหนึ่ง ซึ่งล้อมรอบบริเวณเล็ก ๆ



รูปที่ 19

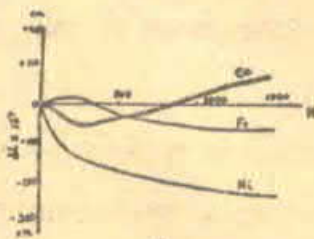
เส้นแรง พวกนี้ ก็จะปรากฏว่า ประกอบกันเข้า คล้ายหลอด ซึ่งมีพื้นที่ภาคตัดไม่คงตัว และเราเรียกเส้นแรง พวก นี้ ๆ ซึ่งแสดงให้ ปรากฏ เช่นนี้ ว่า หลอดแรง และพวกของเส้นเหนี่ยวนำซึ่งอยู่รอบบริเวณเล็ก ๆ ว่า หลอดเหนี่ยวนำ ความเป็น

จริง หลอดแรงจะมีขนาดเล็กหรือใหญ่ก็ได้ แสดงให้เราแบ่งและพิจารณาเส้นแรงพวกไหน และเพื่อให้เป็นมาตรฐานและติดกัสำหรับใช้ เราเลือกเอาหลอดแรงซึ่งมีขนาดเท่ากับหลอดซึ่งเรียกว่า หลอดหน่วย นั่นคือ ความเข้มในหลอดนี้จะเท่ากับหนึ่ง เกาส์ ให้นักเรียนเข้าใจและต้องนึกเอาเองให้เข้าใจถึงภาพของหลอดแรงและเส้นแรง และให้เข้าใจว่า ในหลอดแรงหลอดหนึ่ง อาจมีเส้นแรงอยู่ได้มากมาย จำนวนเส้นแรงนี้จะเพิ่มขึ้นกับขนาดของหลอดแรงรอบจุดหนึ่ง ๆ แต่ถ้ามัดหลอดหนึ่ง ๆ และนับจำนวนเส้นแรง ๆ ก็จะมีจำนวนคงตัวเสมอ ตอนที่ภาคตัดของหลอดแรงเล็ก เส้นแรงจะแน่นหนา มาก ความเข้มก็จะมาก แต่ส่วนที่มีพื้นที่โต ๆ จำนวนเส้นแรงจะน้อย อำนาจของสนามก็น้อย เช่นถ้าที่ X พื้นที่ภาคตัดของหลอดแรงเป็นหนึ่งหน่วย และความเข้มหนึ่งหน่วย แต่ที่จุด Y ซึ่งมีพื้นที่เป็นสองเท่า ความเข้มจะมีแค่เพียง  $\frac{1}{2}$  หน่วย

กลุ่มหลอดหรือฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux) ซึ่งผ่านพื้นที่ใด ๆ คือ จำนวนหลอดหน่วยซึ่งผ่านพื้นที่นั้น ในพื้นที่หนึ่งฟลักซ์จะโคจรเท่าใดก็ได้ไม่จำกัด และจากความหมายที่เราพูดไว้ว่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่จุดใดคือ กลุ่มหลอดแรงที่ผ่านพื้นที่หนึ่งหน่วยรอบจุดนั้น

ให้สังเกตข้อความข้างบนนี้ให้ดีว่า คำว่าเส้นแรงในคอนคอน มีความหมายเหมือนกับหลอดแรงในคอนคอน ฉะนั้นในคอนคอนแล้ว เวลาพูดถึงเส้นแรงก็หมายถึงกลุ่มเส้นแรงเล็ก ๆ ประกอบกันเข้าเป็นมัดและทำหน้าที่อย่าง หลอดหน่วย ผู้ที่ระลึกวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าต่อไป ควรจำไว้ว่า ในหนังสือช่างที่ใช้ทั่วไปเรามักใช้คำว่า กลุ่มหลอดแรงหรือฟลักซ์แม่เหล็ก แทนคำว่าจำนวนเส้นแรง และคำว่า "จำนวนเส้นแรง" ในหนังสือบางเล่มก็จะมีมีความหมายเช่นเดียวกันกับฟลักซ์แม่เหล็กซึ่งถูกต้องกว่า

#### 14. การยืดและหดตัวของสารแม่เหล็กเมื่อเวลาถูกกลายเป็นแม่เหล็ก (MAGNETOSTRICTION)

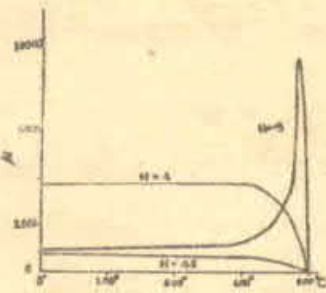


รูปที่ 20

การยืดและหดตัวของสารแม่เหล็กในสนามแม่เหล็กเพิ่มจาก 0 ถึง 1,500 เกาส์

แท่งสารแม่เหล็กเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กจะเพิ่มหรือลดความยาวเล็กน้อยแต่ ความเข้ม ของสนามแม่เหล็กและชนิดของสาร สำหรับเหล็กเมื่อสนามไม่ค่อยเข้มข้นจะยืดตัว แต่เมื่อสนามค่อนข้างเข้มจะหดตัว นักเกิดจะหดตัวเสมอ ส่วนโคบอลต์จะหดตัวเมื่อเข้มไม่เกิน 800 เกาส์ แต่จะขยายตัวเมื่อสนามเข้มข้นกว่า โดยอาศัยสมการเขาจึงใช้เกิดเกิดในเครื่องคุมกระแสไฟฟ้าในเครื่องคุมไฟฟ้าอัตโนมัติบางชนิด

## 15. ปรากฏการณ์วิกฤติ (CRITICAL PHENOMENON)



รูปที่ 21

การเป็นแม่เหล็ก

เปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิ

เมื่ออุณหภูมิของแท่งเหล็กเพิ่มขึ้น จำนวนของแม่เหล็กก็จะลดลง สำหรับเหล็กบางชนิดอุณหภูมิ 750° ซ. จำนวนของแม่เหล็กก็จะหมด อุณหภูมินี้เรียกว่า อุณหภูมิวิกฤติของสารนั้น สำหรับนิกเกลอณหภูมิวิกฤติมีค่าราว ๆ 360° ซ. เหล็กกล้าของนิรมามีอุณหภูมิวิกฤติ 650° ซ.

เช่นเดียวกันถ้าเราเอาเหล็กมาทำให้เป็นแม่เหล็กแม่เหล็กที่เราใช้ดัดนามดักเท่าใด เหล็กนั้นก็ยังไม่กลายเป็นแม่เหล็ก ถ้าอุณหภูมิของมันเท่ากับหรือสูงกว่า

อุณหภูมิวิกฤติ (Critical temperature) เฮอร์ฟในรูปที่ 21 แสดงอำนาจเหนี่ยวนำในเหล็กเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนจาก 0° ถึง 800° ซ. สำหรับความเข้มข้นต่าง ๆ กัน

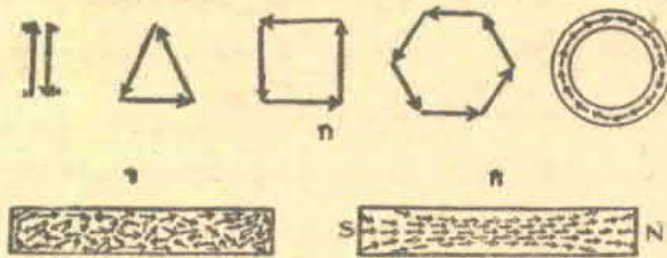
## 16. ทฤษฎีแม่เหล็ก

อาศัยการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติต่าง ๆ ของแม่เหล็กดังกล่าวมาแล้วข้างต้น เราจึงสรุปสร้างทฤษฎีเหล่านี้นเพื่ออธิบายปรากฏการณ์แม่เหล็ก

ก. ทฤษฎีโมเลกุลแม่เหล็ก มีสาระสำคัญซึ่งอาจแบ่งออกเป็นข้อ ๆ ได้ดังนี้:-

1. โมเลกุลของสารแม่เหล็ก (ไม่จำเป็นจะต้องเป็นแท่งแม่เหล็ก) เป็นแม่เหล็กอยู่ในตัวทุก ๆ โมเลกุล

2. เมื่อสารนั้นยังไม่เป็นแม่เหล็ก โมเลกุลจะอยู่กันกระจัดกระจาย (รูปที่ 22 ข.) หรือจับกลุ่มกันอยู่เป็นพวก ๆ และในกลุ่มหนึ่ง ๆ พวกโมเลกุลทำลายอำนาจแม่เหล็กของพวกตัวเองโดยมีขั้วไม่เหมือนกันอยู่ด้วยกัน เวียงคู่กันหรือ อยู่เป็นวงจรรปิด ดังในรูปที่ 22 ก. หรือรูปอื่น ๆ ซึ่งไม่ไวแน่นอน



รูปที่ 22

ก. วงจรปิดของแม่เหล็ก ข. โมเมนต์ในสารแม่เหล็กที่ยังไม่เป็นแม่เหล็ก

ค. โมเมนต์แม่เหล็กในแม่เหล็ก

3. เมื่อถูกสายเป็นแม่เหล็ก โมเมนต์เหล่านี้จะอยู่เป็นระเบียบ (รูปที่ 22 ค.) ขั้วชนิดเดียวกันของโมเมนต์แม่เหล็กจะวิ่งไปทิศทางเดียวกันทั้งหมด เมื่อเป็นเช่นนั้นแท่งแม่เหล็กจะดัดมาก และอาจถือได้ว่าอยู่ในสภาพขั้วขึง ตามปกติในแม่เหล็กขั้วเดียว โมเมนต์ตอนกลางเท่านั้นจะเรียงเป็นเส้นตรง แต่ตอนใดออกไปจะเรียงเป็นเส้นโค้งดังในรูปที่ 22 ค. แท่งแม่เหล็กนั้นไม่ค่อยดัด โมเมนต์ก็ไม่เรียงกันเป็นระเบียบเรียบร้อยนัก แต่ก็ทำให้เกิดขั้วรวมขั้วปลายของแท่งเหล็ก แท่งเหล็กฐานหลายอย่างซึ่งให้เห็นว่าทฤษฎีโมเมนต์มีมูลความจริง คือ

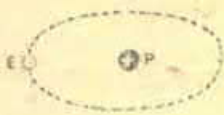
ก. เมื่อหักแม่เหล็กออกเป็นสองชิ้น เราจะได้แม่เหล็กสองแท่ง ซึ่งมีความแรงขั้วคงเดิม และถ้าเราหักแม่เหล็กออกเป็นหลาย ๆ แท่ง ทุก ๆ ชิ้นก็เป็นแม่เหล็กซึ่งมีความแรงขั้วเท่า ๆ เดิมเสมอ.

ข. ปรากฏการณ์ของแม่เหล็กที่มีขั้วอยู่สองขั้วของแท่งแม่เหล็ก (Consequent Poles) และที่เราอาจทำแท่งเหล็กแท่งหนึ่งให้เป็นแม่เหล็กได้หลาย ๆ ชิ้น คือมีขั้วอยู่ระหว่างปลายของแม่เหล็กด้วย หรือทำให้เป็นแม่เหล็กชิ้นเดียวมีขั้วเฉพาะที่ปลายเท่านั้นก็ได้ นี่แสดงให้เห็นว่าภายในแท่งเหล็กมีแม่เหล็กเล็ก ๆ คือ โมเมนต์อยู่แล้ว

ค. ผลแห่งการทำแม่เหล็กโดยวิธีนี้ ก็ยังแสดงให้เห็นชัดเหมือนกัน ว่าทฤษฎีนี้ถูกต้อง



## รูปที่ 23



ก. ไฮโดรเจน



ข. ฮีเลียม

E = อิเล็กตรอน

P = นิวเคลียส (โปรตรอนสำหรับไฮโดรเจน)

ถ้า E จะรอบแกนทวนนาฬิกา จะนับเป็น  
ขั้วหนึ่ง ขั้วตรงกันข้ามเป็น ขั้วใด ของ

แม่เหล็ก

เคมีของธาตุแตกต่างกัน อิเล็กตรอนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกับมวลสารของนิวเคลียส เช่นสำหรับไฮโดรเจน อิเล็กตรอนหนักกว่า  $1/1850$  เท่าของโปรตรอน ที่นิวเคลียสมีไฟฟ้าดกเป็นปริมาณเท่ากับไฟฟ้าลบของพวกอิเล็กตรอนซึ่งจะรอบ กระนั้น สำหรับ อะตอมหนึ่ง ๆ ก็จะไม่ มีไฟฟ้าปรากฏเลย แต่เนื่องจาก การ หมุนเวียน ของอิเล็กตรอนซึ่งเหมือนกันกับกระแสไฟฟ้าไหลเป็นวงจรกลม ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น เราจึงอาจถือได้ว่าทุก ๆ อะตอมมีอำนาจแม่เหล็ก เมื่อวัตถุหนึ่ง ๆ ยังไม่มีอำนาจแม่เหล็ก อิเล็กตรอนของอะตอมในวัตถุนี้จะหมุนไม่เป็นระเบียบและทำลายอำนาจกันเอง และแกน (Axis) ของมันหันไปทุกทิศทุกทาง และอำนาจแม่เหล็กของทุก ๆ อะตอมทำลายกันพอดี แต่เมื่อสารนั้นกลายเป็นแม่เหล็กอิเล็กตรอนของอะตอมทั้งหมดหมุนตามกันไปทางเดียว เราอาจอธิบายปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่ยุ่งยาก โดยใช้ทฤษฎีนี้ได้ดีกว่าทฤษฎีโมเลกุล

หมายเหตุ นิวเคลียสของไฮโดรเจน ชื่อว่าโปรตรอนมีประจุ ปฏิฐาน (+) ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าของประจุลบอิเล็กตรอน เพื่อสะดวกจะใช้คำว่า นิวเคลียส สำหรับธาตุอื่น ๆ. สำหรับวิชาแม่เหล็กไฟฟ้า แรงแม่เหล็ก เราถือว่า อิเล็กตรอนมีประจุไฟฟ้า นิเสธ (-) หนึ่งหน่วย และโปรตรอนมีประจุไฟฟ้า ปฏิฐาน (+) หนึ่งหน่วย

ถ้าจะมีหลายอะตอม ทุก ๆ อะตอมประกอบด้วยนิวเคลียส (หรือโปรตรอน (Proton) สำหรับไฮโดรเจน) ซึ่งมีอิเล็กตรอน เป็นบริวาร หมุน รอบ อย่าง พระอาทิตย์มีบริวารหมุนรอบ จำนวนอิเล็กตรอนจะมากขึ้นแล่นแค่นี้ของธาตุหนึ่ง ๆ สำหรับไฮโดรเจนมีหนึ่งอิเล็กตรอนของ และฮีเลียมมีสอง จำนวนอิเล็กตรอนนั้นเขา เรียกว่า "Electronic number" และเป็นสิ่งที่ทำให้สมบัติทาง

## แบบฝึกหัดแม่เหล็กบทที่ 1

1. ท่านเข้าใจความหมายต่อไปนี้ว่าอย่างไร ?

ขั้วแม่เหล็ก สนามแม่เหล็ก เส้นแรงแม่เหล็กและความซึมได้ อุณหภูมิวิกฤต  
Magnetostriktion Consequent Poles และ Coercive Force

2. อธิบายวิธีทำแม่เหล็ก และบอกกฎเกี่ยวกับการเหนี่ยวนำ

3. ทฤษฎีโมเลกุลและอิเล็กตรอนเกี่ยวกับแม่เหล็กมีว่าอย่างไร ? ให้เหตุผลทางการทดลองที่ช่วยให้เราเห็นว่า ทฤษฎีถูกต้องหรือคลาดเคลื่อนอย่างไร ?

4. จงอธิบายว่า เราจะแสดงเส้นแรงแม่เหล็กได้อย่างไร และให้เขียนรูปแสดง ถ้า:-

ก. เวลาแม่เหล็กอยู่แท่งเดียว ?

ข. เวลาแม่เหล็กอยู่สองแท่งใกล้กัน และขนานกัน

ผลแตกต่างกันอย่างไร เพราะเหตุใด ?

5. จงอธิบายว่าทำไมเส้นแรงแม่เหล็กจึงไม่ตัดกัน.

6. การเหนี่ยวนำคืออะไร ทำอย่างไรเราจึงจะรู้ว่าการเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในสิ่งใดได้มากที่สุด ใดได้น้อย

7. "โลกเป็นแม่เหล็กแท่งใหญ่" มีความหมายว่าอย่างไร ?

## บทที่ 2

### ทฤษฎีเบื้องต้น

#### 1. กฎของการดึงดูดและการขจัดระหว่างมวลของนิวตัน ความแรงของ

แรงดึงดูดระหว่างมวลแม่เหล็กเป็นสิ่งที่ช่วยให้วัดความแรงของได้ และเขาคิดถึงกันว่า ความแรงของมวลแม่เหล็กอาจจะวัดได้ด้วยแรงบนวัตถุที่กำหนดให้คือหนึ่งหน่วยมวล ซึ่งอยู่ห่างจากกันเท่ากับระยะที่กำหนดให้.

สมมติว่ามวลความแรง  $m_1$  ที่ A และ  $m_2$  ที่ B ถ้าเปลี่ยนความแรงของวัตถุ A แรงบนวัตถุ A เนื่องจาก B ก็จะเป็นสัดส่วนตรงกับมวลความแรงของวัตถุ A



รูปที่ 24

$$F \propto m_1$$

เช่นเดียวกัน

ถ้าวัตถุ A คงตัวและที่ B เปลี่ยนค่าไป  $F \propto m_2$

ดังนั้นเมื่อความแรงของวัตถุ A และ B เปลี่ยนพร้อมกัน.

$$F \propto m_1 \cdot m_2 \quad \dots \dots \dots (1)$$

ดังนั้นจึงสามารถแสดงกฎแรกได้ว่า แรงระหว่างมวลแม่เหล็กคู่หนึ่งเป็นสัดส่วนตรงกับผลคูณของกำลังสองของระยะห่าง

จากการทดลองและเมื่อพิจารณา การเกี่ยวข้องระหว่าง วิชาเคมี วิชาแสงเสียง และความร้อน เมื่อมีการ “สั่นไหว” ออกจากจุดหนึ่งๆ อิทธิพลก็จะแปรเป็นสัดส่วนผกผันกับกำลังสองของระยะทาง เช่นถ้าเพิ่มระยะระหว่างวัตถุเป็น 2, 3, 4 . . . . . หน่วย และให้ความแรงของวัตถุ A และ B คงตัว แรงก็จะแปรเป็น  $\frac{1}{4}, \frac{1}{9}, \frac{1}{16} \dots$  ของแรงเมื่อระยะเป็น 1 หน่วย.

นั่นคือ 
$$F \propto \frac{1}{d^2} \quad \dots \dots \dots (2)$$

เมื่อ  $d$  = ระยะระหว่างขั้วทั้งสอง

นั่นคือ กฎกำลังสองผกผัน เมื่อรวมกฎทั้งสองเข้าเป็นกฎเดียวกันก็อาจเขียน

ได้ดังนี้ :-

$$F = a \frac{m_1 m_2}{d^2} \dots\dots\dots (3)$$

$a$  มีค่าคงตัวสำหรับวัตถุสองชิ้น ๆ ซึ่งอยู่ระหว่างขั้วทั้งสอง และเรานิยมเขียน  $\frac{1}{\mu}$  แทน และเราเรียก  $\mu$  ว่า ความซึมได้ของตัวกลางนั้น ๆ ในอากาศเราอาจถือเอาว่า  $a = 1$  เพราะ  $\mu = 1$  สำหรับอากาศ ความจริง  $\mu$  จะเท่ากับ 1 เพราะในสุญญากาศเท่านั้น ฉะนั้นเมื่อขั้วแม่เหล็กสองขั้วมีความแรง  $m_1$  และ  $m_2$  อยู่ห่างกัน  $d$  เซนติเมตร ในสุญญากาศหรืออากาศ แรงระหว่างขั้วทั้งสองจะเกิดขึ้นจะเป็น

$$F = \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

จากกฎเหล่านี้เราอาจให้ความหมาย ขั้วที่มีความแรงหนึ่งหน่วย หรือ หน่วยขั้ว ได้ดังนี้

“เมื่อเราเอาขั้วสองขั้วที่มีความแรงเท่ากัน มาวางห่างกัน 1 ซม. ในสุญญากาศ และถ้าเกิดแรงดึงดูดหรือดุดึงต่อขั้วหนึ่ง ๆ เท่ากับหนึ่งไดน์ ขั้วทั้งสองต่างก็จะเป็นหน่วยขั้ว”

ฉะนั้นถ้าเราเอา ขั้ว เหมือนกันสองขั้ว และต่างก็มี ความแรง หนึ่งหน่วย วางไว้ในสุญญากาศ หรืออากาศ ก็จะได้เกิดแรงผลักระหว่างขั้วเท่ากับ 1 ไดน์ แต่ถ้าขั้วไม่เหมือนกันแรงจะเป็นแรงดึงดูด 1 ไดน์ (หนึ่งไดน์มีค่าเท่ากับน้ำหนักประมาณ  $\frac{1}{981}$  กรัม)

ตัวอย่างที่ 1

1. ขั้วแม่เหล็กสองขั้วต่างมีความแรงเท่ากัน เมื่อวางอยู่ห่างกัน 5 ซม. จะเกิดแรงระหว่างขั้วหนึ่ง ๆ 200 ไดน์ จงหาความแรงของขั้ว.

จากกฎกำลังสองผกผัน  $F = \frac{m_1 m_2}{d^2}$  ให้  $m_1 = m_2 = m$

$$F = \frac{m \cdot m}{d^2}$$

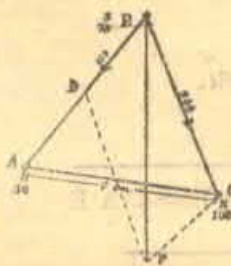
$$200 = \frac{m^2}{d^2}$$

$$m = \sqrt{200 \times 25} = 70.7 \text{ หน่วยมวล}$$

## ตัวอย่างที่ 2

2. ABC เป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า ยาวด้านละ 5 ซม. มวลเห็น 58 หน่วย  
ที่ A ขวได้ 75 หน่วยที่ B และขวาเห็น 100 หน่วยที่ C จงหาแรงบนวัตถุ B

ในทันทีเห็นเขาว่า A, B และ C เป็นรูปร่างหนึ่งของแม่เหล็กสามแท่ง ซึ่งยาว  
มากจนอำนาจขั้วอีกข้างหนึ่งของแม่เหล็กทั้งสามไม่เกี่ยวข้องในการมีผลด้วยกัน



รูปที่ 25

แรงต่อของ B เนื่องจากของ A จะเป็นแรงดึงดูด  
และนั่นแรงจะจาก B ไปยัง A (B พยายามเคลื่อนเข้า  
ไปหา A เช่นเดียวกัน แรงบน A เนื่องจาก B จะ  
จาก A ไปยัง B เพราะ A พยายามเคลื่อนเข้าหา  
B เราใช้ลูกศรแสดงทิศทางของแรงหรือขนาด) และ

$$\text{ขนาดของแรง} = \frac{75 \times 50}{5 \times 5} = 150 \text{ ไดน์}$$

$$\text{เช่นเดียวกัน แรงบน B เนื่องจาก C จะตาม BC และขนาด} = \frac{75 \times 100}{5 \times 5}$$

= 300 ไดน์ หาแรงรวมเนื่องจาก A และ C ได้โดยการสร้าง สามเหลี่ยม BD แทนแรง  
150 ไดน์ B C แทนแรง 300 ไดน์ และ B D F C เป็นรูปสี่เหลี่ยมด้านขนาน มีด้าน BD

และ  $BC$  และมุม  $DBC$  เท่าที่กำหนดให้ โดยการวัด  $BF$  ได้แรงลัพธ์  $= BF \times \frac{150}{BD}$  ไคน์

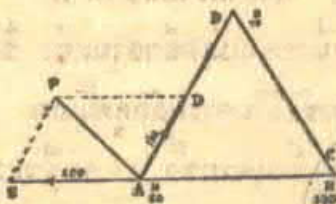
หรือโดยการคำนวณได้แรงรวม

$$BF = \sqrt{BD^2 + BC^2 + 2BD \cdot BC \cos DBC}$$

$$= \sqrt{150^2 + 300^2 + 2 \times 150 \times 300 \times \frac{1}{2}}$$

$$BF = \sqrt{157500} = 399.3 \text{ ไคน์}$$

2. (ข) หาแรงคัตตัว  $A$  เนื่องจาก  $B$  และ  $C$ .



รูปที่ 26

แรงบน  $A$  เนื่องจาก  $B$  จะไปตามแนว  $AB$  (คัตตัว)

$$= \frac{50 \times 75}{5} = 150 \text{ ไคน์}$$

แรงบน  $A$  เนื่องจาก  $C$  จะไปตาม  $CE$  (ผลัก) =

$$\frac{50 \times 100}{5} = 200 \text{ ไคน์.}$$

$$\therefore \text{แรงลัพธ์ } AF = \sqrt{AD^2 + AE^2 + 2AD \cdot AE \cos DAE}$$

$$= \sqrt{150^2 + 200^2 - 2 \times 150 \times 200 \times \frac{1}{2}}$$

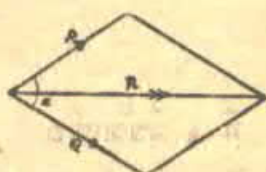
$$= \sqrt{32500} = 180.3 \text{ ไคน์}$$

$$\cos DAE = 120^\circ \cos 120^\circ = -\frac{1}{2}$$

โดยการสร้างรูปสี่เหลี่ยมด้านขนาน ได้แรงลัพธ์  $= AF \times \frac{100}{AD}$   $AF$  และ  $AD$  คือ ความยาวท่อนใด

## ข้อสังเกต

การประกอบหรือรวมแรงในทันที เราใช้วิธีเดียวกันกับในกลศาสตร์ เช่นถ้ามี



รูปที่ 27

แรงสองแรง  $P$  และ  $Q$  ทำมุม  $\alpha$  ซึ่งกันและกัน แรง

$$รวม R^2 = P^2 + Q^2 + 2PQ \cos \alpha \quad \text{และถ้ามี}$$

หลายแรง มากกว่าสอง ก็หาผลรวมกันทีละคู่ ๆ ไปจน

เหลือแรงเดียว หรือใช้วิธีอื่น ๆ ในวิชากลศาสตร์

## 2. ความเข้มของสนามแม่เหล็ก

เมื่อเอาแม่เหล็กวางในสนามแม่เหล็ก ก็เกิดมีแรงขึ้นต่อขั้วทั้งสองของแท่งแม่เหล็ก เราอาจจะวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กได้ โดยหาแรงบนขั้วของแม่เหล็ก ถ้าเอาขั้วแม่เหล็กที่มีความแรงขั้ว  $m$  วางไว้ในสนามความเข้ม  $H$  แรงซึ่งบังเกิดขึ้นบนขั้วนั้น คือ

$$F = Hm.$$

ฉะนั้น แรงบนหน่วยขั้ว ( $m=1$ ) จะเท่ากับความเข้มของสนามที่จุดนั้น และเราจะให้นิยามของ หน่วยของความเข้มของสนามได้ ว่า เมื่อเอาขั้วหนึ่งหน่วยวางในสนามซึ่งมีความเข้มหนึ่งหน่วย แรงบังเกิดขึ้นจะเป็น 1 หน่วยของแรง หน่วยของความเข้มเป็น เกาส์ ถ้าหน่วยของแรงเป็น ไดน์

แต่ได้ทราบแล้วว่าแรงระหว่างขั้ว  $= \frac{m_1 m_2}{d^2}$  ดังนั้นแรงบนหน่วยขั้ว  $m_1$  เนื่องจากขั้ว  $m_2$  ซึ่งอยู่ห่างจากขั้ว  $m_1$  อยู่  $d$  เซนติเมตร มีค่า  $= \left( \frac{m_2}{d^2} \right) \times 1$  เปรียบเทียบกับข้างบน เราจะเห็นทันทีว่า  $H$  เท่ากับ  $\frac{m_2}{d^2}$  นั่นคือ  $\frac{m_2}{d^2}$  คือสนามเนื่องจากขั้ว  $m_2$  ที่จุดห่างจากมัน  $d$  เซนติเมตร

ข้อที่ควรจำเสมอคือ สนามแม่เหล็กเป็นสิ่งที่ทิศทางและขนาดเหมือนกันอย่างแรง เราเรียกสิ่งที่มีทิศทางและขนาดว่า เวกเตอร์ ฉะนั้นโดยวิธีเดียวกันการประกอบแรงดังกล่าวดังนี้ เราถือว่าทิศทางสนามคือ ทิศทางที่ขั้วเหนือของแม่เหล็กจะเคลื่อนตามไป ถ้าขั้วเหนือนั้นอิสระและโดดเดี่ยว บางทีเราถือว่าขั้วเหนือ

เป็นบวก + และลบได้เป็น - และบางครั้งในการคำนวณ เราได้เครื่องหมายติดลบไปด้วย  
ดังนั้นข้อใดก็จะเกิดขึ้นพจน์กับต้นาม ในการคำนวณ ควรเขียนแผนภาพประกอบ และ  
ได้ลูกศรให้ถูกต้องเสมอ

ตัวอย่างการประกอบหรือรวมสนาม

ตัวอย่างที่ 3 (ก) AB เป็นเส้นตรงยาว 10 ซม. ที่ A มีขั้วเหนือ อยู่  
10 หน่วย ที่ B มีขั้วใต้ 15 หน่วย จงหาสนามเนื่องจากขั้วทั้งสองที่จุดซึ่งอยู่ระหว่าง  
กลาง A และ B.



รูปที่ 28

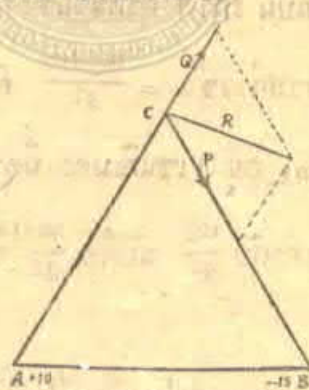
สนามเนื่องจากขั้ว + 10 หน่วยที่ C หูตามแนว CB =  $\frac{10}{5^2} = 0.40$  หน่วย

สนามเนื่องจากขั้ว - 15 หน่วยที่ C หูตามแนว CB =  $\frac{15}{5^2} = 0.60$  หน่วย

สนามทั้งสองขั้วตามกัน (ลูกศร) มันจึงช่วยกัน

สนามรวม =  $0.40 + 0.60 = 1$  หน่วย

(ข) C อยู่ห่างจาก A และ B 10 ซม.



รูปที่ 29

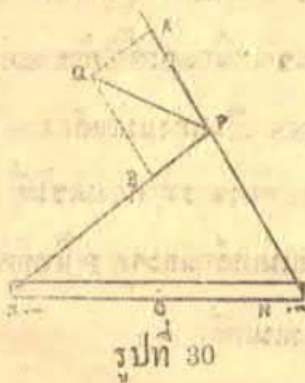
สนามเนื่องจากขั้ว A ที่ C ตามแนว AC =  $\frac{10}{10^2} = 0.10$

สนามเนื่องจากขั้ว B ที่ C ตามแนว BC =  $\frac{15}{10^2} = 0.15$

เนื่องจาก  $ABC$  เป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า และ  $\angle QCP = 120^\circ$   
 $\cos 120 = -\frac{1}{2}$

$$\begin{aligned} \therefore \text{สนามรวมระหว่างแรงทั้งสอง} &= \sqrt{P^2 + Q^2 + 2PQ \cos \alpha} \\ &= \sqrt{0.10^2 + 0.15^2 + 2 \times 0.1 \times 0.15 \times \left(-\frac{1}{2}\right)} \\ &= \sqrt{0.175} = 0.132 \text{ เกร็ด} \end{aligned}$$

สนามที่จุดหนึ่ง ๆ เนื่องจากแท่งแม่เหล็ก



รูปที่ 30

หลักวิชาสนามเนื่องจากแท่งแม่เหล็ก สมมติ

$NS$  เป็นแท่งแม่เหล็กมีความยาว  $m$  ฉะนั้นขั้วเหนือมีความยาว  $+m$  และขั้วใต้  $-m$  และต้องการหาค่าความเข้มของสนามที่จุดใดจุดหนึ่ง  $P$  ในการหาความเข้มของสนามที่  $P$  เนื่องจากขั้วใต้ของ  $N$  และ  $S$  ต้องหาสนามเนื่องจากขั้วทั้งสองนี้  
แล้วนำสนามทั้งสองมาบวกกัน  
แล้วนำสนามทั้งสองมาบวกกัน

กล่าวมาแล้ว

ความเข้มที่  $P$  เนื่องจากขั้วเหนือ  $= \frac{m}{NP^2}$  และ  $\vec{r}$  ไปตามแนว  $NP$  (สนามเนื่องจาก

จากขั้วเหนือเราถือว่าขั้วเหนือจากขั้วและผ่านจุดที่เราต้องการหาความเข้ม) สนามเนื่องจาก

จากขั้วใต้เราถือว่าขั้วใต้จากขั้วและผ่านจุดที่เราต้องการหาความเข้ม และความเข้มที่  $P$

เนื่องจากขั้วใต้  $= \frac{m}{PS^2}$  ตามแนว  $PS$  เมื่อสนามไม่อยู่บนเส้นตรงอันเดียวกันเราจะบวกกัน

กันตามธรรมดาไม่ได้ เราต้องประกอบอย่างฉิวประกอบแรง คือ

(1) โดยการสร้างรูปสี่เหลี่ยมด้านขนาน  $PAQB$  มี  $PA = \frac{m}{NP^2}$  และ  $PB$

$= \frac{m}{SP^2}$  เป็นด้านทั้งสอง และ  $APB$  เป็นมุมระหว่างด้าน แล้วเส้นทแยงมุม  $PQ$  คือ

สนามรวมเนื่องจากสนามเนื่องจากขั้วทั้งสอง (ในการสร้างให้ได้ออกมาตรงส่วนแล้วแต่

เห็นเหมาะ) ฉะนั้นโดยการวัด  $PQ$  จะได้สนามรวมโดยการเทียบมาตราส่วนที่ใช้

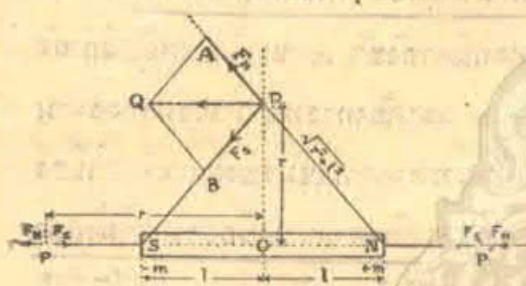
(2) โดยการคำนวณ ถ้าเรารู้มุม APB หรือเรารู้ขนาดหาได้โดยตรงหรือโดยทางอ้อม เราจะได้คำนวณค่าของแรงจากแท่งแม่เหล็ก

$$= \sqrt{H_n^2 + H_s^2 + 2H_n H_s \cos P}$$

$$H_n = \frac{m}{PN^2}, H_s = \frac{m}{SP^2}, P = \text{มุม APB}$$

ต่อไปนี้จะแสดงวิธีหาสูตรสำหรับความเข้มของสนามที่จุดบนแกนและบนอิกเซอร์ของแท่งแม่เหล็ก

ก. ความเข้มที่จุดบนแกนของแท่งแม่เหล็ก (A-Gauss Position) (แกนแม่เหล็ก



รูปที่ 31

คือเส้นที่ลากผ่านขั้วเหนือและขั้วใต้ของแท่ง)

สมมติ NS เป็นแท่งแม่เหล็กยาว 2l

มีความแรงขั้ว m ต้องการหาความเข้มที่ P

บนแกน NS ของแม่เหล็กและจุด P อยู่ห่าง

จากกึ่งกลางของแม่เหล็ก = r

ความเข้มที่ P เนื่องจากขั้ว N ที่ไปตามแนว NP =  $\frac{m}{(r+l)^2}$

“ P “ S “ PS =  $\frac{m}{(r-l)^2}$

เมื่อคำนวณอยู่บนเส้นตรงอันเดียวกัน และขั้วไปคนละข้างเช่นนี้ เราจะได้คำนวณ  
ลัพธ์โดยหาผลต่างระหว่างอำนาจทั้งสอง

$$\therefore \text{ความเข้มที่จุด P เนื่องจากขั้วทั้งสอง} = \frac{m}{(r-l)^2} - \frac{m}{(r+l)^2}$$

$$= \frac{4mr}{(r^2-l^2)^2}$$

$$= \frac{2Mr}{(r^2-l^2)^2}$$

$M = 2 ml = m \times$  ความยาวของแม่เหล็ก เราเรียก  $M$  ว่า โมเมนต์แม่เหล็ก  
 ค่านี้จะคงตัวสำหรับแท่งแม่เหล็กหนึ่งๆ และเพราะว่าขั้วแม่เหล็กทั้งสองต้องอยู่ด้วยกัน  
 เสมอ ดังนั้น ค่าจึงสำคัญมากสำหรับแท่งแม่เหล็ก ถ้าแม่เหล็กสั้น เพื่อสะดวก  
 ในการคำนวณหาเขียนได้ว่า

$$\text{สนามบนแกนเนื่องจากแม่เหล็กสั้น} = \frac{2M}{r^3}$$

ที่เรากล่าวว่าแม่เหล็กสั้นหรือยาว เราหมายถึงแม่เหล็กยาวน้อยหรือมาก เปรียบ  
 เทียบกับระยะทาง  $r$  ถ้า  $\frac{r}{l} > 20$  บางทีเราจะถือว่าแม่เหล็กนั้นสั้น เพราะใน  
 การทั้ง  $l$  เล็ก เราจะได้ผลคลาดเคลื่อนไปไม่เกิน  $\frac{1}{1}$  ./. ฉะนั้นที่จุด  $P$  สนามจะไปตาม  
 แนว  $PS$  และมีความเข้ม  $\frac{2Mr}{(r^2+l^2)^2}$  เพราะสนามเนื่องจากขั้วใต้ (ซึ่งอยู่ใกล้กว่า)  
 มากกว่า แต่ที่  $P$  ห่างจากจุดศูนย์กลางแม่เหล็ก  $r$  จะมีความเข้มเท่ากัน แต่สนาม  
 ไปตามแนว  $NP$  ออกจากแท่งแม่เหล็ก เพราะสนามเนื่องจากขั้วเหนือ (ซึ่งอยู่ใกล้กว่า)  
 มากกว่าที่เนื่องจากขั้วใต้

ข. ความเข้มของสนามที่จุดบนเส้นออคิวเตอร์ของแม่เหล็ก (B.Position)

(เส้นออคิวเตอร์คือเส้นที่คงฉากกับเส้นแกน และแบ่งครึ่ง ระยะ ระหว่างขั้ว ของแท่ง  
 แม่เหล็ก (ดูรูปที่ 30 ส่วนบน) ให้แม่เหล็กมีความยาว  $2l$  และ  $r$  เป็นระยะจาก  
 จุดกึ่งกลางของแม่เหล็กถึงจุด  $P$

$$\therefore \text{จากรูป } PN = SP = \sqrt{r^2 + l^2}$$

$$\therefore \text{ความเข้มเนื่องจากขั้ว N ตามแนว PA} = \frac{m}{PN^2} = \frac{m}{(r^2 + l^2)}$$

$$\therefore \text{ความเข้มเนื่องจากขั้ว S ตามแนว PB} = \frac{m}{PS^2} = \frac{m}{(r^2 + l^2)}$$

ดังนั้นทั้งสี่เหลี่ยมเท่ากัน ดังนั้นเมื่อสร้างรูปสี่เหลี่ยมด้านขนาน PAQB จะได้  
 ด้านทั้งสี่เท่ากันและต่างก็  $= \frac{m}{r^2 + l^2}$  เพราะฉะนั้น PQ แบ่งครึ่งมุม APB

เราอาจหาค่าของสนามรวมได้หลายวิธี ดังต่อไปนี้:-

(1) ในรูปสามเหลี่ยม PNS เราได้มุม  $N = \text{มุม } S$

และ .. .. APQ .. มุม P = มุม Q

และในรูปสามเหลี่ยมทั้งสอง ได้ AQ ขนานกับ PS (สร้าง)

∴ มุม PAQ = มุม NPS

และ ∴ มุมที่เหลือนของรูปสามเหลี่ยมทั้งสองเท่ากันมุมต่อมุม เพราะรูป  
 สามเหลี่ยมทั้งสองเป็นรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่ว.

∴ รูปสามเหลี่ยม PNS และ APQ เป็นแบบเดียวกัน.

$$\frac{PQ}{PA} = \frac{NS}{PN}$$

$$\therefore \text{สนามที่ } PQ = \frac{NS}{PN} \times PA = \frac{2l \times \frac{m}{(r^2 + l^2)}}{\sqrt{r^2 + l^2}}$$

$$= \frac{2 m l}{(r^2 + l^2)^{3/2}} = \frac{M}{(r^2 + l^2)^{3/2}}$$

$$\text{ถ้า } \frac{r}{l} > 20 \text{ หรือแม่เหล็กต้น สนาม} = \frac{M}{r^3}$$

หรือ (2) เราอาจหาสนามรวมได้โดยหาสนามรวมตามแนว PQ และแนวตั้ง

ได้ฉากกับ PQ

สนามตามแนว PQ ทั้งหมด = สนามตามแนว PQ เนื่องจากสนามตามแนว  
 PA. + สนามตามแนว PQ เนื่องจากสนามตามแนว PB.

$$\begin{aligned}
&= \frac{PA \cos APQ + PB \cos BPQ}{\sqrt{r^2 + l^2}} \\
&= \frac{m}{(r^2 + l^2)} \times \frac{l}{\sqrt{r^2 + l^2}} + \frac{m}{(r^2 + l^2)} \times \frac{l}{\sqrt{r^2 + l^2}} \\
&= \frac{2ml}{(r^2 + l^2)^{3/2}} \\
&= \frac{M}{(r^2 + l^2)^{3/2}}
\end{aligned}$$

และสนามรวมตามแนวตั้งได้ฉากกับ PQ = PA sin APQ - PB sin BPQ

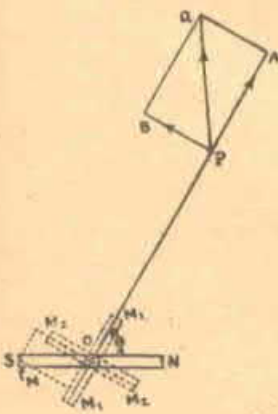
$$= 0$$

ดังนั้นสนามรวมเนื่องจากสนาม PA และ PB จะอยู่ในแนว PQ และมีค่า

$$\frac{M}{(r^2 + l^2)^{3/2}} \text{ อย่างวิธีที่ 1.}$$

หมายเหตุ ในตัวอย่างข้างบน มีข้อควรสังเกต คือสนามที่จุดบนขั้วเคอร์จะขนานกับแกนแม่เหล็ก ฉะนั้นถ้าสนามที่จุดบนเส้นเคอร์จะขนานกับแกนแม่เหล็ก ฉะนั้นถ้าสนามที่จุดบนเส้นเคอร์จะขนานกับแกนแม่เหล็ก

ง. สนามที่จุด P ใดก็ได้ที่หนึ่งเนื่องจากแม่เหล็กสั้น



รูปที่ 32

สมมติ M เป็นโมเมนต์ของแม่เหล็ก NS P เป็นจุดอยู่บน OP ซึ่งกำหนด POS = a กับแนวแกน NS และ OP = r.

เราอาจแยกโมเมนต์ของแม่เหล็กออกเป็นสองส่วน อย่างในการแยกแรงหรือสนาม หรือเวกเตอร์ชนิดอื่น ๆ ฉะนั้นแยก M ออกตามแนว OP และตั้งได้ฉากกับ OP จะได้

$$M_1 = M \cos a \text{ ตามแนว OP}$$

$$M_2 = M \sin a \text{ .. ตั้งได้ฉากกับ OP.}$$

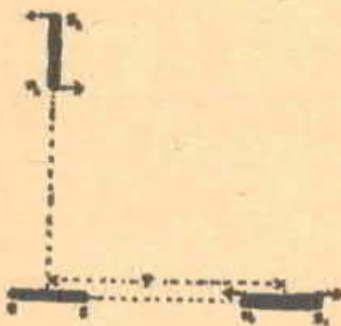
ดังนั้นปัญหาที่กล่าวมาแม่เหล็กสองแท่ง ซึ่งมีโมเมนต์

$M_1$  และ  $M_2$  และจะต้องหาสนามเนื่องจากแม่เหล็กทั้งสองแท่ง

∴ ความเข้มบนแกนของแม่เหล็กต้น  $M_1$  ที่  $P = \frac{2M_1}{r^3} = \frac{2M \cos a}{r^3}$  และความเข้มบนอิกซ์เทอร์แม่เหล็กต้น  $M_2$  ที่  $P = \frac{M_2}{r^3} = \frac{M \sin a}{r^3}$  สนามทั้งสองนี้ตั้งได้ฉากกัน เพราะขนานกับแกนของแม่เหล็ก  $M_1$  และ  $M_2$  ซึ่งตั้งได้ฉากกัน

$$\begin{aligned} \therefore \text{สนามรวมเนื่องจากแม่เหล็ก } M_1 \text{ และ } M_2 \text{ ตามแนว } PQ \\ = \sqrt{\left(\frac{2M \cos a}{r^3}\right)^2 + \left(\frac{M \sin a}{r^3}\right)^2} \\ = \frac{M}{r^3} \sqrt{3 \cos^2 a + 1} \end{aligned}$$

นี่คือสนามเนื่องจากแม่เหล็กต้น  $M$  ที่จุด  $P$  และสนามนี้จะขั้วตามแนว  $PQ$  ซึ่งทำมุม  $\theta = \tan^{-1} \frac{BP}{AP}$  กับเส้น  $OP$ .



### 3. แรงระหว่างแม่เหล็กต้นสองแท่งวาง

ให้แกนอยู่บนเส้นตรงเดียวกัน

รูปที่ 33

สมมติ แม่เหล็ก  $NS$  มีโมเมนต์  $M$

∴  $NS_1$  ∴  $M_1$  ยาว  $2l_1$  และกำลังขั้ว  $m_1$

$$\therefore \text{สนามเนื่องจากแม่เหล็กต้น } M \text{ ที่จุด } N_1 = \frac{2M}{(r-l)^3} \quad (\text{ระยะ} = r - l_1)$$

$$\therefore \text{แรงบนขั้ว } N_1 \text{ เนื่องจากแม่เหล็ก } M = \frac{2M}{(r-l)^3} \times m_1$$

$$\text{เช่นเดียวกันแรงบนขั้ว } S_1 \quad \therefore \quad = \frac{2M m_1}{(r+l)^3} \quad (\text{ระยะ} = r + l_1)$$

แรงทั้งสองนี้ขั้วตามเส้นตรงเดียวกันและขั้วไปคนละข้าง.

$$\therefore \text{แรงรวมบนแท่งแม่เหล็ก } N_1 S_1 = \frac{2M m_1}{(r-l_1)^3} - \frac{2M m_1}{(r+l_1)^3}$$

$$= \frac{2M m_1 (6r^2 l_1 + 2l_1^3)}{(r^2 - l_1^2)^3} \quad (1)$$

ถ้าแม่เหล็ก  $N_1 S_1$  ดันมาก เราทิ้ง  $l_1^2$  และ  $l_1^3$  ออกได้.

$$\therefore \text{แรงระหว่างแม่เหล็กต้นสองแท่ง} = \frac{2M m_1 \times 6r^2 l_1}{r^6}$$

$$= \frac{6M \times 2m_1 l_1}{r^4} = \frac{6M M_1}{r^4} \quad (2)$$

หมายเหตุ (ก) สูตร (1) ใช้ได้สำหรับแม่เหล็กยาวแท่งหนึ่งและต้นแท่งหนึ่ง แต่ไม่จำเป็นต้องจำ เวลาต้องการก็ควรหาเอาเอง (ข) แรงที่ทำได้ จะเป็นแรงดูดตั้ง หรือผลักก็ได้ แล้วแต่ขั้วใกล้เคียงกันต่างกัน หรือเหมือนกันตามลำดับ

แรงหมุนเมื่อแม่เหล็กสั้น ๆ สองแท่งวางตั้งฉากกัน และแท่งหนึ่งมีความยาวอยู่ตามแนวศูนย์สูตรของอีกแท่งหนึ่ง.

สมมติให้  $N_2 S_2$  ตั้งฉากกัน และวางตามแนวเส้นศูนย์สูตรของ  $N_1 S_1$  ให้  $N_2 S_2$  มี โมเมนต์  $M_2$ , ยาว  $2l_2$  และมีกำลังขั้ว  $m_2$ .

$$\text{สนามที่ } N_2 \text{ เนื่องจาก } M = \frac{M}{(r-l_2)^3}$$

$$\therefore \text{แรงบน } N_2 \quad M = \frac{M}{(r-l_2)^3} \times m_2$$

$$\text{เช่นเดียวกันแรงบน } S_2 \quad M = \frac{M m_2}{(r+l_2)^3}$$

เพราะแม่เหล็กสั้นมาก เราอาจตัด  $l_2$  ออกได้ ฉะนั้นแรงทั้งสองนี้เกือบเท่ากัน, ไปคนละทาง, ขนานกัน แต่ไม่ผ่านจุดเดียวกัน จึงทำหน้าที่เป็นแรงคู่สำหรับหมุนแท่ง  $N_2 S_2$  รอบจุดกึ่งกลางของมัน

$$\therefore \text{คู่ควบต่างก็มีค่า } \frac{M m_2}{r^3} \text{ และอยู่ห่างกัน } 2l_2 (= N_2 S_2).$$

$$\therefore \text{แรงหมุนเนื่องจากแรงคู่} = \frac{M m_2}{r^3} \times 2l_2 = \frac{M M_2}{r^3}$$

หมายเหตุ (ก) กริยาบนแท่งแม่เหล็กชิ้นหนึ่ง เนื่องจากอีกชิ้นหนึ่งข่ม

เท่ากันเสมอ. (ข) จะตัด ๗ ออก ก่อนคูณหารไม่ได้ และจะตัดมันออกได้ก็เมื่อรู้ว่ามันมีค่าน้อยเปรียบกับตัวที่มันบวกหรือลบ แต่ถ้ามันคูณกับอีกจำนวนหนึ่งจะตัดมันออกไม่ได้ เช่น เราตัด 2 ออกจาก  $(10^{11} + 2)$  ได้ แต่ตัดออกจาก  $2 \times 10^{11}$  ไม่ได้.

4. ศึกษาเนื่องจากขั้วของแม่เหล็กที่จุด P นี่หมายถึงงานที่จะต้องทำใน



การนำขั้วเหนือหนึ่งหน่วย  
ขั้วจากระยะทาง  $\infty$  มา  
ยังจุด P.

รูปที่ 34

เราจะหาค่าของมันได้ ดังนี้ :-

ให้  $m$  เป็นกำลังขั้วของแม่เหล็กวางอยู่ที่จุด O ต้องการหาค่าที่จุด P ห่าง  
จากจุด O  $r$  ซม. สมมติ R, S, T.....W, X...  $\infty$  เป็นจุดอยู่ใกล้ ๆ กันและค่อยห่าง ๆ  
ออกไปตามลำดับจนถึง  $\infty$ .

$$\text{สนามที่จุด P เนื่องจากขั้ว } m = \frac{m}{OP^2}$$

$$,, ,, Q ,, m = \frac{m}{OQ^2}$$

$$\therefore \text{สนามเฉลี่ยระหว่าง P และ Q} = \frac{m}{OP \cdot OQ}$$

ค่านี้จะใกล้เคียงกับความจริงมากขึ้น ถ้ายัง OP ขึ้นมาก

$$\therefore \text{แรงบนหน่วยขั้วเหนือระหว่าง P และ Q} = \frac{m}{OP \cdot OQ} \times 1 = \frac{m}{OP \cdot OQ}$$

$\therefore$  งานที่จะต้องทำในการเลื่อนหน่วยขั้วเหนือ จาก Q ถึง P มีค่า,

$$W_{PQ} = \frac{m}{OP \cdot OQ} \times PQ = \frac{m}{OP \cdot OQ} \times (OQ - OP)$$

$$\therefore W_{PQ} = \frac{m}{OP} - \frac{m}{OQ}$$

$$\text{ในทำนองเดียวกัน } W_{QR} = \frac{m}{OQ} - \frac{m}{OR}$$

$$.... = ....$$

$$.... = ....$$

$$W_{YZ} = \frac{m}{OY} - \frac{m}{OZ}$$

$$W_{Z\infty} = \frac{m}{OZ} - \frac{m}{\infty}$$

$$\begin{aligned} \therefore W_{PQ} + W_{QR} + \dots + W_{Z\infty} &= \frac{m}{OP} - \frac{m}{\infty} \\ &= \frac{m}{OP} \quad \therefore \frac{m}{\infty} = 0 \end{aligned}$$

นั่นคืองานในการนำหน่วยขั้วหนึ่งจาก  $\infty$  ถึง  $P = \frac{m}{OP}$

$$\therefore \text{ศักดา ที่จุด } P, V_P = \frac{m}{OP} = \frac{m}{r}$$

ฉะนั้นศักดาเนื่องจากขั้วกำลัง  $m$  ที่จุดห่างจากมัน  $r$  มีค่าเท่ากับ  $\frac{m}{r}$  ถ้าตั้งขั้ว  $m$  ทารด้วยระยะไกล  $r$

$\therefore$  ศักดาต่างระหว่างจุดสองจุด  $P_1$  และ  $P_2$  ในเมื่อ  $PO_1 = r_1$  และ  $OP_2 = r_2$  มีค่าเท่ากับ ศักดาที่  $P_1$  - ศักดาที่  $P_2$

หมายเหตุ ในการหาศักดาเนื่องจากขั้วแม่เหล็กหลายขั้วที่จุดใดจุดหนึ่ง ต้องหาศักดาเนื่องจากแม่เหล็กแต่ละขั้วที่จุดนั้น โดยถือว่าขั้วหนึ่งเป็นบวกขั้วใดเป็นลบ แล้วเอาจำนวนเหล่านี้บวกกันเข้า ศักดาไม่ใช่เวกเตอร์ เป็นพหุคูณบวกหรือลบตามไม่มีทิศทาง.

ตัวอย่างที่ 4 จงหาศักดาที่จุดบนเส้นศูนย์กลางของแท่งแม่เหล็ก  
สัมมุติ +  $m$  เป็นกำลังขั้วหนึ่ง.  $\therefore -m$  จะเป็นกำลังขั้วใด.

และสัมมุติ  $r$  เป็นระยะจากขั้วหนึ่งไปยังจุดที่ต้องการหาศักดา.

$\therefore r$  จะ  $\dots$  ได้  $\dots$  หาศักดาด้วย.

$$\therefore \text{ศักดาที่จุดเนื่องจากขั้วหนึ่ง} = \frac{+m}{r}$$

$$\dots \dots \dots \text{ได้} = \frac{-m}{r}$$

$$\dots \dots \dots \text{ทั้งนี้} = \frac{+m}{r} + \frac{-m}{r} = 0$$

นั่นคือศักดาเนื่องจากแท่งแม่เหล็กที่จุดบนเส้นกลางของมันจะเป็นศูนย์เสมอ.

### แบบฝึกหัดแม่เหล็กบทที่ ๒

1. ขดเหนี่ยวนำมี 15 หมวี่ วางอยู่ห่างขดขั้วมี 12 หมวี่อยู่ 3 เซนติเมตร จงหาแรงดึงดูดระหว่างขดทั้งสอง และจงแสดงทิศของแรงบนขดทั้งสองโดยลูกศร (20 คาบ).
2. ABC เป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า มีด้านยาวด้านละ 8 เซนติเมตร และมีขดเหนี่ยวนำ 16 หมวี่ ขดได้ 24 หมวี่ และขดเหนี่ยวนำ 8 หมวี่ ที่จุด AB และ C ตามลำดับ จงหาแรงบนขด B และทิศของแรง แล้วหาแรงที่ขด A และ C และให้เปรียบเทียบแรงบนขดทั้งสอง  $(3\sqrt{7}, 2\sqrt{7}, \sqrt{7})$ .
3. ABC เป็นเส้นตรง AB ยาว 5 ซม. BC ยาว 3 ซม.  
 ก. มีขดเหนี่ยวนำ 20 หมวี่ 30 หมวี่ และขดได้ 16 หมวี่ อยู่ที่ A, B และ C ตามลำดับ จงหาแรงบนขด A เนื่องจากขดขั้วทั้งสอง (19 ตามแนว BC)  
 ข. ถ้ามีขดเหนี่ยวนำ 8 หมวี่ที่ A ขดได้ 15 หมวี่ที่ B และขดได้ 16 หมวี่ที่ C จงหาแรงที่ขด C (24.67).
4. ขดเหนี่ยวนำ 40 หมวี่ วางห่างจากขดได้ 10 หมวี่ 20 ซม. จงหาว่า จะเอาหมวี่ขดเหนี่ยวนำมาวางที่ไหนจึงจะไม่มีแรงบนขดเหนี่ยวนำเลย (20 ซม. จากขดได้และ 40 ซม. จากขดเหนี่ยวนำ)
5. ขดเหนี่ยวนำ 169 หมวี่ อยู่ห่างจากขดเหนี่ยวนำ 36 หมวี่ 8 ซม. จะเอาขดเหนี่ยวนำ 5 หมวี่ มาวางไว้ที่ไหนจึงจะไม่มีแรงบนขดเหนี่ยวนำเลย  
 $(5.47 \text{ ซม. จาก } N_1)$   
 $(2.53 \text{ ซม. ,, } N_2)$
6. ขดเหนี่ยวนำสองขด มีขดขั้วละ 15 หมวี่ วางห่างกัน 9 ซม. จะเอาหมวี่ขดวางไว้ที่ไหนจึงจะไม่มีแรงบนหมวี่ขดนั้น (กึ่งกลาง)  
 ถ้าขดเหนี่ยวนำทั้งสองมีขดขั้วไม่เท่ากัน คือ 45 และ 25 หมวี่ หมวี่ขดใดจะอยู่ที่ไหน (ระหว่างขด 6.75 ซม. จาก  $N_{45}$ ).

ถ้าแทนที่จะเป็นข้อเหนือข้อ เราได้ข้อข้างล่างกันเท่าเดิม และมีกำลังอย่างที่กำหนดไว้ข้างบน หน่วยข้อควรอยู่ที่ไหน (ระหว่างข้อ 6.75 ข.ม. จาก S45).

7. ABCD เป็นรูปสี่เหลี่ยมด้านขนานด้านละ 6 ข.ม. มีข้อเหนือ 15 หน่วย 20 หน่วยที่ A และ C ตามลำดับ และข้อใต้ 12 และ 18 หน่วยที่ B และ D ตามลำดับ จงหาขนาดและทิศทางของแรงบนข้อ C โดยการคำนวณและเขียนรูป (7.8).
8. ข้อสองข้อติดกันด้วยแรง 55 โคน์ เมื่ออยู่ห่างกัน 5 ข.ม. จงหาแรงผลักเมื่ออยู่ห่างกัน 15 ข.ม. (6 $\frac{1}{2}$ ).

ถ้าแรงผลักระหว่างข้อทั้งสองนั้นเป็น 60 โคน์ จงหาว่าระยะระหว่างข้อทั้งสองนั้นเป็นเท่าไร ( $5\sqrt{\frac{11}{12}}$ ).

9. ข้อสองข้อติดกันด้วยแรง 100 โคน์ เวลห่างกัน 2 ข.ม. ถ้าข้อหนึ่งเป็นข้อเหนือ และมีกำลัง 10 หน่วย อีกข้อหนึ่งมีกำลังเท่าไรและเป็นข้อชนิดไหน (ใต้ 40 หน่วย).
10. ก. แม่เหล็กสองแท่งวางขนานเส้นตรงขึ้นเดียวกัน และจุดศูนย์กลางของมันห่างกัน 15 ข.ม. ถ้าแม่เหล็กยาวแต่ละ 10 ข.ม. และมีกำลังข้อแต่ละ 10 หน่วย จงหาแรงระหว่างแท่งแม่เหล็กทั้งสอง (3.28)

ข. ถ้าระยะระหว่างจุดศูนย์กลาง = 20 ข.ม. แม่เหล็กยาวแต่ละ 5 และ 10 ข.ม. และกำลังข้อแต่ละ 15 และ 20 หน่วยตามลำดับ จงหาแรงระหว่างแท่งแม่เหล็กทั้งสอง ( $\frac{11}{12} \cdot 4.5$ )

11. ถ้าบนเส้นตรง ABC AB = 6 ข.ม. BC = 9 ข.ม. ถ้าที่ A มีข้อเหนือ 15 หน่วย และ B มีข้อใต้ 72 หน่วย จงหาอำนาจที่จุด C (37/45).
- ถ้ามีข้อเหนือ 3 หน่วยที่ C จะมีแรงเท่าไรบนข้อนี้ และแรงนั้นจะไปทางไหน (37/15, แนว CB).

12. ABC เป็นรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่ว มีด้าน AB = BC = 10 ข.ม. และ AC = 5 ข.ม. ถ้าที่ A มีข้อเหนือ 5 หน่วย ที่ B ข้อเหนือ 15 หน่วย จงหาความเข้มของสนามที่ C และหาแรงบนข้อ 5 หน่วย วางที่ C (0.278, 1.39).

13. แม่เหล็กยาว 12 ซม. และมีกำลังขั้ว 15 หน่วย จงหา

ก. สนามที่จุดบนแกนแม่เหล็กห่างจากจุดกึ่งกลางแม่เหล็ก 10 ซม. (14.6)

ข. สนามที่จุดบนเส้น ศูนย์สูตรแม่เหล็ก และห่างจากขั้วแม่เหล็ก 10 ซม. (0.180).

14. แม่เหล็กยาว 10 ซม. และมีกำลังขั้ว 100 หน่วย จงหาสนามที่จุดบนแกน และ  
เส้นศูนย์สูตรซึ่งห่างจากจุดศูนย์กลางของแท่งแม่เหล็ก 10 ซม. (8.55 และ 0.72).

15. จงหาความเข้มของสนามที่จุดบนแกนเนื่องจากแท่งแม่เหล็ก ดังจะกำหนดให้ดัง  
ต่อไปนี้:—

| ความยาว 2 l | กำลังขั้ว m | ระยะจากศูนย์กลาง |
|-------------|-------------|------------------|
| 6 ซม.       | 150         | 4 (146.94)       |
| 8 ซม.       | 200         | 10 (4.58)        |
| 10 ซม.      | 100         | 8 (10.52)        |
| 15 ซม.      | 200         | 10 (31.35)       |
| 16 ซม.      | 800         | 10 (74.074)      |

16. จงหาสนามที่จุด P เนื่องจากแม่เหล็กสั้น ๆ NS ซึ่งมีจุดศูนย์กลางเป็น O กำหนดให้

| Moment | OP ซม. | NOP        |
|--------|--------|------------|
| 1,500  | 10     | 0 (3)      |
| 3,000  | 15     | 60 (1.178) |
| 4,000  | 20     | 30 (.904)  |

17. ในข้อ 11, 12, 13, 14, 15, 16 ถ้ารวมขั้วแม่เหล็กซึ่งมีกำลัง 5 หน่วย  
วางอยู่ตามทิศทางที่ให้ แรงที่เกิดขึ้นบนขั้วจะเป็นเท่าไร (เอา 5 คูณสนาม  
ที่หาได้แล้ว)

18. แม่เหล็ก 2 แท่ง ยาว 6 และ 8 ซม. ตามลำดับ อยู่ห่างกัน 15 ซม. ขั้วแรกมี  
กำลังขั้ว 50 หน่วย ขั้วที่สอง 80 หน่วย จงหาแรงแหวนแท่งแม่เหล็กทั้งสอง  
(ให้ใช้วิธีหาสนามเนื่องจากแท่งแม่เหล็ก) (5.8)

19. ถ้ามีจุดหนึ่ง 10 และ 20 หน่วยอยู่ทั้งหมดบนรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า มีด้านยาวด้านละ 5 ซม. จงหาค่าที่ออกมาหนึ่ง. (+ 6)  
ถ้าจุดหนึ่งเป็นจุดใด แทนที่จะเป็นจุดหนึ่งของสองจุด คัดค้านจะเป็นเท่าไร ?  
(+ 2).
20. รูป 6 เหลี่ยมด้านเท่า ABCDEF มีด้านยาวด้านละ 5 ซม. มีจุดหนึ่ง 20 หน่วย 15 หน่วย 30 หน่วย และ 10 หน่วยที่ A, C, D และ F ตามลำดับ และมีจุดใด 5 หน่วย และ 80 หน่วยที่ B และ E จงหาค่าที่ออกมาหนึ่ง. (- 2).
21. ถ้ามีจุดไม่มีความเข้ม (Neutral point) บนแกนของแท่งแม่เหล็ก และห่างจากขั้วที่ใกล้ของแท่ง 10 ซม. จงหาค่าที่ออกมาของแท่งแม่เหล็กนั้น ถ้ามีความยาว 10 ซม. และสนามแม่เหล็กโลกมีความเข้ม 0.27 เกาส์ (36).
22. แม่เหล็กต้นตอของแท่งวางตามแนวเส้นตรงเดียวกัน ห่างกัน 10 ซม. จงหาแรงระหว่างแท่งแม่เหล็ก ถ้ามีโมเมนต์ 100 และ 200 ตามลำดับ (12).
23. แม่เหล็กต้นตอของแท่งวางตั้งฉากกัน แท่งหนึ่งขั้วตามขั้วเคอร์ของอีกแท่งหนึ่ง ถ้าโมเมนต์ของแม่เหล็กมีค่า 80 และ 120 หน่วย และห่างกัน 8 ซม. จงหาค่าของแรงหมก (18.75).

### บทที่ ๓

#### เครื่องมือสำหรับใช้ในการทดลอง

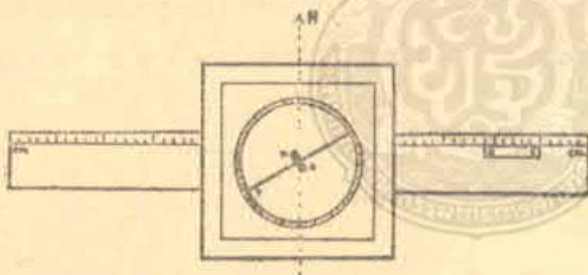
##### 1. แม็กนีโตมิเตอร์

เวลาเอาแม่เหล็กแรงแทนด้วยเส้นไหม หรือวางไว้บนหมุดให้หมุดได้รอบแกนในแนวนอน แม่เหล็กจะชี้ตามแนว เจริญขึ้นของแม่เหล็กโลกเสมอ ถ้าเอาแม่เหล็กอีกแท่งหนึ่งเข้ามา แม่เหล็กนั้นก็จะเป็นไปจากแนวเดิมมากหรือน้อยแล้วแต่โมเมนต์ของ

แต่งแม่เหล็กที่เอามาและระยะห่างระหว่างแม่เหล็กทั้งสอง และแล้วแต่เขาแม่เหล็กเข้า  
มาอย่างไรด้วย หรือเราอาจกล่าวว่แม่เหล็กที่แรงแจนจะเทมากหรือน้อยนั้นแล้วแต่สนาม  
เนื่องจากแท่งแม่เหล็กที่นำเขาเข้ามา ข้อที่ควรจำอย่าลืมอีกคือว่าแม่เหล็กที่แรงแจน  
อยู่ตามแนวความเข้มของ สนามตัวแถมและในกรณี ที่นำ แม่เหล็กเข้ามาใน สนามตัว ก็คือ  
ผลรวมระหว่างสนามแม่เหล็กโลกกับสนามของแม่เหล็กแท่งนั้น.

เครื่องสำหรับวัดมุมที่แม่เหล็กเหไปและเปรียบเทียบสนามแม่เหล็กนั้น เขาเรียกว่า  
แมกนีโตมิเตอร์เห แมกนี โตมิเตอร์ชนิดนี้ประกอบด้วยแม่เหล็กเล็ก ๆ วางบนหมุด  
ให้หมุนได้รอบแกนขึ้นที่จุดศูนย์กลางของวงกลมซึ่งมีมาตราส่วนเป็นองศา ดังได้อาก  
และติดกับแม่เหล็กนั้นหมัเข็มยาว ๆ เมา ๆ ทำด้วยธาตุมีเนียม เพื่อจะช่วยให้เราอ่านมุม  
ที่มันเหไปได้อย่างสะดวก แม่เหล็กเหไปได้เท่าไร เข็มชกเหไปเท่านั้น

ต้องร่างของแมกนี โตมิเตอร์มีมาตราส่วนเป็นเซ็นต์ติเมตร มาตราส่วนทั้งสองนี้



รูปที่ 35 แมกนี โตมิเตอร์เห

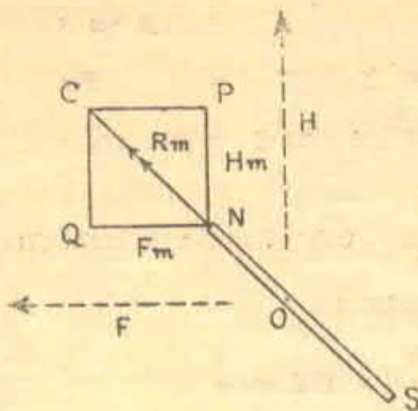
เซ็นต์ติเมตรให้สงได้มากกับหรือตามแนวเมริเดียนแถม และเมื่อเป็นเช่นนั้นแล้ว ปลาย  
ของเข็มชกจะหยุดที่  $0^\circ$  และ  $180^\circ$  หรือ  $90^\circ$  และ  $270^\circ$  พอดี เวลาทำการ ทดลอง  
เขาเขาแท่งแม่เหล็กมาวางบนมาตราส่วนเซ็นต์ติเมตรให้ ดังได้อากกับเมริเดียนแม่เหล็ก  
โลกเสมอ

ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กโลก  $H$  และสนามเนื่องจากแท่ง  
แม่เหล็ก  $F$  ซึ่งดังได้อากกัน และมุม  $\alpha$  ซึ่งเข็มทิศเหจากแนวเมริเดียน

อยู่บนเส้นตรงอันเดียวกัน และ  
ดังตนศูนย์ ที่ ศูนย์ กลาง ของวง  
กลมซึ่งเป็นจุดกึ่งกลางของเข็ม  
ทิศด้วย

การใช้เครื่องมือ เพื่อ

ความ สะดวก ในการ ใช้เครื่อง  
มือนั้น เขาอาจให้มาตราส่วน



รูปที่ 36

∴ ถ้า  $NQ = F_m$ ,  $NP = H_m$  และมุม  $PNC = \alpha$  เราจะได้สร้างรูปสี่เหลี่ยม  
ด้านขนาน NPCQ ของแรงได้

และจะได้ NC เป็นแรงรวมของ  $F_m$  และ  $H_m$  ฉะนั้นจากสามเหลี่ยม NPC

$$\tan \alpha = \frac{PC}{NP} = \frac{F_m}{H_m} = \frac{F}{H}$$

$$\therefore F = H \tan \alpha$$

วิธีที่สอง อักษรและรูปอย่างวิธีที่ 1

ให้  $2l =$  ความยาวของเชือก  $m =$  ความแรงของเชือก

แรงบนจุด N เนื่องจากน้ำหนัก  $H$   $= H_m$

โมเมนต์เนื่องจากแรง  $H_m$  (บนข้อ N)  $=$  แรง  $\times$  เส้นตั้งฉาก NP

เช่นเดียวกันโมเมนต์เนื่องจากแรง  $H_m$  (บนข้อ S)  $= H_m \times l \sin \alpha$

∴ อำนาจการหมุนเนื่องจากแรงบนข้อทั้งสอง  $= H_m \times l \sin \alpha$

(เพราะช่วยทำให้เชือกหักหมุนไป  $= H_m \times l \sin \alpha$

ทางกันเดียว)  $+ H_m \times l \sin \alpha$

$$= H_m \times 2l \sin \alpha$$

วิธีที่หนึ่ง วางแม่เหล็ก

N1 S1 ให้ตั้งได้ฉากกับแนวของ

สนามแม่เหล็กโลก  $H$  และให้

เข็มทิศอยู่บนแนวแกนของมัน

สนามที่ก่อกำเนิดขึ้นที่เข็มทิศจะอยู่

ตามแนวแกนของแท่งแม่เหล็ก

NS เป็นเข็มทิศซึ่งชี้ตามแนว

ของสนามรวมเนื่องจากสนาม

$H$  และ  $F$

$$(\text{ถ้า } M = 2m) \quad = HM \sin a$$

$$\text{เช่นเดียวกัน แรงบนขั้วเหนือเนื่องจากสนาม } F = F_m$$

$$\therefore \text{แรงหมุนเนื่องจากค้ำของ } F_m \text{ บนขั้ว } N \text{ และ } S = FM \cos a$$

เนื่องจากเข็มทิศอยู่ในอาการสมดุล อำนาจหมุนเนื่องจากแรง  $Hm$  และ  $Fm$  ต้องเท่ากัน และพยายามหมุนเข็มทิศไปคนละทาง

$$\therefore HM \sin a = FM \cos a$$

$$\therefore F = H \tan a$$

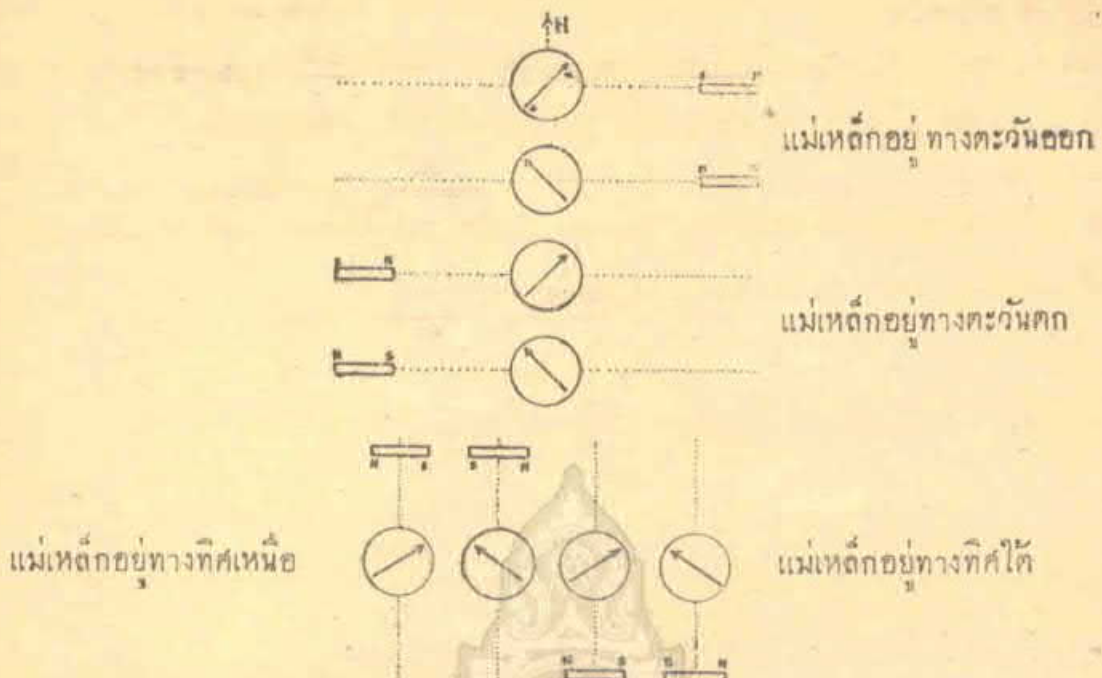
เราอาจวางแม่เหล็กที่เราเอาเข้ามา (ก) ให้อยู่ทางทิศเหนือหรือใต้ของเข็มทิศ และให้เข็มทิศอยู่บนขั้วเคเตอร์ หรือ (ข) ให้อยู่ทางทิศตะวันตกตะวันออกของเข็มทิศ และให้เข็มทิศอยู่บนแกนของมันก็ได้

รูปต่อไปนี้จะแสดงว่าเข็มทิศจะเหไปทางทิศไหน เมื่อนำเอาแม่เหล็กเข้ามา ทางทิศตะวันออก ตะวันตก เหนือ และใต้ตามลำดับ.

หมายเหตุ แรงคู่ในการที่จะหมุนแท่งแม่เหล็กซึ่งมีกำลังขั้ว  $m$  และยาว  $2l$  ไปให้ทำมุม  $a$  กับสนาม ซึ่งมีความเข้ม  $H$  จะมีค่า  $HM \sin a$  ฉะนั้นถ้าสนามมีความเข้ม 1 หน่วย และ  $a = 90^\circ$

$$\text{แรงคู่} = M$$

ฉะนั้นเราจึงเรียก  $M = 2ml$  นี้ว่า โมเมนต์ของแม่เหล็ก เพราะอำนาจการหมุนของมันจะเนื่องจากความแรงขั้วและความยาวของมัน จะไม่เนื่องจากสิ่งใดสิ่งหนึ่งอย่างเดียว และสิ่งนี้เองเป็นสมบัติที่สำคัญ และแน่นอนสำหรับแท่งแม่เหล็กเพราะมันมีขั้วสองขั้วติดกันเสมอ



ก. บนเส้นเคอร์

สนามเนื่องจากแท่งแม่เหล็ก  $F = \frac{m}{(r^2 + 1^2)^{3/2}}$  (แม่เหล็กยาว)

หรือ  $\frac{M}{r^3}$  (แม่เหล็กสั้น)

∴ (1) สำหรับแท่งแม่เหล็กยาว  $\frac{M}{(r^2 + 1^2)^{3/2}} = H \tan \alpha$

หรือ  $\frac{M}{H} = (r^2 + 1^2)^{3/2} \tan \alpha$

(2) สำหรับแท่งแม่เหล็กสั้น  $\frac{M}{r^3} = H \tan \alpha$

หรือ  $\frac{M}{H} = r^3 \tan \alpha$

## จ. บนเส้นแกน

$$F = \frac{2Mr}{\left(\frac{2}{r}-1\right)^2} \text{ (แม่เหล็กยาว) } \text{ หรือ } \frac{2M}{r} \text{ (แม่เหล็กสั้น)}$$

∴ (1) สำหรับแท่งแม่เหล็กยาว

$$\frac{2Mr}{\left(\frac{2}{r}-1\right)^2} = H \tan \alpha$$

$$\text{หรือ } \frac{M}{H} = \frac{\left(\frac{2}{r}-1\right)^2}{2r} \tan \alpha$$

(2) สำหรับแท่งแม่เหล็กสั้น  $\frac{2M}{r} = H \tan \alpha$

$$\text{หรือ } \frac{M}{H} = \frac{r^3}{2} \tan \alpha$$

เหตุที่จะทำให้ผลของการทดลองคลาดเคลื่อนและวิธีแก้

1. เครื่องดำเร็วไม่อยู่ในแนวขน และมองไม่ได้ต้อง วิธีกันและแก้  
ต้องหมุนเข็มทิศแล้วปล่อยหลาย ๆ ครั้ง ถ้าหมุนยังไม่ค่อยดี ก็หาอะไรหนุนจนหมุนได้ดี
2. แกนที่เข็มทิศหมุนรอบ อาจไม่อยู่กึ่งกลางมาตราส่วน ดังนั้นควรอ่าน  
มาตราส่วนที่ปลายทั้งสองของเข็มทิศ และหาผลเฉลี่ย
3. เข็มทิศอาจไม่อยู่กึ่งกลางมาตราส่วนเซนติเมตร ฉะนั้นต้องวางแม่เหล็ก  
ต้องห่าง คือทางตะวันตกกึ่งหนึ่ง แล้วทางทิศตะวันออกอีกกึ่งหนึ่ง ทุก ๆ ครั้งต้องอ่าน  
มุมที่ปลายทั้งสองของเข็มทิศ รวมทั้งสิ้นต้องอ่านมุม 4 ครั้ง
4. ขั้วของเข็มทิศอาจไม่อยู่ปลายจริง ๆ ฉะนั้น ควรพลิกเข็มทิศ และอ่าน  
มุมอีก 4 ครั้ง อย่าง (2) และ (3). รวมต้องอ่าน 8 ครั้ง และมุมที่ต้องการ  
คือผลเฉลี่ย

ประโยชน์ของแมกนีโตมิเตอร์

1. ในการ เปรียบเทียบโมเมนต์ ของแม่เหล็กสองแท่ง

ก. ถ้านำเอาแม่เหล็กซึ่งมีโมเมนต์  $M_1$  เข้ามาทางทิศใต้หรือเหนือของ  
เครื่องมือ และให้ระยะระหว่างแม่เหล็กกับเข็มทิศ  $= r_1$  และให้มุมที่เข็มทิศเหไป  $= \alpha_1$

$$\frac{M_1}{H} = (r_1^2 + l_1^2)^{3/2} \tan \alpha_1$$

เช่นเดียวกัน ถ้านำเอาแม่เหล็กที่มีโมเมนต์  $M_2$  เข้ามา เราจะได้

$$\frac{M_2}{H} = (r_2^2 + l_2^2)^{3/2} \tan \alpha_2$$

H จะมีค่าเท่ากันในทั้งสองสมการ เพราะเป็นสนามแม่เหล็กโลก ณที่เดียวกัน

$$\therefore \frac{M_1}{M_2} = \frac{(r_1^2 + l_1^2)^{3/2} \tan \alpha_1}{(r_2^2 + l_2^2)^{3/2} \tan \alpha_2}$$

ข. ถ้านำเอาแม่เหล็กทั้งสองเข้ามาพร้อมกัน และวางให้เข็มทิศไม่เหจาก  
แนวเดิมเลย เราจะได้สนามเนื่องจากแม่เหล็กทั้งสองทำดวยกันพอดี นั่นคือสนาม  
ทั้งสองเท่ากัน แต่ไปทางทิศตรงกันข้าม

$$\therefore \frac{M_1}{(r_1^2 + l_1^2)^{3/2}} = - \frac{M_2}{(r_2^2 + l_2^2)^{3/2}}$$

$$\therefore \frac{M_1}{M_2} = - \frac{(r_1^2 + l_1^2)^{3/2}}{(r_2^2 + l_2^2)^{3/2}}$$

## 2. การเปรียบเทียบความเข้มของสนามแม่เหล็ก ณ สองตำแหน่ง ในที่นี้

เราต้องใช้แม่เหล็กแท่งเดียวกันในการทดลอง

สมมุติที่ตำแหน่ง ก. ความเข้มของสนามแม่เหล็กเป็น  $M_1$  และเมื่อวางตั้งฉาก  
กับเมริเดียนทางตะวันตกของเข็มทิศ ๑ เหนือ  $\alpha_1$  จากเมริเดียน  
และห่างจากเข็มทิศ  $r_1$

และที่ตำแหน่ง ข. ให้ความเข้มเป็น  $H_2$  และเข็มทิศเหไป  $\alpha_2$  เมื่อแม่เหล็กแท่งนี้  
วางห่างจากเข็มทิศ  $r_2$  และอยู่ทางทิศตะวันตกของเข็มทิศ

∴ ที่ ก.

$$F_1 = H_1 \tan a_1$$

และที่ ข.

$$F_2 = H_2 \tan a_2$$

∴

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{F_1 \tan a_2}{F_2 \tan a_1}$$

(ก.) ทั้ง ๆ ใ้ ถ้าใช้แม่เหล็กแท่งเดียวกัน

$$\begin{aligned} \frac{H_1}{H_2} &= \frac{2Mr_1}{(r_1^2 - l^2)^2} \times \frac{(r_2^2 - l^2)^2}{2Mr_2} \frac{\tan a_2}{\tan a_1} \\ &= \frac{r_1}{(r_1^2 - l^2)^2} \times \frac{(r_2^2 - l^2)^2}{r_2} \frac{\tan a_2}{\tan a_1} \end{aligned}$$

(ข.) และถ้า  $r_1 = r_2$  ด้วย  $\frac{H_1}{H_2} = \frac{\tan a_2}{\tan a_1}$

### 3. ในการหาความยาวจริงของแม่เหล็ก (EFFECTIVE LENGTH).

ความยาวของแม่เหล็กคือระยะระหว่างขั้วของแม่เหล็ก ไม่ใช่ความยาวของแท่งเหล็ก และที่จริงในสูตรที่เราใช้ 2/1 คือ ความยาวจริง ของแม่เหล็ก เราอาจหาความจริงได้ โดยวิธีใช้ผลัดขั้วในโรยบนแท่งแม่เหล็ก แล้วเคาะให้ผงตะไบเรียงตัว แล้ววัดด้วยวิธีระยะห่างระหว่างจุดที่ผงตะไบจับเป็นกลุ่มหนาแน่นที่สุดซึ่งอยู่ใกล้ๆ ปลายแท่งแม่เหล็ก วิธีนี้ใช้ได้ถ้า ถ้าเราไม่ทราบราคาของ effective length อย่างถูกต้องจริง ๆ แต่หาโดยการทดลองด้วยแม่เหล็กนิโคมีเตอร์ ก็จะได้ผลดีและถูกต้อง

จากสมการ  $\frac{M}{(r_1^2 + l^2)^{3/2}} = \tan a$

เราอาจเขียนได้ว่า  $\left( \frac{M}{H} \cot a \right)^{2/3} = r_1^2 + l^2$

แต่  $\frac{M}{H} = K$  คงตัว เพราะเราใช้แท่งแม่เหล็กแท่งเดียวที่วัดค่าของ  $l$

และ  $H$  คือความเข้มของสนาม ณ จุดเดียวกัน

เพราะฉะนั้น ถ้าเส้นแม่เหล็กเข้าออก นั่นคือเปลี่ยนค่าของ  $x$  ก็เปลี่ยนค่าของ  $a$  ด้วย เราอาจเขียนสมการข้างบนได้ใหม่ดังนี้ -

$$K \cot^{2/3} a = r^2 + l^2$$

$$KX = Y + l^2$$

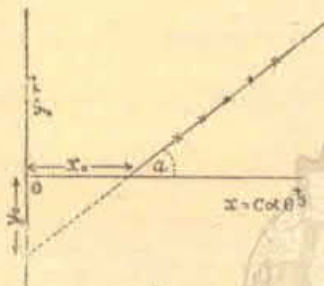
นั่นคือสมการของเส้นตรง  $X = \cot^{2/3} a, Y = r^2$

ฉะนั้น โดยการเขียนกราฟ  $KX = Y + l^2$

เราได้ค่าของ  $l^2 = -Y$  เมื่อ  $X = 0$

สมมติว่า ณ จุดนี้  $Y = Y_0$

$\therefore l = \sqrt{-Y_0}$  ในเวลาเดียวกันจากความสัมพันธ์ของเส้นตรงนั้น  $M/H = \tan a$

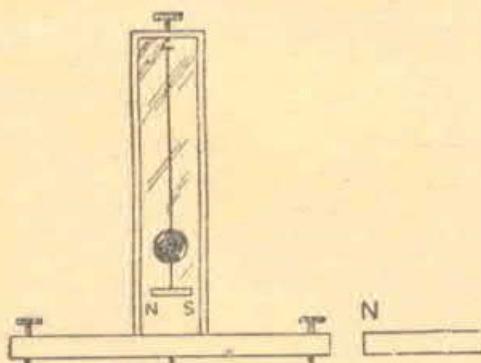


รูปที่ 38

จากค่าของ  $X_0$  ที่เราวัดได้ เมื่อ  $Y=0$  ก็จะได้  $KX_0 = l^2$

$$l = \sqrt{KX_0} = \sqrt{\frac{M}{H} X_0}$$

#### 4. การพิสูจน์กฎกำลังสองผกผัน



รูปที่ 39

แมกนีโตสโกป นี้คือแมกนีโตมิเตอร์

ชนิดหนึ่ง ประกอบด้วยแม่เหล็กแท่งหนึ่งหรือหลายแท่งวางขนาน และขึงตามกัน และแขวนโดยเส้นไหมที่ยังไม่ได้ขึ้น หรือเส้นลวดเล็ก ๆ บนเส้นไหมหรือลวดมีกระจุกเง้าเล็ก ๆ ติดอยู่สำหรับสะท้อนแสงไปบนมาตราส่วน

สำหรับช่วยให้วัตถุมุมที่แม่เหล็กเหวี่ยงไปได้ และแม่เหล็กมักติดอยู่หลังกระจกนี้ เครื่องมือชนิดนี้ไว้มาก และมีประโยชน์ในเมื่อต้องการวัดความแปรผันเล็กน้อย ๆ เช่น การเปลี่ยนแปลงสมบัติแม่เหล็กของสารแม่เหล็กเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงเป็นต้น

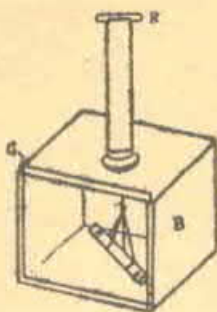
## 2. แมกนีโตมิเตอร์ชนิดแกว่งกวัด

เครื่องสำหรับวัดชนิดนี้ประกอบด้วย แม่เหล็กแท่งหนึ่งผูกด้วยไหมซึ่งยังไม่ขึ้นหรือเส้นด้ายเล็ก ๆ และแขวนให้หมุนรอบแกนแนวนอน และเอาไว้ในหีบซึ่งมีแผ่นแก้วสองด้าน เพื่อบังกั้นลมไม่ให้เกี่ยวข้องกับการแกว่งของแท่งแม่เหล็ก

คามปรกติ เวลาแขวนแม่เหล็ก มันจะชี้ตามแนวเมริเดียนแม่เหล็กโลกเสมอ เวลาผลักมันให้เหวี่ยงจากเมริเดียน เนื่องจากโมเมนต์แห่งความเฉื่อย — อำนาจความเฉื่อยในการหมุนของแท่งแม่เหล็ก มันก็จะพยายามหมุนต่อไป แต่อำนาจสนามแม่เหล็กโลกก็พยายามดึงมันให้กลับไปยังตามแนวเมริเดียนเสมอ และเมื่ออำนาจความเฉื่อยถูกทำลายโดยอำนาจแม่เหล็กโลกหมดแล้ว มันก็จะหมุนกลับ แต่ขณะที่มาถึงแนวเมริเดียน มันก็จะยังหมุนอยู่ ฉะนั้นด้วยอำนาจความเฉื่อยมันก็จะหมุนเลยแนวเมริเดียนไป และเนื่องจากอำนาจแม่เหล็กโลกมันก็จะหมุนกลับมาก่อ ฉะนั้นเนื่องจากอำนาจทั้งสองนี้ แท่งแม่เหล็กก็จะแกว่งกลับไปกลับมารอบศูนย์กลางของมัน มันจะแกว่งช้าหรือเร็วขึ้นก็แล้วแต่อำนาจทั้งสองนี้ และอำนาจของโมเมนต์ของแท่งแม่เหล็กแท่งนั้น เราอาจพิสูจน์ได้ว่า

$$T = \frac{1}{n} = 2\pi \sqrt{\frac{I}{MH}}$$

T คือ คาบของการแกว่งกวัด หมายถึง เวลาเป็นวินาทีที่แม่เหล็กหมุนได้ครบหนึ่งรอบ ถ้าแม่เหล็กตั้งต้นแกว่งที่จุดไหน และมันกลับมาผ่านจุดเดิมและกำลังแกว่งไปทางเดียวกันอีก เราพูดว่ามันหมุนไป หนึ่งรอบหรือหนึ่งวัฏจักร



รูปที่ 40

$n$  คือ ความถี่ หมายถึงว่า แม่เหล็ก  
จะแกว่งได้กี่วัฏจักรในหนึ่งวินาที

$I$  คือ โมเมนต์แห่งความเฉื่อย หรือ  
ความเฉื่อยแห่งการหมุนของ แท่งแม่เหล็ก ที่  
แกว่งกวัด

$M$  คือ โมเมนต์-แม่เหล็กของแท่งแม่เหล็ก  
ที่แกว่ง

$H$  คือ ความเข้มของสนาม ณ จุดที่แท่งแม่เหล็กแกว่ง

### ประโยชน์ของแมกนีโตมิเตอร์ชนิดแกว่งกวัด

1. เปรียบเทียบโมเมนต์ของแท่งแม่เหล็กสองแท่งซึ่งมีโมเมนต์  $M_1$   
และ  $M_2$

วิธีหนึ่ง เอาแม่เหล็กแท่งแรกแขวนและให้ทำการแกว่ง ใช้นาฬิกาจับเวลา  
สำหรับหาค่าความถี่  $n_1$  ของแม่เหล็กซึ่งมีโมเมนต์  $M_1$  และโมเมนต์แห่งความเฉื่อย  $I_1$  ได้

$$\frac{1}{n_1} = 2\pi \sqrt{\frac{I_1}{M_1 H}}$$

เช่นเดียวกัน ถ้าเราให้แม่เหล็กแท่งที่สองแกว่ง ณ จุดเดียวกัน ( $H$  คือสนาม  
แม่เหล็กโลกคงตัว) เราได้

$$\frac{1}{n_2} = 2\pi \sqrt{\frac{I_2}{M_2 H}}$$

$n_2$  คือความถี่ของแท่งที่สองซึ่งมีโมเมนต์  $M_2$  และโมเมนต์แห่งความเฉื่อย  $I_2$   
เอาสมการทั้งสองหารกัน ด้วยยกกำลังสอง จะได้

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{I_1}{I_2} \times \frac{n_1^2}{n_2^2}$$

เราหา  $I_1$  และ  $I_2$  โดยการวัด, ซึ่ง ใช้สูตรต่อไป

$$(1) \quad I = w \times \frac{l^2 + b^2}{12}$$

$$(2) \quad I_0 = w \times \frac{l^2 + 3r^2}{12}$$

$w$  คือมวลสารของแท่งแม่เหล็ก

$l$  คือความยาวของแท่งแม่เหล็ก

$b$  คือความกว้าง ถ้าหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม

$r$  คือรัศมีของแท่งภาคตัดเป็นวงกลม

ถ้าแม่เหล็กทั้งสองมี ขนาดเท่ากัน  $I_1 = I_2$  เราก็จะได้

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{n_1^2}{n_2^2}$$

หมายเหตุ ถ้าแท่งแม่เหล็กมีภาคตัดเป็นสี่เหลี่ยม ให้ใช้สูตร (1) ถ้าภาคตัดเป็นวงกลมให้ใช้สูตร (2)

วิธีที่สอง วิธีนี้ไม่จำเป็นต้องรู้ค่าของโมเมนต์แห่งความเฉื่อยของแท่งแม่เหล็ก และเป็นวิธีที่สะดวกกว่าวิธีหนึ่ง ถ้าแม่เหล็กไม่มีความยาวเท่ากัน

เอาแม่เหล็กผูกติดกันเข้า และแขวน แล้วให้แกว่ง ให้  $I$  เป็นโมเมนต์แห่งความเฉื่อยของแท่งแม่เหล็กทั้งสองผูกติดกัน  $M_1$ ,  $M_2$  และ  $H$  มีความหมายอย่างเดิม

ถ้าเราเอาขั้วเหมือนกันอยู่ด้วยกัน โมเมนต์ของแท่งแม่เหล็กทั้งสอง  $M = M_1 + M_2$  เพราะมันจะช่วยกันหมุน

$$\text{สัมมูลิตความถี่} = n_1 \therefore \frac{1}{n_1} = 2\pi \sqrt{\frac{I}{(M_1 + M_2) H}}$$

เวลาเขาวัดด้วยกันเราได้  $M = M_1 - M_2$  เพราะมันจะหมุนไปคนละทาง

$$\text{สัมมูลิตความถี่} = n_2$$

$$\therefore \frac{1}{n_2} = 2\pi \sqrt{\frac{I}{(M_1 - M_2) H}}$$

เอาสมการทั้งสองหารกัน แล้วยกกำลังสอง

$$\frac{n_1^2}{n_2^2} = \frac{M_1 + M_2}{M_1 - M_2}$$

$$\therefore \frac{M_1}{M_2} = \frac{n_1^2 + n_2^2}{n_1^2 - n_2^2}$$

จากผลของการคำนวณ ถ้าแท่งแม่เหล็กมีโมเมนต์เท่ากัน จะได้  $\frac{M_1}{M_2} = 1$

นั่นคือมันจะไม่ขึ้นเลยเมื่อวัดของแท่งแม่เหล็กด้วยกัน ถ้าแท่งแม่เหล็กมีโมเมนต์ไม่เท่ากัน จะสังเกตว่าแท่งไหนมีโมเมนต์มากกว่า ได้จากเมื่อแขวนให้หัวเหมือนกันอยู่ด้วยกัน แท่งที่เขาวัดเหนือขึ้นไปทิศเหนือจะมีโมเมนต์มากกว่า

## 2. เปรียบเทียบสนามแม่เหล็กสองตำบล

สัมมูลิตตำบลหนึ่ง มีความเข้ม  $H_1$  และแม่เหล็กแท่งหนึ่งสั้นด้วยความถี่  $n_1$   
 .. .. ..  $H_2$  .. .. ..  $n_2$

$$\frac{1}{n_1} = 2\pi \sqrt{\frac{I}{MH_1}}$$

$$\frac{1}{n_2} = 2\pi \sqrt{\frac{I}{MH_2}}$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{N_1^2}{N_2^2}$$

3. หาความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกและโมเมนต์ ของแม่เหล็ก  
แท่งนิโคมีเตอร์ทั้งสองชนิด

โดยใช้

ถ้าใช้แท่งนิโคชนิดที่ (สำหรับ B-position) จะได้

$$\frac{M}{H} = (r^2 + l^2)^{3/2} \tan \alpha \quad (1)$$

ถ้าใช้แท่งนิโคชนิดวงกวด คือแขวนแท่งแม่เหล็กแท่งเดียวให้แกว่ง  
 จะได้

$$\frac{I}{n} = 2\pi \sqrt{\frac{I}{M H}}$$

หรือ

$$M H = 4\pi^2 I n^2 \quad (2)$$

$$\therefore (2) \text{ ทารด้วย } (1) \quad H^2 = \frac{4\pi^2 I n^2}{(r^2 + l^2)^{3/2} \tan \alpha}$$

หรือ

$$H = 2\pi n \sqrt{\frac{I}{(r^2 + l^2)^{3/2} \tan \alpha}} \quad (3)$$

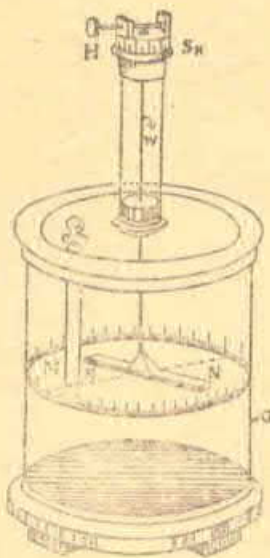
$$\text{และ } (1) \text{ คูณด้วย } (2) \quad M^2 = 4\pi^2 n^2 I (r^2 + l^2)^{3/2} \tan \alpha$$

$$\text{หรือ } M = 2\pi n \sqrt{(r^2 + l^2)^{3/2} I \tan \alpha}$$

ค่าของ  $I, n, r, l$  และ  $\alpha$  หาได้โดยการวัดและคำนวณ ตามวิธีที่กล่าว  
 มาแล้วข้างบน.

## 20. ตาชั่งความบิด (Torsion Balance)

ในสมัยนี้เราไม่ค่อยใช้เครื่องมือชนิดนี้กันเลยในห้วง ปฏิบัติการที่ทันสมัยเรามีได้  
 สำหรับแสดงเกี่ยวกับประวัติของความเจริญในวิชาเท่านั้น



รูปที่ 40

$\alpha^\circ$  ปลายด้ายก็จะหมุนตามไป แต่เนื่องจากอำนาจต้านแม่เหล็กโลก แท่งแม่เหล็กพยายามอยู่ตามแนวเมริเดียนเสมอ อำนาจจึงต้องพยายามหมุนแม่เหล็กไปคนละทาง และมันจะเท่ากันเมื่อแม่เหล็กหยุดนิ่ง ดังนั้นให้แม่เหล็กหมุนไป  $\beta$

$$\therefore \text{อำนาจโมเมนต์เนื่องจากอำนาจแม่เหล็ก } H = M H \sin \beta \dots (1)$$

และอำนาจหมุนเนื่องจากการบิดเส้นด้าย เป็นสัดส่วน ตรงกับมุมที่เส้นด้ายบิดไป แต่ในทิศเส้นด้ายบิดไปจริงๆ  $= (\alpha - \beta)$  คือ ข้างบนถูกบิดไป  $\alpha$  แต่ข้างล่างหมุนตามไป  $\beta$

$$\therefore \text{อำนาจโมเมนต์เนื่องจากการบิดเส้นด้าย} = c (\alpha - \beta) \dots (2)$$

$c$  = ค่าคงตัว และแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของเส้นด้ายหนึ่งๆ นั่นคือเป็น โมเมนต์ที่ทำให้ปลายด้ายบิดไปทั่วกัน  $1^\circ$

เมื่อเกิดสมดุล โมเมนต์ทั้งสองนี้เท่ากัน

$$\therefore M H \sin \beta = c (\alpha - \beta)$$

เครื่องมือนี้ประกอบด้วยเส้นด้ายเงินเล็กๆ ขวอนไว้กับที่สำหรับหมุน ซึ่งเราเรียกว่าหัวความบิด (Torsion Head) H, และปลายข้างล่างผูกติดที่สำหรับวางแม่เหล็ก ข้างบนเป็นกระบอกแก้วครอบ รอบกระบอกแก้วมีมาตราส่วนขีดไว้เป็นองศา เวลาใช้ต้องหมุนเครื่องมือ จนกระทั่งด้ายไม่บิดเลย และให้ปลายแม่เหล็กชี้กับศูนย์และ  $180^\circ$  และให้ปลายบนของเส้นด้ายกับศูนย์

ถ้าเอาแม่เหล็กซึ่งมีโมเมนต์  $M$  แล่นเมื่อเส้นด้ายไม่บิดเลย แม่เหล็กจะชี้ตามเมริเดียน ถ้าบิดปลายบนของเส้นด้ายไป

## ประโยชน์

1. การเปรียบเทียบ โมเมนต์ของแท่งแม่เหล็กสองแท่ง เมื่อเอาแม่เหล็กที่มี โมเมนต์  $M_1$  แนวนอน สมมุติข้างบนถูกบิดไป  $\alpha_1$  แม่เหล็กที่เหลือ  $\beta_1$  เมื่อเอาแม่เหล็กที่มีโมเมนต์  $M_2$  แนวนอน สมมุติข้างบนถูกบิดไป  $\alpha_2$  แม่เหล็กที่เหลือ  $\beta_2$

$$\begin{aligned} \therefore M_1 H \sin \beta_1 &= c (\alpha_1 - \beta_1) \\ M_2 H \sin \beta_2 &= c (\alpha_2 - \beta_2) \\ \therefore \frac{M_1}{M_2} &= \frac{(\alpha_1 - \beta_1) \sin \beta_2}{(\alpha_2 - \beta_2) \sin \beta_1} \end{aligned}$$

ถ้าเราทำให้  $\beta_1 = \beta_2 = \beta$

$$\therefore \frac{M_1}{M_2} = \frac{\alpha_1 - \beta}{\alpha_2 - \beta}$$

2. การเปรียบเทียบ สนามแม่เหล็ก ณ สองตำแหน่ง สมมุติ  $H_1$  และ  $H_2$  เป็นความเข้มของสนาม ใช้แม่เหล็กแท่งเดียวกัน ใช้ลักษณะมีความหมายอย่างเดิม

$$\begin{aligned} \text{จะได้} \quad M H_1 \sin \beta_1 &= c (\alpha_1 - \beta_1) \\ M H_2 \sin \beta_2 &= c (\alpha_2 - \beta_2) \\ \therefore \frac{H_1}{H_2} &= \frac{(\alpha_1 - \beta_1) \sin \beta_2}{(\alpha_2 - \beta_2) \sin \beta_1} \end{aligned}$$

ถ้าทำให้  $\beta_1 = \beta_2 = \beta$  จะได้  $\frac{H_1}{H_2} = \frac{\alpha_1 - \beta}{\alpha_2 - \beta}$

## โจทย์ตัวอย่าง

### ก. แมกนีโตมิเตอร์ ชนิดเห

1. เมื่อเอาแท่งแม่เหล็ก A ยาว 6 เซนติเมตร มาวางทางตะวันออกของเข็มทิศ 5 เซนติเมตร เข็มทิศจะเหไป  $60^\circ$

เมื่อเอาแท่ง B ยาว 16 เซนติเมตร มาวางทางตะวันออก (หรือตะวันตก) ของเข็มทิศ และห่างจากเข็มทิศ 10 เซนติเมตร เข็มทิศจะเหไป  $45^\circ$

จงเปรียบเทียบโมเมนต์ของแท่งแม่เหล็ก A และ B และถ้า B มีโมเมนต์ 810 หน่วย จงหาโมเมนต์ของ A

ในการทำโจทย์เช่นนี้นักเรียนควรหัดเขียนแผนภาพประกอบ

$$\text{สูตรที่จะต้องใช้ } F = \frac{2Mr}{(r^2 - l^2)^2}$$

วิธีทำ ถ้านามเนื่องจากแม่เหล็ก A ที่เข็มของแมกนีโตมิเตอร์

$$\begin{array}{l} r = 5 \\ l = 6 \\ M_A = ? \end{array} \quad F_A = \frac{2M_A \times 5}{(5^2 - 3^2)^2} = \frac{10 M_A}{(4^2)^2} \text{ เกาส์}$$

$$\therefore F = H \tan a$$

F = ถ้านามเนื่องจากแท่งแม่เหล็ก

H = ถ้านามแม่เหล็กโลก

$a = 60^\circ$  มุมที่เข็มบ่ายเบนไปจากเมริเดียน

$$\therefore \frac{10 M_A}{4^4} = H \tan 60^\circ \quad \text{----- (1)}$$

เช่นเดียวกันสำหรับแท่งแม่เหล็ก B

คำนวณเนื่องจากแท่งแม่เหล็ก B ซึ่งมีโมเมนต์  $M_B$  คือ

$$\left. \begin{array}{l} r = 10 \text{ เซนติเมตร} \\ 2 l = 16 \text{ เซนติเมตร} \\ a = 45^\circ \end{array} \right\} \frac{2 M_B \times 10}{(10^2 - 8^2)^{\frac{3}{2}}} = H \tan 45^\circ$$

$$\text{หรือ} \quad \frac{20 M_B}{6^3} = H \tan 45^\circ \quad \text{----- (2)}$$

(1) ทหารด้วย (2)

$$\frac{10 M_A \times 6^4}{4^4 M_B \times 20} = \frac{\tan 60^\circ}{\tan 45^\circ}$$

$$\therefore \frac{M_A}{M_B} = \frac{\sqrt{3}}{1} \times \frac{2 \times 4^4}{6^4} = \frac{16 \sqrt{3}}{81}$$

$$\begin{aligned} \text{และ} \quad M_A &= \frac{16 \sqrt{3}}{81} M_B \\ &= \frac{16 \sqrt{3}}{81} \times 810 = 277.1 \text{ หน่วย} \end{aligned}$$

2. ถ้าแม่เหล็กทั้งสองขนานกัน จงเปรียบเทียบโมเมนต์ และหาค่าของโมเมนต์ของแท่ง A. (ใช้ค่าของอันเท็มฮ์ข้อ 1.)

จากสูตรแม่เหล็กอัน  $\frac{2 M}{r^3}$  คำนวณ เราได้

$$\frac{2 M_A}{5^3} = H \tan 60^\circ$$

$$\frac{2 M_B}{10^3} = \tan 45^\circ$$

เขาสัมภาระน้ำหนัก  $\frac{2M_A}{5^3} \times \frac{10^3}{2M_B} = \frac{H \tan 45^\circ}{H \tan 60^\circ}$

$$\frac{M_A}{M_B} = \frac{\sqrt{3}}{8}$$

$$M_A = \frac{\sqrt{3}}{8} M_B = \frac{\sqrt{3}}{8} \times 810$$

$$= 176.2$$

เปรียบเทียบค่าคอมรับด ก. และ ข. จะเห็นว่าค่านก้นมาก เพราะฉะนั้นในการเลือกใช้ผู้ศรนักเรียนควรตั้งเกณฑ์โดยง่ายดี ว่าเลือกกำหนดความยาวให้หรือไม่ และดูว่าพอจะหาค่าความยาวออกได้หรือไม่

3. แม่เหล็กแท่งหนึ่งเมื่ออยู่ทางทิศเหนือขั้วแม่เหล็กนิโคเตอร เริ่มของแม่เหล็กนิโคเตอรจะเหวี่ยงไป  $60^\circ$  เมื่อไปทางทิศเหนือขั้วแม่เหล็กนิโคเตอรจะเหวี่ยงไป  $30^\circ$  เปรียบเทียบสนามที่ตามดทั้งสอง

ถ้าระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับเริ่มที่ขึงคด ก. จงหาความเข้มที่ตามดแรก ถ้าตามดที่สองมีความเข้ม 0.82 เทสลา

$$\text{สูตรสนามแม่เหล็กที่จุดบนเส้นตรง} F = \frac{M}{(r^2 + l^2)^{3/2}}$$

สูตรสำหรับแม่เหล็กนิโคเตอร  $F = H \tan \alpha$

$$\frac{M}{(r^2 + l^2)^{3/2}} = H_1 \tan 60^\circ \quad H_1 \text{ คือความเข้มที่ตามดแรก}$$

และ  $\frac{M}{(r^2 + l^2)^{3/2}} = H_2 \tan 30^\circ \quad H_2 \text{ คือความเข้มที่ตามดที่สอง}$

ค่าของ  $\frac{M}{(r^2 + l^2)^{3/2}}$  ไม่เปลี่ยนแปลง เพราะใช้แม่เหล็กแท่งเดียวกัน และ

ระยะห่าง r คงตัว

$$H_1 \tan 60^\circ = H_2 \tan 30^\circ$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{\tan 30^\circ}{\tan 60^\circ} = \frac{1}{3}$$

$$H_1 = \frac{1}{3} H_2 = \frac{1}{3} \times 0.32 = 0.107 \text{ เกาซ์}$$

ในการทำใจ นักเรียนควรพยายามใช้สูตรเบื้องต้นให้มาก ไม่ควรใช้สูตร "สำเร็จ" แล้ว เช่น  $H_1 : H_2 = \tan \alpha_2 : \tan \alpha_1$  เฉยๆ

### ข. แมกนีโตมิเตอร์ชนิดแกว่งกวัด

4. เริ่มที่ขั้วหนึ่งแกว่ง 4 รอบต่อวินาทีในสนามแม่เหล็กโลก ถ้าเราเอาแท่งแม่เหล็ก A เข้ามาช่วยให้ขั้วสนามแม่เหล็กโลก เริ่มที่ขั้วแกว่ง 5 รอบต่อวินาที แต่ถ้าเราวางแท่งแม่เหล็ก A ที่จุดเดียวกัน แต่ให้สนามของมันต้านกับสนามแม่เหล็กโลก เริ่มจะสั้นกี่ครั้งต่อวินาที และจงเปรียบเทียบสนามแม่เหล็กโลกกับสนามแม่เหล็ก A ถ้าสนามแม่เหล็กโลกเริ่มที่สั้นกว่าสนามเนื่องจากแท่งแม่เหล็ก

$$\text{สูตร } \frac{1}{n} = 2\pi \sqrt{\frac{I}{MH}}$$

$$\text{ถ้า } H_1 = \text{สนามของแท่งแม่เหล็ก}$$

$$H = \text{สนามของโลก}$$

$$\therefore \text{ครั้งแรก } n = \frac{4}{60} \text{ ครั้งต่อวินาที}$$

สนาม =  $H + I$  และ  $M$  คงตัวเพราะเริ่มที่ขั้วแกว่งเป็นอันเดียวกัน

$$\frac{60}{4} = 2\pi \sqrt{\frac{I}{M(H+I)}} \quad (1)$$

$$\therefore \text{ครั้งที่สอง } \frac{60}{5} = 2\pi \sqrt{\frac{I}{M(H+H_1)}} \quad (2) \text{ สนาม } H_1 \text{ ช่วย } H$$

$$\text{และครั้งที่สาม } \frac{60}{N} = 2\pi \sqrt{\frac{1}{M(H-H_1)}} \quad (3) \text{ สนาม } H_1 \text{ และ } H \text{ ต้านกัน}$$

N คือจำนวนรอบต่อวินาที

$$(1) \div (2) \quad \frac{5}{4} = \sqrt{\frac{H + H_1}{H}}$$

$$\frac{25}{16} = \frac{H + H_1}{H} = 1 + \frac{H_1}{H}$$

$$\therefore \frac{H_1}{H} = \frac{25}{16} - 1 = \frac{9}{16}$$

$$\therefore \frac{H}{H_1} = \frac{16}{9}$$

$$(1) \div (3) \quad \frac{N}{4} = \sqrt{\frac{H - H_1}{H}} = \sqrt{1 - \frac{H_1}{H}}$$

แทนค่า  $\frac{H_1}{H} = \sqrt{1 - \frac{9}{16}} = \sqrt{\frac{7}{16}}$

$$\therefore N = 4 \sqrt{\frac{7}{16}} = \sqrt{7} = 2.65$$

### ก. ตาชั่งความบิด

5. แม่เหล็กแท่งหนึ่งแขวนด้วยเส้นดัด โดยขยี้ตามแนวเมริเดียน ถ้าบิดปลายดัดข้างบนไป  $120^\circ$  แม่เหล็กจะเหไป  $30^\circ$  ถ้าเราขยี้ให้แม่เหล็กนั้นตั้งได้ฉากกับแนวเมริเดียน เราจะต้องบิดปลายบนของดัดไปอีกเท่าใด

ตั้งมุม  $\theta$  เป็นค่าคงตัวคือ  $1^\circ$  สำหรับเส้นดัดเส้นนั้น

และ  $x$  เป็นมุมที่ปลายของเส้นดัดถูกบิดอีกคือไป ตามที่กำหนดให้ แม่เหล็กเหไป  $30^\circ$

- เพราะฉะนั้น โมเมนต์เนื่องจากสนามแม่เหล็กโลก  $= M H \sin 30^\circ$

$M =$  โมเมนต์ของแท่งแม่เหล็ก และ  $H =$  ความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกที่ซึ่งเราทำการทดลอง

แต่ปลายดอขวางบนถูกบิดไป  $120^\circ$  และแม่เหล็กหมุนตามไป  $30^\circ$

$$\therefore \text{เส้นดอถูกบิดจริง ๆ} = 120^\circ - 30^\circ = 90^\circ$$

และ  $\therefore$  แรงหมุนเนื่องจากการบิดเส้นดอ =  $90^\circ$

เมื่อแม่เหล็กหยุดนิ่งอยู่ในสมมุติ แรงหมุนทั้งสองนี้เท่ากัน

$$M H \sin x = 90^\circ \quad \dots\dots\dots (1)$$

ในทำนองเดียวกัน ถ้าแม่เหล็กเหไป  $90^\circ$  และเส้นดอถูกบิด  $(120 + x) - 90$   
 $= 30 + x$  ( $90$  คือมุมที่แม่เหล็กหมุนตามไป)

$$\therefore M H \sin 90 = (30 + x)^\circ \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$(1) \div (2) \quad \frac{M H \sin 30}{M H \sin 90} = \frac{90^\circ}{(30 + x)^\circ}$$

$$\frac{1/2}{1} = \frac{90}{30 + x}$$

$$30 + x = 180$$

$$x = 150^\circ$$

ให้สังเกตว่า  $150^\circ$  คือมุมปลายดอและปลายสร้างของดอถูกบิดไปต่างกัน แต่ปลายบนของเส้นดอถูกบิดไปจากเดิม  $(120 + 150) = 270^\circ$  ฉะนั้นในบางกรณีเส้นดออาจจะบิดทวน ๆ วนก็ได้ ไม่จำเป็นจะต้องวนเสมอไป.

### แบบฝึกหัดบทที่ 3

1. เมื่อวางแม่เหล็กทรงสี่เหลี่ยมคางหมูของแมกนีโตมเตอร์ เข็มทิศจะเห  $60^\circ$  จากแนวเมริเดียน ถ้าเราทำแม่เหล็กนี้ไปยังตำแหน่งที่มีความเข้มเป็น 3 เท่าของค่าแรก และวางแม่เหล็กให้ห่างจากแมกนีโตมเตอร์เท่าเดิม แต่อยู่ทางทิศตะวันออก เข็มจะเหไปกี่องศา ( $30^\circ$ )

2. แม่เหล็กตั้งสองแท่ง แท่งที่หนึ่งอยู่ทางทิศเหนือ และห่างจากเส้นของแม่เหล็ก โด-  
มิเตอร์ 10 เซนติเมตร อีกแท่งหนึ่งอยู่ทางทิศใต้ ห่างจากแม่เหล็กโดมิเตอร์  
เท่ากัน แม่เหล็กไม่เบนจากแนวเมริเดียนเลย จงเปรียบเทียบโมเมนต์ (2 : 1)
3. แม่เหล็กตั้งสองแท่งมีโมเมนต์เป็นค่าเท่ากัน แท่งที่มีโมเมนต์น้อย เมื่ออยู่ห่าง  
จากแม่เหล็กโดมิเตอร์ไปทางทิศตะวันตก 8 เซนติเมตร ทำให้เข็มเหวี่ยง 30 องศา ถ้าเรา  
เขยื้อนอีกแท่งเข้ามาบ้าง จะต้องวางห่างแม่เหล็กโดมิเตอร์ไปทางทิศตะวันออกเท่าใด  
แม่เหล็กจึงจะเหวี่ยงไปเป็นสองเท่า (8 เซนติเมตร)
4. แม่เหล็กแท่งหนึ่ง เมื่ออยู่ใกล้ขั้ว A ทำให้เข็มของแม่เหล็กโดมิเตอร์เหวี่ยง 45° ที่  
ขั้ว B มันจะทำให้เข็มเหวี่ยง 30° จงเปรียบเทียบความเข้มของสนามแม่เหล็กโลก  
ที่ A และ B และถ้า  $H_A = 0.1$  เกล็ด  $H_B$  มีค่าเท่าใด ให้ถือว่าแท่งแม่  
เหล็กอยู่ห่างจากแม่เหล็กโดมิเตอร์เท่ากัน และอยู่ไปทางเดียวกัน ณสองขั้ว  
(1 :  $\sqrt{3}$ , 0.173)
5. ในการทดลองหาความเข้มของสนามแม่เหล็กโลก H และโมเมนต์ของแม่เหล็ก M  
มีรายการดังต่อไปนี้ เมื่อวางแม่เหล็กอยู่ทางทิศใต้ของแม่เหล็กโดมิเตอร์ และ  
ห่างจากมัน 40 เซนติเมตร เข็มจะเหวี่ยง 8° 36' และแท่งแม่เหล็กนั้นจะสั่น 18 ครั้ง  
ใน 7 นาที ถ้าแท่งแม่เหล็กหนัก 100.5 กรัม ยาว 15.2 เซนติเมตร กว้าง 0.65  
เซนติเมตร หนา 1.2 เซนติเมตร จงหาค่าของ H และ M (0.177, 795)
6. แม่เหล็กแท่งหนึ่งสั่นได้ก่อน 12 ครั้งต่อวินาที ในสนามความเข้ม 1.2 เกล็ด มัน  
จะสั่นกี่ครั้ง ในสนามความเข้ม 0.3 เกล็ด (6 ครั้งต่อวินาที)
7. แม่เหล็กแท่งหนึ่งสั่นได้ก่อน 18 ครั้งต่อวินาทีในสนามเข้ม 0.2 เกล็ด มันจะสั่นกี่ครั้ง  
ในสนาม 5 เกล็ด (90 ครั้งใน 1 นาที)
8. แม่เหล็ก A และ B มีโมเมนต์แห่งความน้อยเท่ากัน อัน A สั่น 18 ครั้งต่อวินาที  
B จะสั่นกี่ครั้งในสนามเดียวกัน ถ้า  $M_A = 4 M_B$  (9 ครั้งต่อวินาที)

9. แม่เหล็ก A และ B มีขนาดและหนักเท่ากัน A ดึงเร็วกว่า B ต้องเท่า จงเปรียบเทียบโมเมนต์ของ A และ B  $\left(\frac{M_A}{M_B} = \frac{9}{1}\right)$
10. แม่เหล็กแท่งหนึ่งชิ้น 15 ครั้งต่อวินาที ในสนามที่กรุงเทพฯ ถ้าเรานำแม่เหล็กนี้ไปอีกแท่งหนึ่ง มีชิ้น 15 ครั้งใน 2 นาที จงเปรียบเทียบความเข้มที่กรุงเทพฯ และคำนวณ  $(4:1)$
11. แม่เหล็กเล็ก ๆ แท่งหนึ่งชิ้นถี่ขึ้น 30 ครั้งต่อวินาที ที่กรุงเทพฯ ซึ่งมีความเข้ม 0.32 เกาส์ มันจะถี่กี่ครั้งต่อวินาทีที่ลอนดอน ซึ่งมีความเข้ม 0.18 เกาส์  $\left(22 \frac{1}{2} \text{ ครั้ง}\right)$
12. ถ้าเราเอาแม่เหล็กแท่งหนึ่งมาแขวนให้สั่นถี่ขึ้น มันจะถี่ 16 รอบใน 1 นาทีที่ตำแหน่งซึ่งมีความเข้ม 0.2 เกาส์ ถ้าเราเอาแม่เหล็กนี้ไปยังอีกตำแหน่ง มันถี่ 20 รอบต่อวินาที จงหาความเข้มที่ตำแหน่ง  $(0.31)$
13. แม่เหล็กสองแท่ง เมื่อผูกติดกัน ให้ขั้วเหมือนกัน อยู่ด้วยกัน จะแกว่งกวัด 24 รอบต่อวินาที ถ้าเราให้แกว่งกวัดเมื่อขั้วไม่เหมือนกัน อยู่ด้วยกัน มันจะแกว่งกวัดแต่เพียง 16 รอบต่อวินาที จงเปรียบเทียบโมเมนต์ของแม่เหล็กทั้งสอง  $(18:5)$
14. ในข้อจับสาม ถ้าแม่เหล็กทั้งสองแท่งมีโมเมนต์แห่งความเฉื่อยเท่ากัน มันจะถี่ขึ้นเท่ากันเท่าใดครั้ง ในสนามเดียวกัน ให้ถือว่าแม่เหล็กวางตัวกันเมื่อผูกติดกัน  $(8\sqrt{13}, 8\sqrt{5})$
15. ถ้าบีบปลายลวดข้างบนของตาซึ่งความบิดไป  $90^\circ$  เข้มรอบ  $30^\circ$  ถ้าอยากให้เข็มเป็นสองเท่า ต้องบีบปลายลวดข้างบนเท่าใด  $(164^\circ)$

## บทที่ 4

## สมบัติของสารแม่เหล็ก

## 1. ความเข้มของการเป็นแม่เหล็ก และกำลังขั้วต่อหนึ่งหน่วยของเนื้อ

ในการที่จะเรียนรู้สมบัติต่าง ๆ ภายในสารของแม่เหล็ก เราจะรู้แต่เพียงกำลังขั้ว และโมเมนต์ของแท่งแม่เหล็กเท่านั้นยังไม่พอ เราจำเป็นต้องรู้ขนาดการรับเป็นแม่เหล็ก และอำนาจที่จะยอมให้เส้นแรงแม่เหล็กผ่านไปในเนื้อ และเพื่อความสะดวก และให้เป็นมาตรฐานสำหรับเปรียบเทียบสมบัติเหล่านี้ของตัวต่าง ๆ เราจะพิจารณาเกี่ยวกับหนึ่งหน่วยของปริมาตร หรือหนึ่งหน่วยของพื้นที่หน้าตัดของแท่งสารที่เราพิจารณาเท่านั้น

ความเข้มของการเป็นแม่เหล็ก  $I$ 

คือ โมเมนต์ต่อ 1 หน่วยปริมาตรของแท่งแม่เหล็ก ซึ่งมีค่า  $M$  เป็นโมเมนต์ของแท่งแม่เหล็ก ซึ่งมีปริมาตร  $V$

$$I = \frac{M}{V}$$

ความแรงขั้วต่อ 1 หน่วยของเนื้อ  $\rho$ 

เราอาจจะแสดงได้ว่า ความแรงขั้วต่อ 1 หน่วยพื้นที่หน้าตัด จะมีค่าเท่ากับ ความเข้มของการเป็นแม่เหล็ก สมมติ  $a$  เป็นเนื้อที่หน้าตัด และ  $l$  เป็นความยาว

ปริมาตร  $V = a \times l$

และกำลังขั้ว  $m = a \times \rho$

$\therefore$  โมเมนต์  $M = m \times l = a \times \rho \times l$

เพราะฉะนั้นความเข้มของการเป็นแม่เหล็ก  $I = \frac{M}{V}$

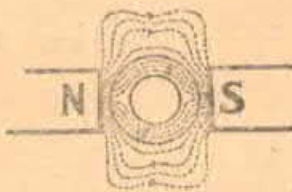
$$= \frac{a \times d \times l}{a \times l}$$

$$= d$$

∴ I ความเข้มของการเป็นแม่เหล็ก = d ความแรงของคอร์ทหนึ่งหน่วยของเนื้อ

2. ความซาบซึมได้ (PERMEABILITY)  $\mu$  และอำนาจการรับเป็นแม่เหล็ก (SUSCEPTIBILITY)  $k$

จำนวนเส้นแรงที่ผ่านตัวกลางคือหนึ่งหน่วยพื้นที่ตั้งได้ หากกับเส้นแรงไม่คงที่เสมอ



รูปที่ 41

ไปจำนวนน้อยแล้วแต่คุณสมบัติของตัวกลางนั้นๆ ถ้าจำนวนเส้นแรงที่ผ่านตัวกลางหนึ่งมากกว่าจำนวนเส้นแรงที่ผ่านอีกตัวกลางหนึ่งเมื่ออยู่ในที่เดียวกัน เราพูดว่า ความซาบซึมได้ของตัวกลางอันแรกมากกว่าของตัวกลางอันที่ 2 เพราะฉะนั้นเราจะพูดได้ว่า ความซาบซึมได้ของตัวกลางหนึ่ง คือ

อำนาจการนำเส้นแรงแม่เหล็กเปรียบเทียบกับอากาศ ที่จริงตามปกติเขาถือเอาจำนวนเส้นแรงซึ่งผ่านสุญญากาศเป็นหลัก แต่เพื่อความสะดวกเราจะเอาอากาศเป็นหลักก็ได้ เพราะความซาบซึมได้ของอากาศเกือบเท่ากับ ความซาบซึมได้ของสุญญากาศซึ่งเราถือว่าเท่ากับ 1

ตรงกันข้ามกับความซาบซึมได้ เรามักว่า ความต้านทาน (Reluctance) ถ้าตัวกลางอันใดมีความซาบซึมได้มากกว่าอีกตัวกลางหนึ่ง เราก็อาจจะพูดได้ว่าตัวกลางอันแรกมีความต้านทานน้อยกว่าอันที่สอง และถ้าสิ่งไหนมีความซาบซึมได้น้อย สิ่งนั้นก็มีความต้านทานมาก

ด้วยเหตุที่สิ่งต่างๆ มีความซาบซึมได้ไม่เท่ากัน เราจึงสามารถที่จะกันไม่ให้มีสนามแม่เหล็กณที่หนึ่งที่ได้ได้โดยการใช้น้ำ (Magnetic Screen) หากแม่เหล็กนั้นเขาทำด้วยเหล็กอ่อน ทำเป็นรูปทรงกลม, กระบอกกลวงหรือรูปอื่นๆแต่สะดวก เมื่อเราเอาผง

ตะไบไปเรื่อยเพื่อแสดงเส้นแรงในกระบอกทดลอง จะปรากฏว่าไม่มีเส้นแรงภายในกระบอก  
นั้น นั่นคือไม่มีสนามภายในวงแหวนเลย

อำนาจความซาบซึ่มได้ของสารหนึ่งไม่คงตัว แต่แต่ ความเข้ม ของสนาม  
อุณหภูมิก่อนที่แก๊สอัดอย่างอื่น และตัวทดลองนั้นได้เป็นอย่างดีมาาก่อนแล้ว เช่นถูก  
เผาหรือถูกทำให้เป็นแม่เหล็กมาแล้ว

เมื่อจำนวนเส้นแรงเปลี่ยนไปแต่แต่คุณสมบัติของตัวทดลองเช่นนี้ แรงระหว่างขั้ว  
ทั้งสองซึ่งอยู่ในตัวทดลองซึ่งมีความซึมได้  $\mu$  ก็จะเปลี่ยนไปด้วย และเราได้

$$\text{แรง} \quad F = \frac{m_1 \times m_2}{\mu d^2}$$

และตามคำจำกัดความ จำนวนเส้นแรงซึ่งผ่านตัวทดลองนี้ต่อตารางเซนติเมตร  
 $\mu = \frac{\text{จำนวนเส้นแรงซึ่งผ่านตัวทดลองนี้ต่อตารางเซนติเมตร}}{\text{จำนวนเส้นแรงซึ่งผ่านอากาศต่อ 1 ตาราง ซม.}}$

$$= \frac{B}{H}$$

บางทีเขาเรียกจำนวนเส้นแรงซึ่งผ่านตัวทดลองต่อ 1 ตารางเซนติเมตร ว่า ความเข้ม  
แห่งการเหนี่ยวนำ (Induction)  $B$  และ  $H$  คือความเข้มของสนามในอากาศ แต่  
บางทีถ้าเราพูดถึงจำนวนเส้นซึ่งผ่านพื้นที่หนึ่ง ๆ ว่า Magnetic flux (ไม่จำกัดว่าพื้นที่  
ใดเท่าไร)

เป็นต้นว่าถ้าเดิมในอากาศมีจำนวนหลอดแรงอยู่ 3 หลอดหน่อด้วยหนึ่งตารางเซน  
ติเมตร เมื่อเขาแทงเหล็กมาวางไว้ณที่เดียวกัน จำนวนหลอดแรงที่ผ่านแท่งเหล็ก  
กลายเป็น 2100 หลอดหน่อด้วย คือหนึ่งตารางเซนติเมตร ความซาบซึ่มได้ของเหล็กนั้นจะ  
เท่ากับ 700

อำนาจการรับเป็นแม่เหล็ก ในการทำแม่เหล็ก ถ้าเราทำแม่เหล็กหลาย  
แท่งด้วยเหล็กชนิดต่างกัน และเขาแม่เหล็กแท่งเดียวกันมาแทงเหล็กนั้นทุก ๆ แท่ง

ด้วยวิธีเดียวกันและถือเป็นจำนวนครึ่งเท่ากัน แล้วแท่งเหล็กเหล่านี้นี้ ก็จะกลายเป็นแท่งแม่เหล็กที่มีอำนาจ (Moment) ไม่เท่ากัน แท่งไหนมีโมเมนต์มากกว่าเราก็พูดว่าแท่งนั้นมีอำนาจการรับเป็นแม่เหล็กมากกว่า

ความที่ได้อธิบายมาแต่ข้างต้น เราอาจจะทำแม่เหล็กได้โดยให้เส้นแรงแม่เหล็กแท่งแม่เหล็ก ถ้าจำนวนที่ขึ้นกับความเข้มเป็น  $H$  และแท่งเหล็กนั้นกลายเป็นแม่เหล็กที่มีความเข้ม  $I$  อำนาจการรับเป็นแม่เหล็กของสารนั้นคือ  $k = \frac{I}{H}$

3. การเหนี่ยวนำและความเข้มของสนาม คือ ถ้าความเข้มของสนามในตัวกลางที่มีความเข้มได้  $\mu$  เนื่องจากขั้วขั้วมีค่าถึง  $m$  ที่จุดห่างจากขั้ว  $r$  เราจะได้

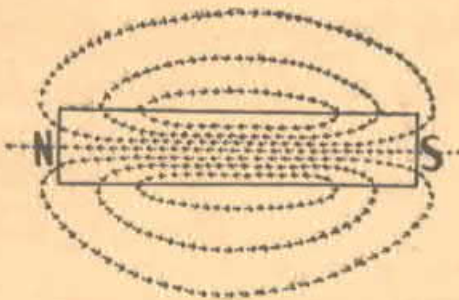
$$H = \frac{m}{\mu r^2}$$

$\therefore$  เส้นเหนี่ยวนำหรือการเหนี่ยวนำ Induction  $B = \mu H \frac{m}{r^2}$

เพราะฉะนั้นเราเห็นได้ว่า การเหนี่ยวนำเนื่องจากขั้วหนึ่ง ๆ ที่จุดหนึ่ง ๆ ย่อมคงที่เสมอ แต่ความเข้มของสนามเปลี่ยนไปแล้วแค่คุณสมบัติของตัวกลาง

### เส้นเหนี่ยวนำ

เส้นแรงแม่เหล็กและเส้นเหนี่ยวนำคล้ายคลึงกันมาก เส้นแรงแม่เหล็กนั้นสามารถที่จะทำปฏิกิริยาให้บังเกิดขึ้น เช่นการหมุนเข็มทิศเพื่อแสดงอิทธิพลแม่เหล็ก ซึ่งเราเรียกว่าสนาม ส่วนเส้นเหนี่ยวนำนั้นสามารถที่จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นได้ นั่นคือ ทำหรืออาจจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพของตัวกลางที่สนามแม่เหล็กผ่านไประยะ เมื่ออำนาจแม่เหล็กผ่านไประยะ คุณสมบัติของตัวกลางเช่นก๊าซไม่เปลี่ยนแปลง เราจึงเรียกเส้นเหล่านี้ว่าเส้นแรงแม่เหล็ก แต่เราก็อาจจะเรียกมันว่าเส้นเหนี่ยวนำได้ เพราะมันเปลี่ยนแปลงสภาพของตัวกลางนั้นได้บ้างเหมือนกัน ส่วนตอนของเส้นที่ผ่านสารแม่เหล็กและที่ทำให้คุณสมบัติของสารเหล่านั้นเปลี่ยนแปลงเป็นเส้นเหนี่ยวนำ ดังนั้นถ้าหับแม่เหล็กแท่งหนึ่งๆตอน



รูปที่ 42

ของเส้นอำนาจแม่เหล็กที่อยู่ภายใน  
แท่งแม่เหล็กคือเส้นเหนี่ยวนำเพราะ  
มันรักษาความเป็นแม่เหล็กของ  
แท่งแม่เหล็กนั้นคอนทอยข้างนอกก็  
เป็นเส้นเหนี่ยวนำเพราะมันพยายาม  
เปลี่ยนสมบัติของอากาศ ฉะนั้น  
ทั้งหมดเส้นเป็นเส้นเหนี่ยวนำ (ทั้ง  
ที่อยู่ภายในและภายนอกของแท่ง

แม่เหล็ก) และคอนทอยข้างนอกแท่งแม่เหล็กอาจทำให้เกิดกริยาบนแท่งแม่เหล็กภายนอกได้  
ฉะนั้นคอนของเส้นอำนาจแม่เหล็กที่อยู่ภายนอกก็เป็นเส้นแรง ดังนั้นเส้นแรงคือส่วนหนึ่งของเส้นเหนี่ยวนำ

#### 4. กฎของเกาส์

จากกฎกำลังสองผกผัน เราได้แก่งกฎหนึ่ง มีใจความว่า จำนวน  
เส้นแรงซึ่งเกิดขึ้นและออกจากหน่วยขั้วเหนือ และไปจบลงที่หน่วยขั้วใต้

เป็น  $4\pi$  เพราะฉนั้นถ้ากำลังขั้วเป็น  $m$  จำนวนเส้นแรงซึ่งผ่านออกหรือเข้าไปยังขั้ว  
จะเป็น  $4\pi m$  จำนวนเส้นแรงนี้จะไม่เปลี่ยน แม้ขั้วจะอยู่ในตัวกลางใด ๆ ก็ตาม

เราอาจพิสูจน์กฎของเกาส์โดยอาศัยกฎกำลังสองผกผันได้ดังต่อไปนี้

ตามกฎกำลังสองผกผัน เราทราบว่าที่จุดห่างจากขั้ว ซึ่งมีกำลัง  $m$  อยู่  $r$  ความ  
เข้มของสนาม  $= \frac{m}{r^2}$  ในตัวกลางเช่นอากาศ แต่เราก็คำนวณแล้วว่า จำนวนเส้นแรงคือ  
หนึ่งหน่วยพื้นที่คือความเข้มของสนาม

$\therefore$  จำนวนเส้นแรงต่อหนึ่งหน่วยของพื้นที่ ณ จุดที่กล่าวถึงนี้

$$= \frac{m}{r^2}$$

แต่พื้นที่ของรูปทรงกลมซึ่งมีรัศมี  $r$  รอบขั้วนั้น  $= 4\pi r^2$

จำนวนเส้นแรงทั้งหมดที่ผ่านผิวของรูปทรงกลมนี้  $= 4\pi r^2 \frac{m}{r^2}$

$$= 4 \pi m$$

ถ้าขั้วมีกำลัง 1 หน่วย จำนวนเส้นแรง

$$= 4 \pi$$

เส้น

ถนนแม่เหล็กจะขรุขระไม่เรียบอย่างไรก็ตาม จำนวนเส้นแรงที่ผ่านพื้นที่  $A$  ที่ล้อมรอบขั้ว  $m$  ก็จะเป็น  $4 \pi m$  เสมอ นี่เป็นแต่เพียงการพิสูจน์อย่างคร่าว ๆ ว่า พิกัดอย่างพิกัดขั้วออกจะยากเกินไปสำหรับในขั้น

### 5. การเหนี่ยวนำในเหล็กและชนิดของสารในวิชาแม่เหล็ก

สมมติเราเอาเหล็กแท่งหนึ่งวางไว้ในสนามซึ่งเดิมมีความเข้ม  $H$  และเหล็กแท่งนี้กลายเป็นแม่เหล็กซึ่งมีความแรงขั้ว  $\rho$  คือหนึ่งหน่วยตารางเซนติเมตร

จำนวนเส้นเหนี่ยวนำที่ผ่านแท่งเหล็ก คือหนึ่งตารางเซนติเมตรทั้งหมด  $B =$  จำนวนเส้นแรงเดิม + จำนวนเส้นแรงเนื่องจากแท่งแม่เหล็กนั้น ซึ่งเป็น  $4 \pi \rho$  เส้นต่อ 1 ตารางเซนติเมตร

$$\therefore B = H + 4 \pi \rho$$

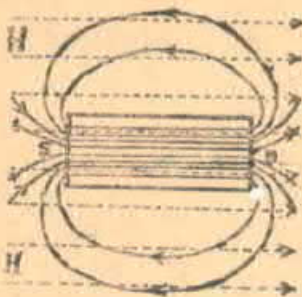
$$\text{หรือ } B = H + 4 \pi I$$

$$\text{เพราะ } \rho = I$$

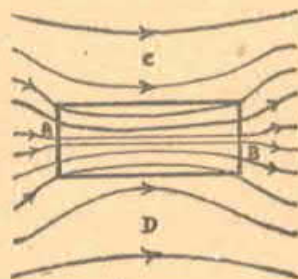
$$\text{หรือ } \frac{B}{H} = 1 + 4 \pi \frac{I}{H}$$

$$\mu = 1 + 4 \pi k$$

$$\text{เพราะ } \mu = \frac{B}{H} \quad k = \frac{I}{H}$$

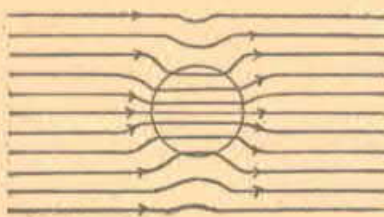


รูปที่ 43



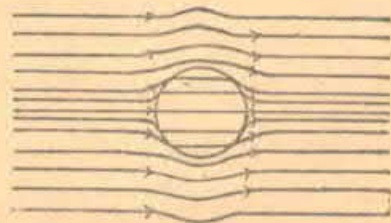
รูปที่ 44

ตามปกติทุก ๆ ตัวกลางย่อมยอมให้เส้นแรงแม่เหล็กผ่าน เส้นน้อยมากก็น้อย  
ดังนั้น  $\mu$  จะต้องมามีค่าเป็นบวกเสมอ ส่วนค่าของ  $k$  นั้นอาจจะเปลี่ยนไป เมื่อค่าของ  
 $\mu$  เปลี่ยนไป แต่เรารู้แล้วว่าในตัวกลางบางอย่างเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กไม่กลายเป็น  
แม่เหล็กเลย ดังนั้น โมเมนต์ของตัวกลางนั้นจะเป็นศูนย์ หรือ  $k = 0$



พาราแมกเนติก

รูปที่ 45



ไดอะแมกเนติก

รูปที่ 46

สารต่าง ๆ อาจแบ่งออกได้เป็นสามพวกในวิชาแม่เหล็ก

### สารแม่เหล็กสามัญ (PARAMAGNETICS)

ตามที่เราได้กล่าวมาแล้วโดยมากเกี่ยวกับเหล็กหรือสารที่เป็น แม่เหล็กได้ ตาม  
ธรรมดา เมื่อเราเอาสารเหล่านี้ไปไว้ในสนามแม่เหล็ก เส้นแรงแม่เหล็กจะเข้าไปในสารเหล่านี้  
คล้าย ๆ กันว่าสารเหล่านี้เป็นตัวนำสำหรับเส้นแรงแม่เหล็กที่คิดว่าอากาศมาก และตามที่ได้  
ปรากฏมาแล้ว ถ้าเส้นแรงแม่เหล็กผ่านตัวกลางใดมาก ตัวกลางนั้นก็จะเป็แม่เหล็กที่ก่อก  
มาก สารเหล่านี้ได้แก่ เหล็ก โคบอลต์ นิกเกิล เป็นต้น และเราให้ชื่อว่า สารแม่  
เหล็กกล้า (Ferromagnetics) และปรากฏว่ามีสารหลายอย่างที่มีเส้นแรงแม่เหล็กเข้าม  
หาเหมือนกัน แต่ไม่ค่อยมากนัก จำพวกนี้ เราเรียกว่า สารแม่เหล็กสามัญ

(Paramagnetics) ที่จริงสารทั้งสองจำพวกนี้ บางทีเขารวมเรียกว่า สาร แม่เหล็ก สำนัญ  
(Paramagnetics)

สำหรับสารพวกแม่เหล็กสำัญ  $B > H$  เสมอ เพราะฉะนั้น  
 $\mu > 1$  และ  $k$  จะมีค่าเป็นบวก เสมอ

### สารที่ไม่เป็นแม่เหล็ก (NONMAGNETICS)

สารจำพวกนี้แม่เราจะใช้ชื่อนามกล่าสักเท่าไรก็ตาม มันก็จะไม่กลายเป็นแม่เหล็ก  
แะจำนวนเส้นแรงจะไม่มากขึ้นหรือลดลง เปรียบเทียบกับในสุญญากาศดังนี้  $B = H, \mu = 1$   
หรือ  $k = 0$  สารจำพวกนี้ได้แก่ ไม้ กระดาษ โลหะ หลายชนิด

### สารแม่เหล็กวิสามัญ (DIAMAGNETICS)

เวลาเรานำเอาสารบางอย่าง เช่น บิสมีท, ออสไมน์ ไปวางไว้ในสนามแม่เหล็ก  
เส้นแรงจะไม่ทะเข้ามาหา แต่กลับเหินออกไป ฉะนั้นจำนวนเส้นแรงที่ผ่านกลับลดลง  
และแทนที่สารจำพวกนี้จะดู อย่างพวกสารแม่เหล็กสำัญ หรือไม่ทำกิริยาอะไรเลย  
อย่างพวกสารที่เป็นแม่เหล็กไม่ได้ มันจะผลักแม่เหล็กคล้ายกับว่า การเหนี่ยวนำแม่เหล็ก  
ที่เกิดขึ้น สำหรับสารเหล่านี้ไม่เหมือนจำพวกเหล็ก คือ คล้ายกับว่า ถ้าเรานำเอาขั้ว  
เหนือของแท่งแม่เหล็ก เข้ามาต่อ แท่งโลหะ เช่น บิสมีท เราจะได้ขั้วเหนือขึ้นที่ปลาย  
ที่ใกล้กับแท่งแม่เหล็ก

สำหรับพวกสารแม่เหล็กวิสามัญ  $B < H$  เสมอ เพราะฉะนั้น  $k$  จะมี ค่าเป็น  
ลบเสมอ

เราอาจจะรวบรวมผลข้างบนได้ดังต่อไปนี้

|                                    |                                      | ค่าของ $\mu$                             | ค่าของ $k$                              |
|------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------|
|                                    | พวกสารแม่เหล็กกล้า<br>Ferromagnetics | มากกว่าหนึ่ง                             | $+ k$                                   |
| สารแม่เหล็กสามัญ<br>Paramagnetics  |                                      |                                          |                                         |
|                                    | พวกสารแม่เหล็กอ่อน<br>Paramagnetics  | มากกว่าหนึ่ง                             | $+ k$<br>(เป็นสัดส่วนกับ $T$ )          |
| พวกไม่เป็นแม่เหล็ก<br>Nonmagnetics |                                      | หนึ่ง                                    | $0$                                     |
| สารแม่เหล็กวิสามัญ<br>Diamagnetics |                                      | น้อยกว่าหนึ่ง<br>(แต่ไม่เป็น $0$ หรือลบ) | $- k$<br>(เป็นสัดส่วนผกผัน<br>กับ $T$ ) |

$T =$  อุณหภูมิสัมบูรณ์

ข้อที่ควรสังเกต คือ ค่าของ  $\mu, k$  ไม่คงที่ ย่อมแล้วแต่ค่าของสนาม  $H$  อุณหภูมิ (ดูเซอร์ฟในรูป 18) ความดัน (ก๊าซ) และแต่ด้วยตัวสารเหล่านั้นเองเป็นอะไรมาก่อนแล้ว เช่น ถูกละลาย หรือเคยเป็นแม่เหล็กมาแล้วหรือเปล่า, สำหรับสารแม่เหล็กวิสามัญนั้น ค่าของ  $k$  แทบจะได้ว่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปกับการเปลี่ยนแปลงของค่าของสนาม  $H$  ยกเว้นแคบัสมี ซึ่ง  $k$  เปลี่ยนแปลงกับสนาม  $H$  แต่อย่างไรก็ตามปรกติค่าของ  $k$  สำหรับสารจำพวกสารแม่เหล็กวิสามัญมีค่าน้อยมากเปรียบเทียบกับพวกสารแม่เหล็กกล้า

รายชื่อ ตามลำดับจากแรงที่ดึงดูด

สารแม่เหล็กสามัญ

(Paramagnetic)

เหล็ก

นิกเกิล

โคบอลต์

มังกานีส

แกวโคเวอ

ออกซิเจน

สารที่ไม่เป็นแม่เหล็ก

(Nonmagnetic)

ไม้

กระดาษ

หินอ่อน

สารแม่เหล็กวิสามัญ

(Diamagnetic)

บิสมีท, ฟอสฟอรัส

อินดิโน

แกวฟอส

ปรอท

สังกะสี

ตะกั่ว, ทองแดง, น้ำ

หมายเหตุ นักเรียนควรสังเกตว่า Coercive Force และ Susceptibility ไม่เหมือนกัน Coercive Force คือแรงระหว่างโมเลกุลที่จะพยายามรักษาสภาพอย่างเดิม ฉะนั้นเหล็กกล้าจึงกลายเป็นเหล็กยาค และเมื่อเป็นแม่เหล็กแล้วก็จะถูกทำลายได้ยากเหมือนกัน ส่วน Susceptibility คืออำนาจการรับเป็นแม่เหล็ก ในขณะที่สารนั้นกำลังอยู่ในสนามแม่เหล็ก และเหล็กอ่อนรับการเป็นแม่เหล็กได้เร็วและดีกว่าเหล็กกล้า ถ้าหากว่าสนามไม่มีแล้ว และสารยังคงเป็นแม่เหล็กก็กล่าวอยู่ เราพูดว่าสารมี Retentivity มาก

การวัดความซาบซึมได้  $\mu$  และอำนาจการรับเป็นแม่เหล็ก  $k$  ของสารแม่เหล็ก

ในการที่จะทราบค่าของ  $\mu$  ได้ เราจะต้องค่าของความเหนี่ยวนำ  $B$  และสนามแม่เหล็ก  $H$  ซึ่งทำการนำเหนี่ยวนำเท่าตัวนั้น ( $\mu = \frac{B}{H}$ ) และในการที่จะทราบค่าของ  $k$  ได้ เราจะต้องรู้ค่าของความเข้มแห่งการเป็นแม่เหล็ก  $I$  และสนามแม่เหล็ก  $H$  ( $k = \frac{I}{H}$ ) ตามปรกติก่อนจะหา  $\mu$  เราจะวัดทราบค่าของ  $I$  เสียก่อน แล้วจึงคำนวณหา ( $B = H + 4\pi I$ ) แล้วจึงหา  $\mu$  ที่หลัง แต่เราก็อาจหาได้โดยที่เดียว เมื่อทราบค่าของ  $k$  แล้ว ( $\mu = 1 + 4\pi k$ )

ตามหลักซึ่งอธิบายมาแล้ว เราจะเห็นได้ว่า

- (1) ถ้าจะหา  $\mu$  เราต้องหา  $k$  เสียก่อน
- (2) ถ้าจะหา  $k$  เราต้องทราบค่าของ  $H$  และ  $I$

ฉะนั้นปัญหาค้นต่อไปก็คือ เราจะต้องหาวิธีวัดและคำนวณค่าของ  $H$  และ  $I$  เราหาค่าของ  $I$  ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ในเมื่อเราทราบค่าของโมเมนต์แม่เหล็ก  $M$  และปริมาตร  $V$  ของสารซึ่งเราใช้ในการทดลอง ( $I = \frac{M}{V}$ ) จะได้พิจารณาการหา  $H$  และ  $I$  ตามลำดับไปดังนี้

### (1) สนาม $H$

สนามแม่เหล็ก การมีค่าสม่ำเสมอและคงที่ เพื่อจะให้เป็นอย่างนั้น ตามปกติ เขามักใช้ขดลวด (โซลีนอยด์) เมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดนั้น ๆ ก็จะมีอำนาจแม่เหล็ก ซึ่งทำให้สามารถทดลองกับมีขนาดเล็กพอที่จะสอดเข้าไปในกระบอกขดลวดนั้นได้ กระแสไฟฟ้า  $C$  ที่ผ่านขดลวดนั้น จะทราบได้จากอัมมิเตอร์ หรือจากกลัดวานอิมิตอร์ซึ่งใช้ควบกับขดลวดตามิเตอร์ (หม้อแยกขาด) (จากปริมาณของธาตุที่แยกออกมา เราจะคำนวณหากระแสไฟฟ้าได้ ส่วนกลัดวานอิมิตอร์จะแสดงและช่วยให้เราสามารถศึกษาให้กระแสคงที่ โดยคอยเปลี่ยนความต้านทานของรีโอสตัท) ระหว่างการทดลองควรจะให้กระแสคงที่เสมอ ถ้า  $C$  อัมแปร์เป็นกระแส และ  $n$  เป็นจำนวนรอบของขดลวดต่อ 1 เซนติเมตร ความยาวของขดลวด แล้วความเข้มของสนามแม่เหล็ก

$$H = 0.4 \pi nC$$

### (2) ความเข้มแห่งการเป็นแม่เหล็ก $I$

จาก  $I = \frac{M}{V}$  เราจะเห็นได้ว่าเราจะต้องรู้ค่าของ  $V$  เสียก่อนจึงจะได้  $I$   $V$  นั้น เราอาจหาได้โดยวัดความเข้มของสนามแม่เหล็ก เนื่องจากแท่งสารนั้น โดยใช้แมกนีโตมิเตอร์ และเปรียบเทียบกับสนามแม่เหล็กโลก  $H_1$  ดังที่เคยอธิบายมาแล้วในบทก่อน

ถ้าเราไม่ทราบความเข้มของสนามแม่เหล็กโลก และสารเป็นแท่งไดพอลและมี  
 ฐานง่าย ๆ เราอาจใช้แม่เหล็กเครื่องตั้งชนิดตั้งได้ ถ้า  $I$  เป็นโมเมนต์แห่งความเหนี่ย  
 วย เป็นครึ่งของความยาวของแท่งสารที่ใช้  $d$  เป็นระยะจากแท่งแม่เหล็กถึงเข็มแม่เหล็กโต  
 มิเตอร์  $\theta$  เป็นมุมที่เข็มทิศเบนไปจากแนวเมริเดียน  $T$  เป็นค่าการแกว่ง (ต่อ 1  
 รอบ) เราก็จะได้ดังนี้

$$H_1 = \frac{2\pi \sqrt{I}}{T (d^2 - l^2)} \sqrt{\frac{2d}{\tan \theta}} \dots\dots\dots I$$

$$\text{และ } H = \frac{(d^2 - l^2)^2}{2d} H_1 \tan \theta \dots\dots\dots II$$

### เหล็กกล้า

ในการหาค่าของ  $k$  และ  $\mu$  ของเหล็กกล้า เราอาจใช้แม่เหล็กโตมิเตอร์ตั้งของ  
 ชนิดนี้ได้ เพราะการคลายอำนาจแม่เหล็กของเหล็กกล้านั้นช้ามาก แต่ถึงกระนั้นการ  
 คลายอำนาจก็ยังมีย่อยบ้างในระหว่างการทดลอง ดังนั้นจำเป็นจะต้องป้องกันหรือลดการ  
 คลายอำนาจนั้นให้น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ วิธีหนึ่งก็คือ ควรใช้สารที่ทดลองมีขนาดยาวมาก  
 เช่นลวดหรือเส้นยาว ๆ เพราะสำหรับสารที่มีความยาวมาก เช่นนั้นมันจะเห็นย่นนำ  
 ทำลายอำนาจตัวเองได้น้อยลง ฉะนั้นในขณะที่เขามันมาแกว่งความคลายอำนาจก็จะแทบ  
 ว่าไม่มี

### เหล็กอ่อน

สำหรับในการทดลองกับเหล็กอ่อนนั้น เราจะนำเขามันมาแกว่งไม่ได้ ฉะนั้น  
 เราจะหาค่าของสนามแม่เหล็กโลก  $H_1$  ด้วยแม่เหล็กที่ตั้งขึ้นนี้ ดังในสมการ (1) ไม่ได้  
 ดังนั้นในการหา  $M$  เราต้องทราบค่าของสนามแม่เหล็กโลก  $H_1$  โดยทำการทดลอง

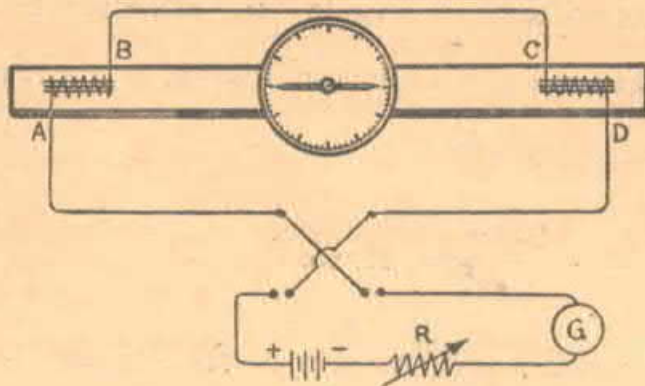
ดอหน้าหรือใช้ผลซึ่งเราหาได้แล้ว เมื่อได้  $H_1$  เราก็จะหาค่าของ  $M$  ได้ทีเดียว สำหรับดอหน้าหนึ่งซึ่งมีความยาว  $l$  และห่างแมกนีโตมิเตอร์  $d$  เมื่อใช้กระแส  $C$  อัมแปร์ เข้มแมกนีโตมิเตอร์เป็น  $\theta$  เราก็จะได้

$$M = \frac{(d^2 - l^2)^2}{2d^3} H_1 \tan \theta$$

ทั้งในสมการ (2) ถ้าเราให้  $d$  คงที่ สำหรับดอหน้าหนึ่ง เราอาจหาค่าของ  $\frac{(d^2 - l^2)^2}{2d}$  ได้โดยทีเดียว และค่านี้จะคงที่ไม่ว่ากระแส  $C$  จะเป็นเท่าใด ดังนั้น สมมติว่า เป็น  $K$

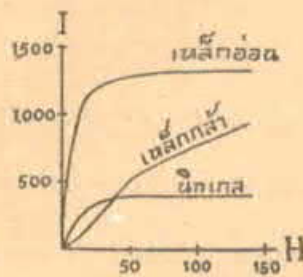
ฉะนั้น ในการทดลอง เขาก็จะหาค่า  $K$  ได้ แล้วเปลี่ยนกระแส  $C$  ในขณะเปลี่ยนกระแส  $C$  มุม  $\theta$  ก็จะเปลี่ยนไป และ  $\tan \theta$  ซึ่งเป็นสัดส่วนกับ  $M$  หรืออีกนัยหนึ่ง  $I$  ด้วยเหตุนี้บางคราวในการเขียนกราฟ  $H - I$  เขาจึงเขียนกราฟ  $C - \tan \theta$  แทน เพราะ  $H \propto C$  และ  $I \propto M \propto \tan \theta$  ฉะนั้นกราฟทั้งสองนี้ จึงมีลักษณะแบบเดียวกัน

หนึ่งได้กล่าวมาแล้วว่า ถ้าเราทราบค่าของความเข้มของสนามแม่เหล็กโลก แล้ว เราอาจจะหาค่าของความเข้มแห่งการเป็นแม่เหล็ก  $I$  ได้ทันที ถ้าเป็นเช่นนั้น เราจำเป็นต้องใช้แมกนีโตมิเตอร์ชนิดเททานันท์พอ ในการทดลองนี้มีอุปสรรคอย่างหนึ่งคือ ถ้าเราใช้กระแสไฟฟ้า  $C$  ทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก  $0.4 \pi nC$  เกาส์ อำนาจแม่เหล็กซึ่งแมกนีโตมิเตอร์ได้รับจะเนื่องจากกระแสไฟฟ้าโดยตรง และเนื่องจากแม่เหล็กซึ่งเราทำขึ้นด้วย อำนาจอันแรกนั้นเราไม่ต้องการให้มาเกี่ยวข้องกับกาจัดของเราในเรื่องนี้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องป้องกันหรือกำจัดเสียก่อน วิชาที่เขาคำนึงถึงดังนี้



รูปที่ 47

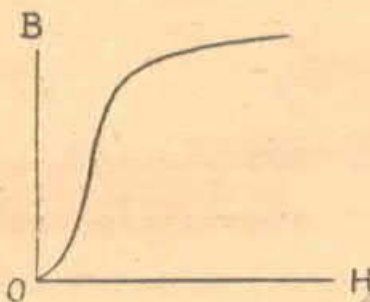
เราใช้ขดลวดสองขด AB และ CD ใต้ช่องว่างของเข็มทิศของแมกนีโตมิเตอร์ ขดทั้งสองขดขมมกระแ้ไฟฟ้าผ่านเข้าไปเท่ากัน ขนาดและจำนวนรอบของขดลวดเท่ากัน ดังนั้นถ้าวางให้ห่างเข็มทิศเท่ากัน อ่อนแรงแม่เหล็กของมันที่เข็มทิศก็เท่ากัน ถ้าอำนาจ มันตรงกันข้ามเข็มทิศก็จะไม่กระดิกเลย ไม่ว่ากระแสจะเป็นเท่าใด ฉะนั้นก่อน ลงมือทำการทดลอง เราผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในขดทั้งสองขด เดือนมันไปมาจน เข็มทิศไม่กระดิก และเมื่อจะทดลองจึงเอาเหล็กซึ่งเราต้องการทราบค่าของ  $\mu$  และ  $k$  ได้เข้าไปในขดลวด AB หรือ CD ในวงจรไฟฟ้าขมมมีความต้านทาน  $R$  ซึ่งอาจเปลี่ยน แปลงได้และ  $G$  ของกัลวานอมิเตอร์หรืออิมมิเตอร์สำหรับวัดค่า  $C$  ของกระแส ดัง แสดงในรูปข้างบนเคอร์ฟ I - H ที่ได้อ่านสำหรับสารแม่เหล็กต่าง ๆ มีลักษณะดังนี้



รูปที่ 48

ควรสังเกตว่า สารบางชนิดเช่นเหล็กอ่อน กลายเป็นแม่เหล็กได้ดีกว่าเหล็ก หรือสารชนิดอื่น เพราะค่าของ  $I$  เพิ่มขึ้นเร็วกว่าสารอื่นสำหรับค่าของ  $H$  เดียวกัน ฉะนั้นขณะที่อำนาจสนามแม่เหล็ก  $H$  อยู่ เหล็กอ่อนจะมีอำนาจแม่เหล็กมากที่สุด

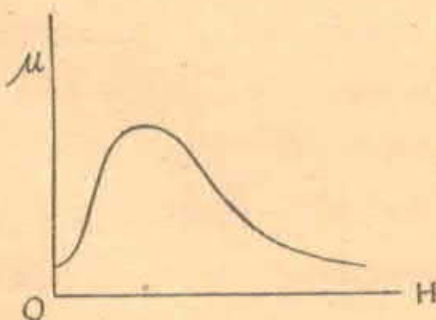
จากรูปที่ 49 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $B$  และ  $H$  เราจะเห็นว่า เมื่อเรา



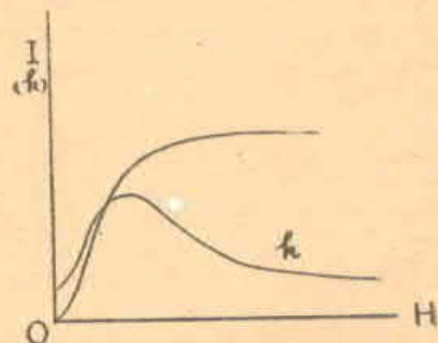
รูปที่ 49

ค่อย ๆ เพิ่มสนามแม่เหล็กขึ้น ที่แรกอำนาจการชักนำก็เกิดขึ้นได้มากและเร็วแต่เมื่อเพิ่มสนามต่อไปอีก หนึ่งเล็กน้อยเส้นชักนำที่ผ่านมันก็จะเพิ่มขึ้นช้าลง ในไม่ช้าเคอร์ฟก็จะขนานกับแกน  $H$  นั่นคือแม่เราจะเพิ่มสนามต่อไป อำนาจการเหนี่ยวนำก็จะไม่เพิ่มอีกต่อไปในขณะที่เราพูดว่าสารนั้น อิ่มตัว จาก

เคอร์ฟอันเดียวกัน เราจะเห็นทันทีว่า เมื่อสนามมีค่าน้อย ความซาบซึ่มได้จะเพิ่มขึ้นเร็วมาก แต่เมื่อสนามเข้มมาก ความซาบซึ่มได้จะลดลง เพราะตอนแรก  $B$  เพิ่มขึ้นเร็วกว่า  $H$  ตอนหลังแม้  $H$  จะมากเท่าไร ก็คงที่ ถ้านักเรียนพิจารณาเขาเองอีกต่อไป ก็จะเห็นว่า ลักษณะของเคอร์ฟ  $I - H$  จะคล้ายกับเคอร์ฟ  $B - H$  และเคอร์ฟของ  $\mu - H$  จะคล้ายกับเคอร์ฟของ  $k$  ดังนี้



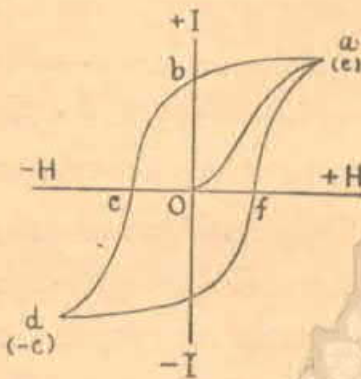
รูปที่ 50



รูปที่ 51

จุดอิมิตของสารต่าง ๆ ไม่เหมือนกัน และอัตราการเพิ่มของความเข้มข้น  
การเป็นแม่เหล็ก  $I$  และความเข้มของสนาม  $H$  ก็จะแตกต่างกันมาก ดังจะเห็นจาก  
รูปที่ 48

ยิสต์รีลิส ถ้าเราเริ่มทำการทดลองตั้งในการทดลองหาค่าของ  $\mu$  และ  $\chi$  แต่  
เพิ่มกระแส นั่นคือความเข้มของสนาม  $H$  ไปถึงขีดสูงพอสมควร แล้วค่อยลดลง



รูปที่ 52

ก็จะเพิ่มและลดลงตามไปด้วย และเราอาจเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของ  $I$   
และ  $H$  ได้ดังในรูปที่ 52

ถ้าเราพิจารณาผลการทดลองนี้จากเคอร์ฟ เราจะเห็นได้ว่า

ตอนแรก  $O$  ที่จุด  $O$  ความเข้มของสนาม  $H$  ไม่มีเลย กระแสแม่เหล็กจึง  
ไม่เป็นแม่เหล็ก นั่นคือ  $I = 0$  แต่พอเราปล่อยกระแสไฟฟ้า นั่นคือทำสนามให้เกิดขึ้น  
และค่อยเพิ่มความเข้ม  $I$  ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นดังที่เคยอธิบายมาแล้ว

ตอน  $a, b$  เมื่อเราเริ่มลดกระแสให้เท่ากับศูนย์ นั่นคือสนามกลายเป็นศูนย์  
ความเข้มของการเป็นแม่เหล็ก  $I$  ก็จะค่อยลดแต่ลดลงช้ามาก และค่าของ  $I$  ขณะที่เรา  
ลดความเข้มของสนามลงจะสูงกว่าค่าของ  $I$  ในตอนแรกเสมอ เมื่อความเข้มของสนาม  
 $H$  ลดลงเป็นศูนย์แล้ว ความเข้มของการเป็นแม่เหล็ก  $I$  ก็ยังคงมีอยู่เท่ากับ  $Ob$

ตอน bc ถ้าเราถลันทางเค้นของกระแด้ว ที่คของด้นาม H ก็จะถูกถลันด้วย ความเข้มของ H ในระหว่างนี้จะทำลายความเข้มของการเป็นแม่เหล็ก I เราต้องทำให้ ด้นามมีค่าเท่ากับ  $O_c$  ความเข้มของการเป็นแม่เหล็กจึงจะเป็นศูนย์ ด้นาม  $O_c$  นี้ จะเท่ากับแรงยัดระหว่างอนุ (Coercive force)

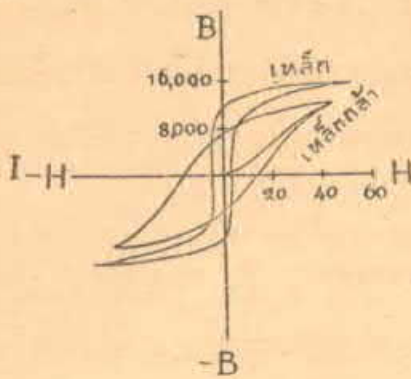
ตอน cd เมื่อเพิ่มกระแด้วหรือความเข้มของด้นาม H ต่อไปอีก ด้นามนั้น ก็จะเริ่มกลายเป้นแม่เหล็กอีก และความเข้มของการเป็นแม่เหล็ก I ก็จะเพิ่มเรื่อยไป ตามเคอร์ฟ cd และขั้วของแม่เหล็กจะกลับ

ตอน de สมมุติว่า d มีความเข้มของด้นามเท่ากับจุด a แต่จะไปทางทิศตรง กันข้าม และพอลถึงจุด d เราลดค่าของด้นาม H อีก ความเข้มของการเป็นแม่เหล็ก I ก็จะลดลง แต่ทว่าขณะค่าของความเข้มจะมากกว่า (คิดเป็นค่าบวก) เมื่อเราเพิ่ม ด้นามในตอน cd (เปรียบกับตอน  $O_a$  และ ab) และพอลถึงจุด e เมื่อความเข้มของ ด้นามเท่ากับศูนย์  $I = O_e$

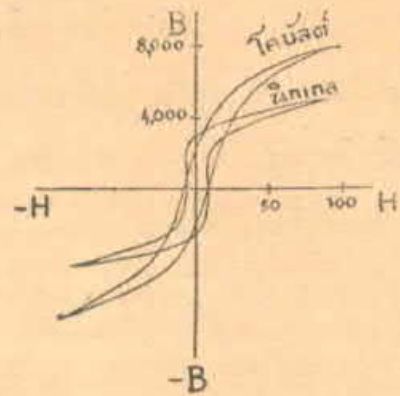
ตอน ef พอเราถลันกระแด้ว นั้นคือถลันด้นาม และค่อยเพิ่มขึ้น ค่าของ I ก็จะลดเรื่อยไปจนถึงจุด f ณจุด f นี้ ความเข้มของการเป็นแม่เหล็ก I กลายเป็น ศูนย์ และในการทำลายอำนาจแม่เหล็กนั้นต้องใช้ด้นาม  $H = Of$

ตอน fa ถ้าเราเพิ่มด้นามต่อไป ความเข้ม ก็จะเพิ่มขึ้น แต่เพิ่มขึ้นเร็วมาก เปรียบกับตอนแรก  $O_a$

ในการเพิ่มและลดกระแด้วหรือความเข้มของด้นาม H เช่นนี้ เราจะได้เคอร์ฟ เป็นวงคือ abcdef เคอร์ฟนี้เราเรียกชื่อวงจรดีเคอร์ฟ ซึ่งแสดงว่าการลดหรือเพิ่ม ของ I ถ้าหัดการลดหรือเพิ่มของ H (ซึ่งการลดเป็นค่าลบ ซึ่งมีความหมายว่า ถาลัง)



รูปที่ 53



รูปที่ 54

วัสดุตัวนำแม่เหล็กต่าง ๆ มีลักษณะไม่เหมือนกัน ดังจะเห็นจาก  $B-H$  เคอร์ฟข้างบน จากเคอร์ฟเหล่านี้ เราสามารถศึกษาสมบัติแม่เหล็กของตัวนำนั้นได้อย่างดี เป็นต้นว่า เมื่อเราลดความเข้มของสนาม ลงเป็นศูนย์ เหล็กธรรมดาจะยังเป็นแม่เหล็กมากกว่าเหล็กกล้า แต่เหล็กธรรมดาจะหมดอำนาจได้เร็วและง่ายกว่าเหล็กกล้า เพราะมีแรงยึดระหว่างอนุพันธ์น้อยกว่าเหล็กกล้า

ข้อควรทราบด้วยว่า ในการทำการทดลองของวงจรรอบวงวัสดุตัวนำนั้น เราต้องทำงาน งานที่ต้องทำในการทำการทดลองกับหนึ่งลูกบาศก์เซนติเมตรนั้นจะเท่ากับพื้นที่อยู่ในเคอร์ฟ  $I-H$  นั้น ฉะนั้นจากเคอร์ฟข้างบนเราจะเห็นว่า เราต้องทำงาน ในการทำการทดลอง กับเหล็กกล้ามากกว่ากับเหล็กอ่อน ดังนั้นในการ ทำเครื่องมีขั้ว เกี่ยวข้องกับแม่เหล็กไฟฟ้า นายช่างต้องคำนึงถึงสมบัติเหล่านี้ของตัวนำที่จะใช้ด้วย

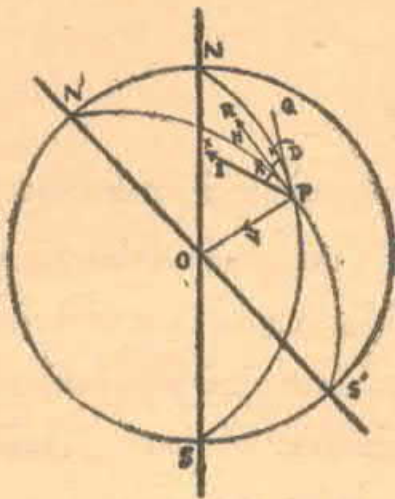
## บทที่ 5

แม่เหล็กโลก

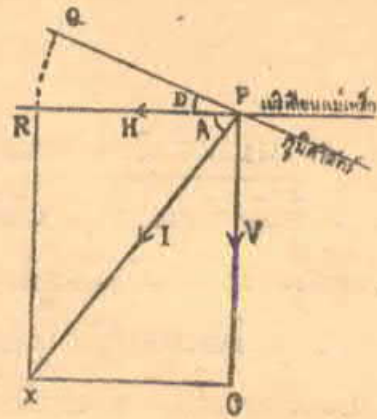
1. แม่เหล็กโลก ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่า เมื่อเราเริ่มที่ขั้วแคว้นด้วยเข็มค้าย  
เด็ก ๆ เริ่มที่ขั้วจะเบนไปจากเมริเดียนภูมิศาสตร์ (เส้นที่ลากผ่านขั้วโลกเหนือขั้วโลก  
ใต้) และมุมระหว่างเมริเดียนภูมิศาสตร์ และเมริเดียนแม่เหล็ก (แนวที่เข็มที่ชี้ไป)  
เราเรียกว่า มุมบ้ายเบน หรือ มุมแปร และถ้าเราเอาเข็มที่ขั้วแคว้นที่จุดที่ตั้งถาวรให้  
หมุนรอบแกนแคว้นเอง และเมื่อชี้ไปตามแนวเมริเดียนแม่เหล็กโลก เข็มที่ชี้จะทำ  
มุมกับแนวระดับ และมุมที่เราเรียกว่า มุมเอียง หรือ มุมเท ซึ่งเหล่านี้แสดงให้เห็นว่า  
เห็นได้ว่าขั้วโลกแม่เหล็กและภูมิศาสตร์ไม่อยู่ต่อกัน ปรากฏว่าขั้วเหนือของแม่เหล็ก  
โลกอยู่ใกล้แหลมบูเรียเฟดิกซ์ในประเทศแคนาดา ที่จุด 70 องศา 25 ติปดาเหนือกับ  
96 องศา 45 ติปดาตะวันตก ส่วนขั้วใต้อยู่ที่ 72 องศา 25 ติปดาใต้และ 154 องศา  
ตะวันออก เนื่องด้วยเหตุนี้ประการหนึ่ง มุมบ้ายเบนและมุมเทจึงไม่เท่ากันทุกแห่งบนผิว  
โลก และนอกจากนี้มุมบ้ายเบนและมุมเทจะมากหรือน้อย ณ ตำแหน่งใด ก็ขึ้นอยู่กับ  
ว่าแม่เหล็กโลกอยู่ใกล้กับตำแหน่งนั้นมากน้อยเท่าใด เพราะฉะนั้นในการทำการทดลอง  
จึงจำเป็นต้องอย่างที่จะต้องเลือกสถานที่ ๆ ปรากฏการณ์แม่เหล็กอยู่ใกล้

ข้อที่นักเรียนควรสังเกตอย่างหนึ่งก็คือ ขั้วเหนือแม่เหล็กโลกคือขั้วใต้ของ  
แท่งแม่เหล็ก และขั้วใต้ของแม่เหล็กโลกคือขั้วเหนือของแท่งแม่เหล็ก ฉะนั้นขั้วเหนือ  
ของแม่เหล็กจึงชี้ไปทิศเหนือ และขั้วใต้จึงชี้ไปทางทิศใต้

การที่แม่เหล็กไม่ชี้ในแนวระดับเสมอไป แสดงให้เห็นว่า สนามรวมของ  
แม่เหล็กโลก I (Total Field) ทำมุมกับผิวโลก และฉะนั้นเราอาจจะแยกสนามรวม  
ออกเป็น 2 สนาม คือตามแนวนอน H (Horizontal Field ซึ่งเราต้องเก็บจะต้องอยู่  
เสมอในการทดลอง) และสนามตามแนวนอน V (Vertical Field)



รูปที่ 55



รูปที่ 56

จากภาพข้างบนนี้ เราจะเห็นความหมายของมุมบ้ายเบน D, และมุมเท A, ส่วนแนวตามแนวนอน H และตามแนวยืน V ได้ชัดเจน

สมมุติ- O เป็นจุดศูนย์กลางของโลก N และ S เป็นขั้วโลกเหนือและขั้วโลกใต้ภูมิศาสตร์ N' และ S' เป็นขั้วโลกเหนือและขั้วโลกใต้แม่เหล็ก และสมมุติแม่เหล็กขั้วไปตามเส้น PX เมื่อเวลาเราเดินให้เข็มได้บนแกนแนวนอน และเดิน PR ซึ่งมีผลตั้งฉากกับซึ่งผ่านจุด P และขั้วโลกเหนือและใต้ของแม่เหล็ก ดังนั้น PO, PX และ PR ก็อยู่บนที่ราบในแนวยืนอันเดียวกัน

และสมมุติ PQ เป็นเส้นตั้งฉากกับซึ่งผ่านขั้วโลกเหนือและขั้วโลกใต้ภูมิศาสตร์ เราจะได้อ

มุมเบน D = มุม QPR (QP อยู่ในเมรีเดียนภูมิศาสตร์ และ PR เมรีเดียนแม่เหล็ก)

มุมเท A = มุม RPX (มุมระหว่าง ส่วนตามแนวนอน H และส่วนตาม I )

จากรูป ข. เราได้ส่วนเกี่ยวข้องระหว่าง  $H$ ,  $V$  และ  $I$  โดยรูปสี่เหลี่ยมคางหมู  
ขนาด มีด้าน  $H$  และ  $V$  ตั้งฉากกัน และมุมระหว่าง  $H$  และ  $I$  คือมุม  $A$

$$\therefore H = I \cos A$$

$$V = I \sin A$$

$$H = V \tan A$$

$$\text{หรือ } I = \sqrt{H^2 + V^2}$$

ในการที่จะบอกสนามแม่เหล็กโลกที่ใดที่หนึ่งได้ อย่างแน่นอน เราต้องรู้  
อย่างน้อย 3 อย่าง (ซึ่งเขาเรียกว่า Magnetic Elements) คือมุมเบน  $D$  มุม  $A$   
และความเข้ม  $H$  เมื่อเรารู้ค่าของสิ่งทั้ง 3 นี้แล้ว เราก็จะรู้ว่าสนามแม่เหล็กจะไปทางไหน  
มีความเข้มตามแนวไหนเท่าไร และความเข้มรวม  $I$  เท่าไร โดยใช้สูตรข้างบนนี้

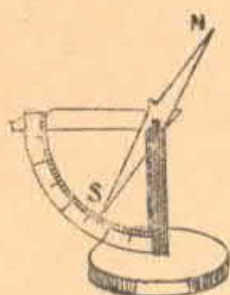
## 2. วิธีหามุมเท, มุมบ่ายเบน และความเข้มของสนาม

### วิธีหามุมเท

เราจะหามุมเทได้ง่าย ๆ โดยเอาเข็มทิศเล็ก ๆ มาแขวนให้หมุน ตามแนวขั้ว  
และหมุนแม่เหล็กไปจนกระทั่ง มันชี้ไปตาม แนวเมริเดียน และ วัด ดูว่า แม่เหล็กเอียงไป  
จากแนวนอนเท่าไร

เครื่องมืออย่างๆ (รูปที่ 57) ประกอบด้วยมาตราส่วนของค่าอัน 2 อัน อันหนึ่งวางรูป  
อยู่ฐานและอีกอันหนึ่งอยู่ในแนวขั้ว ที่จุดศูนย์กลางอันที่ 2 คือจุดกึ่งกลางของเข็ม  
ทิศ ซึ่งอยู่บนหลักที่ผ่านจุดศูนย์กลางของมาตราส่วนของอันแรก และหลักนั้นจากหมุนได้รอบตัว

ในการใช้เครื่องมือ ที่แรกเราต้องหมุนหลักนั้นไปจนเข็มทิศชี้ตรงลงไปตัวเลข 90  
องศา เหนือเข็มทิศจะอยู่ในอำนาจสนามตามแนวขั้วเท่านั้น เมื่อเราหมุนหลักไป  
ซ้ำๆ เข็มทิศจะเหวี่ยงตามแนวขั้ว มาก ขึ้น ทุกที เพราะ อำนาจ สนาม ตามแนวขั้วตาม



รูปที่ 57

เพิ่มขึ้น เมื่อเรา หมุนไปได้ 90 องศา ขั้วนาฬิก  
ของ ส่วนตาม แนว นอน ก็ จะ มาก ที่ สุด ส่วน  
ขั้วนาฬิกตามแนวอื่นยัง คง ที่ ย่อย และ มาก ที่ สุด (นักเรียน  
ควร สังเกต ว่า เวลา เรา แขนง แท่ง แม่เหล็ก ด้วย เส้น  
ใหม่ แท่ง แม่เหล็ก อยู่ใน ขั้วนาฬิก ส่วนตาม แนว นอน  
เท่านั้น) เวลา เหม็ทก็ จะ ชี้ ไป ตาม แนว ของ ส่วน  
รวม เพราะฉะนั้น เรา ก็ ยาจ จะ หา ได้ จาก มาตรา ส่วน  
ที่ นี้นี้ ว่า มุม เท เป็น เท่า ไฉน

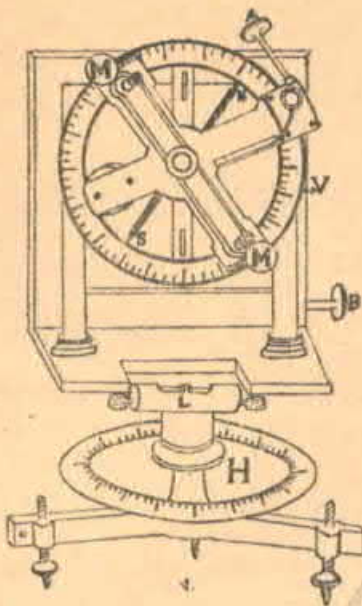
ใน เครื่อง มือ ที่ ชี้ ไป อีก เช่น Kew Dip Circle เหม็ท เครื่อง มือ ที่ ชี้ อยู่  
ด้วย และ เรา ก็ คง ตั้ง เครื่อง มือ ให้ อยู่ ตาม แนว นอน ของ พิน ที่ เชี่ยว ก้อน โดย หมุน ส่วน  
ที่ 3 ที่ ขา ของ เครื่อง มือ จน กระทั่ง พิน ขา ที่ ชี้ อยู่ ที่ กลาง ของ หลอด แก้ว

เพื่อ จะ กำจัด ตั้ง ที่ ทำ ให้ ผิด คลาดเคลื่อน เรา จะ ต้อง ทำ การ ทดลอง ซ้ำ อีก ๗  
หน ดังต่อไปนี้

1. ความ คลาดเคลื่อน นี้ เนื่องจาก ว่า จุด ศูนย์ กลาง ของ แม่เหล็ก และ จุด ที่ เรา แขนง  
อาจ จะ ไม่ เท่า กัน เรา กำจัด ความ คลาดเคลื่อน นี้ โดย ขาน มาตรา ส่วน ที่ ปลาย ที่ 3 ของ เหม็ท ที่  
และ เอา ผล เฉลี่ย

2. เนื่องจาก มาตรา ส่วน ที่ อ่าน 0 องศา ทั้ง สอง ข้าง ไม่ อยู่ใน แนว นอน ถ้า เรา หมุน  
เครื่อง มือ ไป ทาง ขวามือ 90 องศา เรา ก็ จะ ได้ ค่า ของ มุม เท 1 ค่า และ ถ้า เรา หมุน ไป  
ทาง ซ้าย เรา ก็ จะ ได้ อีก ค่า หนึ่ง และ เรา เอา ผล เฉลี่ย ของ ค่า ทั้ง 2 นี้

3. แกน แม่เหล็ก และ แกน เรา คำนวณ ของ เหม็ท ก็ อาจ จะ ไม่ เท่า กัน (เนื่องจาก  
เหม็ท ที่ ไม่ เป็น แม่เหล็ก ชั่ว มี แม่เหล็ก ๗ แห่ง) เรา กำจัด ความ คลาดเคลื่อน นี้ โดย  
ทำ การ ทดลอง 2 ครั้ง คือ ทำ อย่าง ซ้ำ 1, 2 อย่าง ซ้ำ บน แล้ว ถัด กับ หน้า ของ



รูปที่ 58

Kew Dip Circle

และข้างที่เคยเป็นขั้วใต้เป็นขั้วเหนือ

รวมทั้งหมดเราต้องทำการทดลอง 16 ครั้ง และหาผลเฉลี่ยของมุมเหล่านี้

### วิธีวัดมุมเบน



รูปที่ 59

วิธีหาเมรีเดียนแม่เหล็ก เราอาจหาเมรีเดียนแม่เหล็กได้โดยวิธีนี้ โดยเอาเข็ม

ทิศหรือแท่งแม่เหล็กมาแขวน และเส้นที่ลากผ่านจุดที่ปลายทั้งสองแม่เหล็กก็จะอยู่ในแนว  
เมรีเดียนแม่เหล็ก แต่บางทีขั้วของแม่เหล็กอาจจะไม่อยู่ที่ปลายของเข็มทิศ เพราะ  
ฉะนั้นเพื่อบ่งบอกความคลาดเคลื่อนนั้น จึงจำเป็นต้องบอกกับหน้าแม่เหล็ก เอาข้าง

เข็มทิศเดียว และทำการทดลอง 1, 2  
ข้าง

4. เนื่องจากจุดศูนย์ถ่วงและ  
แกนที่แขวนแม่เหล็กไม่ทับกัน น้ำหนัก  
ของเข็มทิศจะทำให้ค่าของมุมเบนมากขึ้น  
หรือน้อยลง แล้วแต่ว่าจุดศูนย์ถ่วง  
อยู่ข้างล่าง หรือข้างบนของแนว  
แขวนแม่เหล็ก เราถ้าจัดความ  
คลาดเคลื่อนนี้ โดยทำการทดลองอย่าง  
ที่อธิบายมาแล้ว 1, 2, 3 แล้วทำเข็มทิศ  
แท่งเดียวกันให้เป็นแม่เหล็กอีกที โดย  
ให้ข้างที่เป็นขั้วเหนือ แยกออกเป็นขั้วใต้

แล้วทำการทดลอง 1, 2, 3 ข้าง

ก่อนที่เราจะวัดมุมเบนได้ เรา  
ต้องรู้แนวเมรีเดียนภูมิศาสตร์ และ  
เมรีเดียนแม่เหล็กเสียก่อน

บนตงข้างล่าง (อย่างเวลาเราหามมเทรซ 3) และถ้าเป็นจริงดังที่กล่าวแล้ว เราก็จะได้เส้นตรงอีกเส้นหนึ่งผ่านจุดทั้งสองที่ปลายของเข็ม และเส้นแบ่งครึ่งมุมระหว่างเส้นทั้งสองที่เรามาได้ข้างบนนี้คือ เส้นเมริเดียนแท้

วิชาเมริเดียนภูมิศาสตร์ ง่าย ๆ ก็คือ เอาหลักตั้ง ๆ มานั่งให้ยืน ในแนวเส้นกลางแดด และคอยดูเงาของหลัก เวลาเงาสั้นที่สุด นั่นคือ เวลาเที่ยง ดวงอาทิตย์จะอยู่ทางทิศใต้หรือเหนือเราพอดี และเส้นที่ลากความเงา ก็จะอยู่ในแนวเมริเดียนภูมิศาสตร์ แม้ว่ามันจะง่าย แต่เวลาจะดูให้แน่นอนว่า เงาอยู่ที่ไหนแน่ก็ยากจะลำบาก เพราะเงาของหลักไม่ชัด

เราอาจหาเมริเดียนภูมิศาสตร์อย่างถูกต้องได้โดยดวงอาทิตย์หรือดวงอาทิตย์และจากรายการบอกทิศทาง ของดาวหรือดวงอาทิตย์ในขณะหนึ่ง ๆ เราก็อาจหาเมริเดียนได้อย่างถูกต้อง

### วิชาความเข้มของสนาม

ความเข้ม ของ สนาม แม่เหล็กโลก ตามแนวนอน อาจ จะหาได้โดยวิธีที่ กล่าวแล้วคือ

ก. ใช้แท่งนิโคมีเตอร์ชนิดที่ เราได้

$$\frac{M}{(d^2 + 1)^{3/2}} = H \tan \alpha \quad (\text{Broadside, on position})$$

ข. แล้วเอาแม่เหล็กแท่งนั้นมาแขวนและทำให้มันเราจะได้

$$\frac{1}{n} = 2\pi \sqrt{\frac{I}{MH}}$$

จากสมการข้างบนเราก็จะหา H ได้ เพราะเรารู้ค่าของอย่างอื่น ๆ ได้โดยการวัดหรือคำนวณ นอกจาก H และ M เท่านั้น เรายังไม่ทราบค่า

เมื่อเราได้ค่าของ H แล้ว เราก็จะได้

$$V = H \tan A \quad A \text{ คือมุมที่ ซึ่งวัดได้ โดยวิธีที่ได้กล่าวมาแล้ว}$$

$$I = H \sec A$$

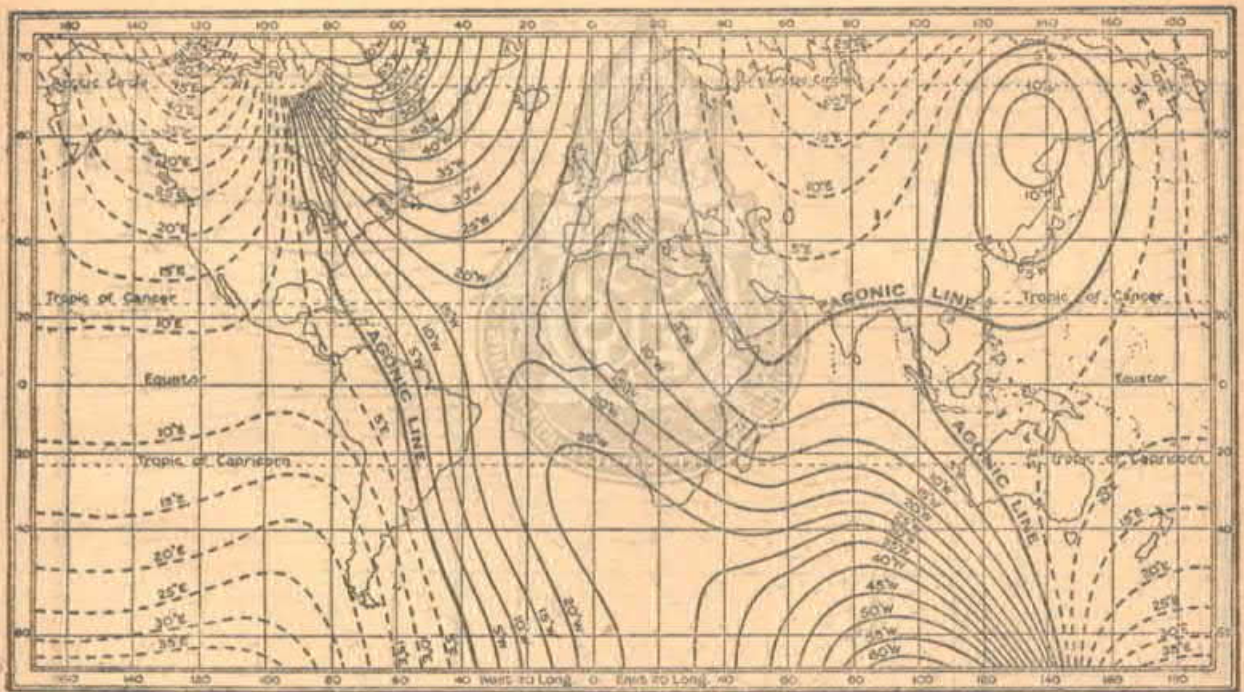
### 8. แผนที่แม่เหล็ก

ในการที่จะแสดงผลของการดึงดูดของสิ่งที่มีขั้วสนามแม่เหล็กโลก ณ ที่ต่าง ๆ บนผิวโลก เขา มักลากเส้น ผ่านจุดต่างๆ ซึ่งมีมุมบ่ายเบนเท่ากัน (Isogonals), มุมเทเท่ากัน (Isoclinals) และเส้นที่ผ่านจุดที่มีความเข้มของสนาม รวมเท่ากัน (Isodynamic lines) หรือเส้นที่ผ่านจุดที่มีความเข้มของสนามตามแนวผิวโลกเท่ากัน (Isodynamic lines of horizontal field)

1. เส้นที่ผ่านจุดต่างๆ ที่มีมุมบ่ายเบนเท่ากัน (ISOGONALS) เส้นเหล่านี้

#### ISOGONALS

#### LINES OF EQUAL DECLINATION

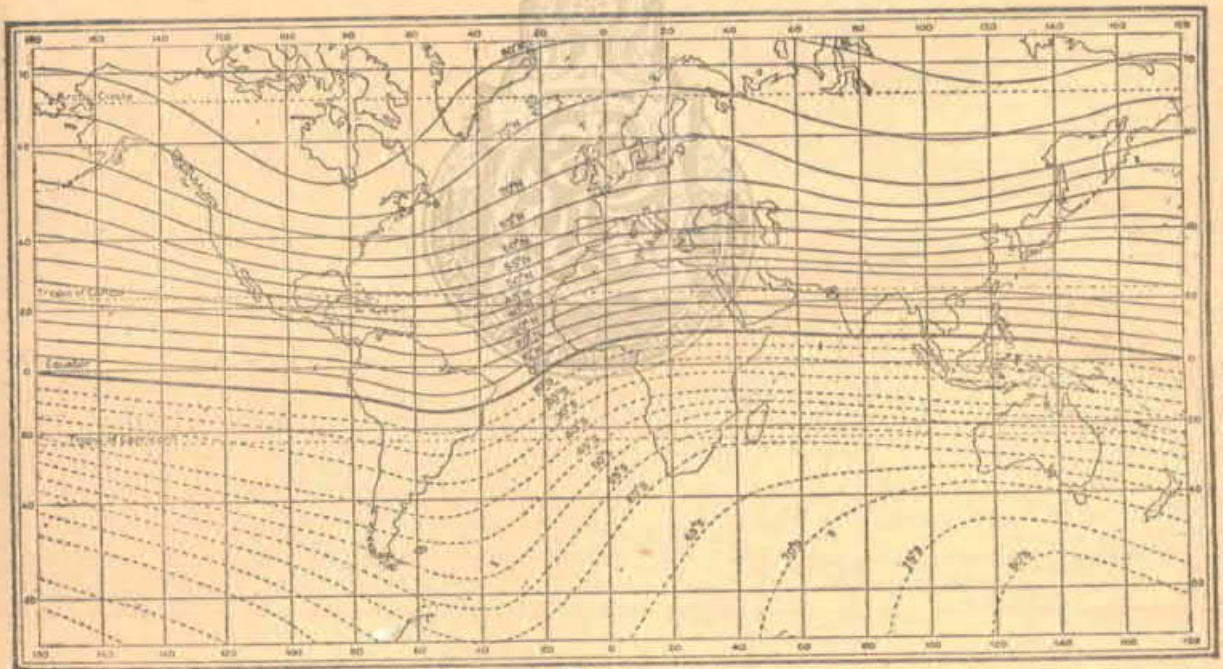


เส้นมุมเบนเท่ากัน

รูปที่ 60

คล้ายคลึงกับเส้นลองจิจูด ในภูมิศาสตร์ คือต่างก็ผ่านขั้วโลก แต่มันไม่เป็นเส้นโค้ง  
เรียบ ๆ มันคดไปคดมา (ดังรูปอยู่ในหน้า 97) เส้นที่ผ่านจุดต่างๆ ที่มันม้วนบ้ายเบนเป็น  
คู่ทวีป เขาให้ชื่อเฉพาะว่าเส้นไม่มีมุมบ้ายเบน (Agonic lines) และเส้นที่สำคัญเหล่านี้  
ผ่านทวีปอเมริกาเหนือและอเมริกาใต้ เส้นที่สองผ่านนครเวสต์มาทางประเทศชเวเบีย  
แล้วโค้งผ่านอินเดียและตอนใต้ของประเทศไทย แล้วผ่านออสเตรเลีย แล้วมีอีกเส้นใน  
ไซบีเรีย เส้นนี้เป็นวงจรรูปไข่ ซึ่งเขาเรียกว่า วงรีไซบีเรีย และมีอีกสองเส้น ๆ หนึ่ง  
เชื่อมระหว่างขั้วโลกเหนือกับขั้วโลกใต้ และอีกเส้นเชื่อมแม่เหล็กโลก บนเส้นนี้ชื่อ  
ของเข็มทิศได้ บนเส้นเชื่อมระหว่างขั้วโลกใต้กับขั้วโลกใต้แม่เหล็ก ขั้วเหนือ  
ของเข็มทิศได้ ฉะนั้นบนเส้นทั้งสองมุมเบนเป็น  $180^\circ$

### ISOCLINALS



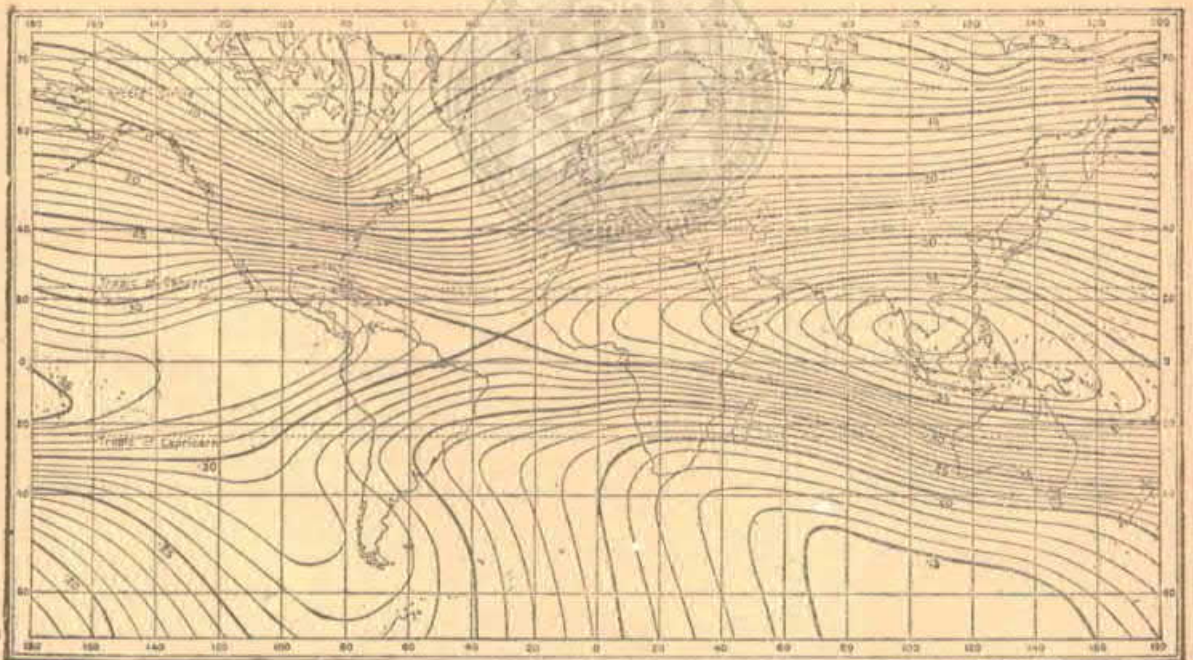
เส้นมุมเทเท่ากัน

รูปที่ 61

2. เส้นที่ลากผ่านจุดต่างๆบนผิวโลกซึ่งมีมุมเท่ากัน (ISOCLINALS) เส้นเหล่านี้คล้ายคลึงกับเส้นตติวิจุด แต่ตัดไปคดมาไม่ขนานกัน เส้นซึ่งผ่านจุดต่างๆ ซึ่งมีมุมเท่ากันเป็นศูนย์ (Aclinic lines) หรืออีเควเตอร์ของแม่เหล็กโลก (Magnetic Equator) เส้นอีเควเตอร์แม่เหล็กโลกนี้ไม่ขนานกับอีเควเตอร์ภูมิศาสตร์แต่อยู่ใกล้ๆ กัน ตอนทวีปอเมริกาอีเควเตอร์แม่เหล็กโลกอยู่ใต้อีเควเตอร์ภูมิศาสตร์ แต่ตอนทวีปแอฟริกาและเอเชียอยู่เหนือ

ทั้งนี้จากเส้นอีเควเตอร์แม่เหล็กโลก ซึ่งมีมุมเป็นศูนย์ และตามเส้นเมริเดียนไปทางเหนือมุมจะเพิ่มขึ้น และช่วงเหนือของเขตกึ่งขั้วจะชันมากขึ้น ๆ จนกระทั่งมุมเท่ากัน 90 องศา ทิศเหนือของแม่เหล็กโลก แต่ถ้าเราไปทางใต้ของอีเควเตอร์มุมเท่ากันจะเพิ่มขึ้น แต่ทว่าทิศของเขตกึ่งขั้วของมุมเท่ากันจะเป็น 90 องศาทิศใต้แม่เหล็กโลก ที่ซึ่งมุมเท่ากัน 90 องศาบริเวณใหญ่ ไม่ใช่เป็นจุดอย่างที่เราเห็นเข้าใจ และนักสำรวจทั่วโลกบันทึกค่าแห่งของอีเควเตอร์แม่เหล็กโลกได้ต่าง ๆ กัน

#### ISODYNAMIC LINES



เส้นสนามตามแนวนอนเท่ากัน

รูปที่ 62

3. เส้นที่ผ่านจุดต่างๆ ซึ่งมีความเข้มของสนามเท่ากัน (ISODYNAMIC LINE) แถบใกล้ๆ ขั้วโลก สนามรวมมีความเข้มมากที่สุด และแถบอีควาเตอร์ สนามอ่อนที่สุด แต่สำหรับสนามตามแนวอน ความเข้มมีมากที่สุดแถบอีควาเตอร์ และน้อยที่สุดแถวขั้วโลก เส้นเหล่านี้มีลักษณะคล้ายคลึงกับเส้นลัทธิและกับพวกเส้นผ่านมุมเท่ากัน แคคตไปดมา ดังปรากฏในรูปข้างบน

## 29. การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กกับเวลา (MAGNETIC VARIATION)

เราได้ทราบแล้ว สนามแม่เหล็กไม่คงที่แต่เท่ากันทุกแห่ง ดังปรากฏบนแผนที่แม่เหล็ก นอกจากนั้นสนามแม่เหล็กก็ยังเปลี่ยนแปลงไปกับเวลาด้วย และการเปลี่ยนแปลงชนิดนี้มีหลายอย่าง เช่น



รูปที่ 63

1. อย่างชนิดรายวัน สนามแม่เหล็กตามแนวผิวโลกของแม่เหล็กจะน้อยที่สุดราวเที่ยงวัน และมากที่สุดราว 20 นาฬิกา ในวันหนึ่งวันทั้งมุมทะเลเพิ่มหรือลดจากค่าปกติไม่เกิน 5' และค่าของความเข้มของสนามในแนวอน เพิ่ม หรือลดไม่เกิน 0.00002 หน่วย

2. ชนิดรายปี เป็นต้นว่ามุมบ่ายเบน มีค่ามากที่สุด (ไปทางตะวันตก) ราวเดือนกุมภาพันธ์ และน้อยที่สุดในเดือนสิงหาคม

### 3. การเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ แต่สม่ำเสมอ (SECULAR CHANGES)

เช่น มุมบ่ายเบนที่ลอนดอน เปลี่ยนไปทั้งสิ้น  $35^{\circ}$  และค่าของมุมเท้นจะกลับไปที่เดิมในเวลา 950 ปี นอกจากนี้มุมเท้นเปลี่ยนไปทั้งสิ้น  $10^{\circ}$  และความเข้มในแวนอนบัตระ 22 แกมมาหน่วย

4. การเปลี่ยนแปลงไม่ปกติ บางเวลาเครื่องมือวัดโน้ตแสดงการเปลี่ยนซึ่งเกิดขึ้นชั่วขณะหนึ่ง ๆ และเหตุการณ์นี้อาจเกิดขึ้นทั่วโลกในเวลาเดียวกัน การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ เราว่าเนื่องจาก พายุแม่เหล็ก (Magnetic storms) ซึ่งเกิดจากภูเขาไฟระเบิด, แผ่นดินไหว หรือจุดในตะวัน (sun spots) ซึ่งเกิดขึ้นราว ๆ 11 ปีต่อ 1 ครั้ง

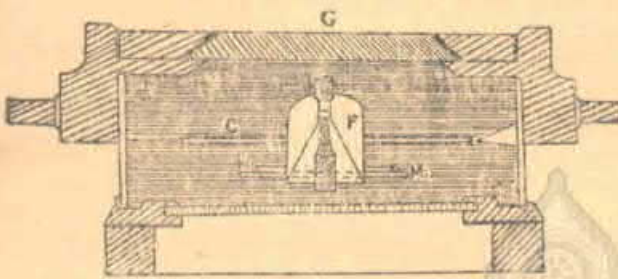
### 4. เข็มทิศการเดินเรือ

เข็มทิศชนิดนี้ แตกต่างกับเข็มทิศธรรมดาที่แค่ส่วนประกอบ เพื่อจะบ่งชี้ความคลาดเคลื่อน เนื่องจากว่าส่วนต่าง ๆ ของเรือเป็นเหล็กและการผันสัของเรือ

เพื่อจะกำจัดความคลาดเคลื่อนอย่างที่สอง เราใช้แม่เหล็ก (บางทีหลาย ๆ แห่งวางขนานกัน) ติดกับโต๊ะปลายแหลม ๆ ซึ่งวางอยู่บนแท่นทิม ข้างบนของโต๊ะนั้นจะมีเข็มแหลม ๆ เบา ๆ ทำด้วยวัสดุแม่เหล็ก และข้างบนมีสเกลเป็นองศาอย่างละเอียดตั้งในภาพข้างล่าง และเขาเอาเข็มทิศนี้ใส่ไว้ในช่องเหล็ก เช่น ขั้วถั่วขั้วจุดไฟ เพื่อจะบ่งชี้ไม่ให้แท่นทิมถกตกแรงและสั่นเร็วเกินไป และเพื่อให้ เข็มทิศนั้นน้อยลงและอยู่นิ่งได้เร็วขึ้น (Large damping effect)

ตัวเรือทำด้วยเหล็กกล้า ฉะนั้นเนื่องด้วยอำนาจการเหนี่ยวนำของแม่เหล็กโลก เรือก็กลายเป็นแม่เหล็กที่คงทน สิ่งอื่น ๆ เช่น เสากระโถง เมื่อเวลาอยู่เหนือน้ำก็เกิดปลายข้างล่างก็จะเป็นขั้วใต้ ปลายข้างบนก็จะเป็นขั้วเหนือ และผลตรงกันข้ามกับเมื่อเวลาอยู่ใต้เส้นเอควีเตอร์ ฉะนั้นเนื่องจากอำนาจสนามในแนวนอน เราจะแก้ความคลาดเคลื่อนเหล่านี้ไม่ลำบากนักเพราะชื่อของมันไม่เปลี่ยน เมื่อเวลาเรือเลี้ยวไปมา เขาเอา

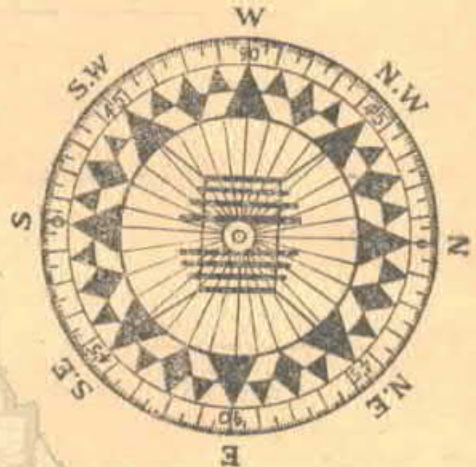
แท่งแม่เหล็กรูปทรงกลมสองอัน ไขว้วางไว้สองข้างของเข็มทิศ จนกระทั่งอำนาจเหล่านี้อยู่  
ไม่แสดงเลย แต่อำนาจแม่เหล็กเนื่องจากเหล็กอ่อนออกจะแก้ลำบากหน่อย เพราะ  
เวลาเรือเปลี่ยนทางเดิน, ขั้วแม่เหล็กของเหล็กอ่อนเหล่านี้อาจจะเปลี่ยนไปด้วย แต่เราอาจ



เข็มทิศเดินเรือแบบเซตวินท์

ลอบบนของเหลว

รูปที่ 64



เข็มทิศแบบเพลวิน

รูปที่ 65

จะแก้ไขได้โดยตั้งเรือเป็นวงกลม และหาจุดที่ความคลาดเคลื่อนเมื่อเวลาเราหันลำเรือ  
ไปทิศต่าง ๆ มีเท่าไร ก็แก้ไขไปที่ละนิด

ในการเดินเรือ เมื่อชยาคจะรู้ตำแหน่งของเรืออย่างแน่นอน ก็ต้องอาศัยการ  
ดูดาวหรือดวงอาทิตย์ แต่การที่จะทำเช่นนั้นต้องเสียเวลามาก จะทำบ่อย ๆ ไม่ได้  
ฉะนั้นเมื่อต้องการผลเร็ว ๆ ก็ต้องดูจากเข็มทิศ และถ้าถนัดเข็มทิศคลาดเคลื่อน นาน ๆ  
ก็ต้องหาเงินถดจืดและเงินของจิจุภูมิคำสัตว์ โดยใช้ เวลาวิธีดูดาวหรือตะวันเฉียง  
แล้วมาเปรียบเทียบกับเข็มทิศ

## โจทย์เบ็ดเตล็ด

1. จงแสดงวิธีต่าง ๆ ของการทำเหล็กขรรจมาให้เป็นแม่เหล็ก และจงแสดงการทดลองเพื่ออธิบายความหมายของคำว่า “การเหนี่ยวนำแม่เหล็ก” (Magnetic induction)
2. เส้นแรงค้ำอะไร ? จงแสดงเส้นแรง ของแม่เหล็กแท่งตรงคู่หนึ่ง ซึ่งมีลักษณะคล้ายกันเมื่อวางแบ่งครึ่งและตั้งฉากซึ่งกันและกัน
3. จงเปรียบเทียบโมเมนต์แม่เหล็ก ของแม่เหล็ก แท่ง ตรง 2 แท่ง ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกัน
4. จงอธิบายวิธีหาเวกเตอร์แม่เหล็กของแท่งหนึ่ง มุมย้ายเบนคืออะไร ?
5. จงอธิบายดิปเซอร์เคิล (Dip circle) และจะใช้เครื่องมืออื่นอย่างไรในการวัด ?
6. ให้นิยามความของค่าต่อไปนี้ มุมเท มุมย้ายเบน ตามตามแนวนอน  
ถ้าแท่งหนึ่งตามตามแนวขึ้นเป็นครึ่งหนึ่งตามแนวนอน จงหาค่าของมุมเท
7. ทฤษฎีโมเมนต์ของแม่เหล็กมีว่าอย่างไร ? ถ้าเรากระดาศแข็งวางบนแท่งแม่เหล็ก เอาผงตะไบโรยแล้วกระ เราจะได้ผงตะไบจัดเป็นระเบียบอย่างหนึ่ง ถ้าเราเอากระดาษขี้ไบอีก ผลจะเป็นอย่างไร
8. แท่งแม่เหล็กยาว 10 เซนติเมตร วางให้จุดกึ่งกลางของมันห่างจากแท่งนี้โดยมีค่า 25 เซนติเมตร เข้มจะเท  $30^\circ$  จงหาโมเมนต์ของ แท่งแม่เหล็ก  
$$H = 0.18, \tan 30^\circ = .5774 \quad (747.5)$$
9. อธิบายว่าทำไมเราจึงใช้เหล็กอ่อนทำแกนของแม่เหล็กไฟฟ้า และใช้เหล็กกล้าทำแม่เหล็กถาวร และอธิบายว่าทำไมเราจึงเอาเหล็กอ่อนวางติดไว้ระหว่างขั้วทั้งสองของแม่เหล็กถาวรเมื่อเวลาไม่ใช้ ?

10. เหมทกชั้นหนึ่งชั้น 50 ครัวเรือนต่อตารางกิโลเมตร มีพื้นที่ 64° และชั้น 48 ครัวเรือนต่อตารางกิโลเมตรชั้นหนึ่งชั้น 71° จงเปรียบเทียบความเข้มของสนามรวม (Total field) ณสองตำแหน่ง  $\cos 64^\circ = .438$   $\cos 71^\circ = .326$  ( $\frac{.837}{1} = \frac{4}{5}$ )

11. ให้คำจำกัดความ “แม่เหล็ก”

แม่เหล็กยาว 10 เซนติเมตร มีโมเมนต์ 200 หน่วย c. g. s. จงหาแรงที่จุดบนแกน ก. จุดอยู่ห่างจากขั้วเหนือ 95 เซนติเมตร ข. จุดกึ่งกลางของแม่เหล็ก (ก. ขั้วเหนืออยู่ใกล้จุด 0.02, ข. 1.6)

12. แม่เหล็ก A และ B มีลักษณะเหมือนกันทุกอย่าง นอกจากว่าแม่เหล็กหนึ่งมีขั้วแม่เหล็กมากกว่าอีกแม่เหล็กหนึ่ง ขั้วหนึ่งของขั้ว A มี 10 ครัวเรือนต่อตารางกิโลเมตร ขั้วของขั้วหนึ่ง A มี 6 ครัวเรือนต่อตารางกิโลเมตร ขั้วของขั้วหนึ่ง B จะสั้นกี่ครัวเรือนต่อตารางกิโลเมตร จงเปรียบเทียบโมเมนต์ของแม่เหล็กทั้งสองแม่เหล็ก จงอธิบายเครื่องมือนี้อาจจะใช้ประกอบในการทดสอบนี้ (3.6, 25:9)

13. ถ้าเราสงสัยว่าแม่เหล็กแม่เหล็กหนึ่งมี “Cosequent poles” จงอธิบายความหมายของคำนี้ และท่านจะทดสอบหาความจริงได้อย่างไร ?

14. การสั้นของแม่เหล็กต้องอาศัยอะไรบ้าง ?

แม่เหล็กแม่เหล็กหนึ่งชั้น 10 และ 14 ครัวเรือนต่อตารางกิโลเมตร ตามลำดับ ณตำแหน่งตำแหน่ง จงเปรียบเทียบสนามแม่เหล็ก ณสองตำแหน่ง (25:49)

15. แม่เหล็กยาว 8 เซนติเมตร วางอยู่ในสนามแม่เหล็กเริ่ม 0.18 และกำลังขั้วของมันเป็น 5 จงหาแรงที่ดึงดูดกับมันให้

(1) ไป 30° จากแนวเมริเดียนแม่เหล็ก (3.6)

(2) ไปตั้งฉากกับแนวเมริเดียนแม่เหล็ก (7.2)

16. เราจะทำลายขั้วแม่เหล็กของแม่เหล็กได้อย่างไร ? และทำอย่างไรเราจึงจะทำให้มันมีอำนาจเท่าเดิมอีกได้ (ก) โดยใช้แม่เหล็กแท่งอื่น (ข) โดยใช้กระแสไฟฟ้า

17. จงอธิบายความหมายของคำ “อำนาจรักษาสัมบัติแม่เหล็ก Retentivity” และ “อำนาจการรับแม่เหล็ก Susceptibility” และชักตัวอย่างเกี่ยวกับเหล็กอ่อน และเหล็กกล้าประกอบคำอธิบาย
18. บอกชื่อและความหมายของเส้นต่าง ๆ บนแผนที่แสดงสภาพแม่เหล็กบนผิวโลก
19. แท่งแม่เหล็กวางขนานกับแนวเมริเดียนแม่เหล็ก ขั้วเหนือชี้ไปทางทิศใต้ จงแสดงเส้นแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กโลกและแท่งแม่เหล็ก เราจะลากเส้นเหล่านี้โดยการทดลองได้อย่างไร
20. ก. แรงของแม่เหล็กโลกสามารถทำให้เข็มทิศหมุน แต่ไม่ทำให้เข็มทิศเคลื่อนที่ได้ นั่นเป็นความจริงหรือไม่ เพราะเหตุใด ?  
 ข. ทำไมด้วยเหล็กที่ลอยอยู่บนน้ำจึงนิ่งอยู่ที่เดิม และไม่ลอยเลื่อนไปทางทิศเหนือ ?
21. จงชักเหตุผลอธิบายว่า ทำไมจึงนับว่า โลกว่าเป็นแม่เหล็กขั้วหนึ่ง ?  
 เส้นแรงของแม่เหล็กเป็นเส้นที่แสดงว่า ทุก ๆ จุดบนเส้นมีความเข้มเท่ากันหรือไม่ ? ทำไมเส้นแรงของแม่เหล็กจึงไม่ตัดกัน ?
22. จงให้นิยามของหน่วยขั้วของแม่เหล็ก ถ้าหักแม่เหล็กท่อนหนึ่งออกเป็น 3 ท่อนเท่า ๆ กัน จงอธิบายว่าท่อนทั้งสาม ที่หักออกนั้นจะมีแรงเท่ากันหรือไม่ แรงที่ปลายของท่อนแม่เหล็กที่ยังไม่ได้หัก กับที่หักออกแล้วจะแตกต่างกันอย่างไร ?
23. จงอธิบายถึงการสร้างเข็มแอสแตติก ถ้าเมื่อสร้างจนแล้ว เข็มชี้ไปทางทิศตะวันตกเสมอ เข็มชิ้นนี้แสดงว่ายังมีอะไรที่ได้สร้างติดอยู่บ้าง เข็มแอสแตติกใช้สำหรับอะไร ?
24. โมเมนต์ขั้วของแม่เหล็กมีความหมายว่าอย่างไร คัดแม่เหล็กท่อนหนึ่ง ออกเป็นสองท่อนเท่า ๆ กัน และวางเส้นออกไปให้ปลายห่างจากกัน 6 เซนติเมตร ถ้า

ท่อนที่ตัดออกมียาวท่อนละ 10 เซนติเมตร และมีโมเมนต์ 80 หน่วย จงหา  
แรงที่แม่เหล็กทั้งสองนี้ผลิตกัน ( $\frac{1}{2}$  แรงผลิตเท่านั้น แรงทั้งหมด = 1.378)

25. แท่งแม่เหล็กยาว 6 เซนติเมตร วางอยู่ในเมรีเดียนแม่เหล็กขั้วเหนือขั้วเหนือ ที่  
จุดทางทิศตะวันออกห่างจากจุดศูนย์กลางของแท่ง 4 เซนติเมตร ไม่มีความเข้ม  
ของสนามแม่เหล็กเลย ขั้วที่แท่งมีค่าเท่าใด? ( $H = .34, 7.1$ )

26. เส้นแรงและเส้นเหนี่ยวนำแม่เหล็กมีความหมายต่างกันอย่างไร เมื่อนำแท่งแม่เหล็ก  
อ่อนมาวางในสนามแม่เหล็ก ทำไมเส้นแรงในสนามแม่เหล็กจึงเปลี่ยนทางไป  
จากเดิม?

27. โมเมนต์ของแม่เหล็กมีความหมายอย่างไร?

แท่งแม่เหล็กทรงกระบอกแท่งหนึ่งแกว่ง 20 ครั้งตามแนวพื้นราบในเวลา 1  
นาที แท่งแม่เหล็กทรงกระบอกอีกแท่งหนึ่ง เดินผ่านศูนย์กลางเท่ากับแท่งแรก  
แต่ยาวและหนักเป็นสองเท่า แกว่งครบ 16 ครั้งใน 1 นาที จงเปรียบเทียบ  
โมเมนต์ (2:9 แม่เหล็กแท่งยาวมากกว่า)

# ไฟฟ้าสถิต

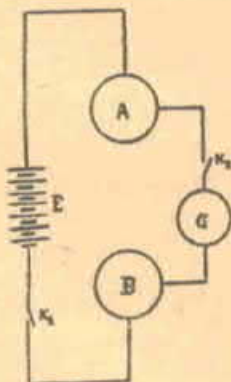
## บทที่ 6

### บทนำ—สมบัติทั่ว ๆ ไป

#### 1. ข้อความเบื้องต้น

จากวรรณคดีของชาวกรีก ครึ่งสมัยพุทธกาล ปรากฏว่าเมื่อเขาเข้าพันธุกับ  
นิธของต้องอย่างนั้นจะมีอำนาจดึงดูดวัตถุเบา ๆ ได้ ชาวชาติอื่นนั้นชาวกรีกให้ชื่อว่า  
Electricity ซึ่งมาจากคำว่า Electron (ภาษากรีก Electron แปลว่า ขี้พัน) ในสมัย  
ก่อนนั้นคนค้นพบอีกว่า ถ้าเสียดสีของสองสิ่งให้ให้มาติดกัน ก็จะได้สมบัติเช่นนี้เกิดขึ้น

เราพูดถึงวัตถุซึ่งมีสมบัติดึงดูดแล้วว่า มันมี ประจุ หรืออยู่ใน สถานะ  
ไฟฟ้า และสิ่งที่ทำให้เกิดสถานะเช่นนี้เราให้ชื่อว่า ไฟฟ้า และวัตถุที่ไม่มีสมบัติดึงดูดแล้ว  
แล้ว เราพูดว่ามันเป็นกลาง หรือ สเทิน



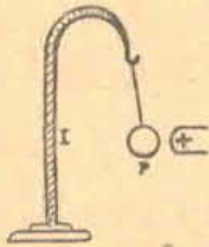
ไฟฟ้าสถิตจากแบตเตอรี่  
รูปที่ 66

เมื่อเราต่อลวดโลหะ A และ B ต่อกันเข้ากับ  
แบตเตอรี่ E และวาง A และ B ไว้ใกล้ ๆ กัน เมื่อ  
ตัดเส้นลวดซึ่งต่อกับ A และ B ออกแล้ว, ลองนำเอา  
เครื่องตรวจกระแสไฟฟ้า (กัลวานอมิเตอร์) G ที่ไว ๆ  
มาต่อเข้ากับ A และ B จะเห็นว่ามีการไหลไฟฟ้า  
ผ่านเครื่องมือหรือแทนที่จะต่อกัลวานอมิเตอร์, นำเอา  
A และ B มาสัมผัสกัน จะเห็นประกายไฟบ้าง นี่  
แสดงให้เห็นว่า ประจุอยู่บน A และ B นี่เป็นวิธี  
หนึ่งที่เขาให้ประจุแก่โลหะ

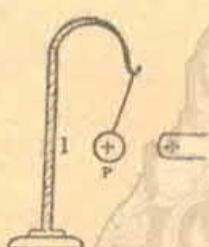
## 2. กิริยาระหว่างประจุสองชนิด

อาจแสดงโดยการทดลอง ให้เห็นได้ว่ามีประจุสองชนิด และมีกิริยาระหว่างประจุโดยใช้เครื่องมือชื่อว่า อิเล็กโตรสโกปอย่างง่าย ประกอบ เครื่องมือนี้ประกอบด้วยได้หญาแห้ง หรือตุกพิค (Pith ball) ขนาดเล็ก ๆ แขนงด้วยเส้นไหม จากแท่งแก้วซึ่งทาเช็ดเล็กน้อยเพื่อกันชื้น บางทีเขาหุ้มชั้นได้หญาด้วยทองใบ

ถ้านำแท่งแก้วซึ่งถูกับแพรเข้ามาใกล้ตุกพิค มันจะดูดตุกพิคเข้ามาใกล้ เมื่อแผ่นทอง ซึ่งเป็นกลางได้รับประจุ จากแท่งแก้วแล้ว มันก็จะหลุดออกไปอย่างแรงโดยอำนาจขจัด และจะไม่เข้ามาหาอีก เราอาจอธิบายได้ว่า เวลาที่ ตุกพิค



ก. ก่อนสัมผัสกัน  
ตุกพิคถูกดูดเข้าไป



ข. เมื่อสัมผัสกันแล้ว  
ตุกพิคผลักหนี

รูปที่ 67

มี ประจุไฟฟ้า อย่างเดียวกัน กับ แท่งแก้ว และตลอดเวลาที่มัน อยู่ในสถานะอนัน มัน ก็ จะ ผลัก กับ แท่งแก้ว ถ้าเขาแท่งอย่างแรง ซึ่งถูกกับชนิดตัวแต่เข้ามาบ้าง มันก็จะติดกับตุกพิค ซึ่งเคย รับ ประจุ จาก แท่ง แก้ว นั้น หรือถ้าเขาวัดต่าง ๆ ซึ่งถูกกับชนิดตัวหรือแพรเข้ามาบ้าง มันก็จะผลักหรือดูดกับตุกพิคนี้ แล้วแต่ชนิดของประจุที่มันมีอยู่

เมื่อทำการทดลองเช่นกล่าวมาแล้วข้างบนนี้หลาย ๆ ครั้ง ก็อาจสรุปรวมความได้ว่า

- (1) ประจุมียอยู่แต่เพียง สองชนิด คือ ชนิดปฏิฐาน (+) และ ชนิดนิเสธ (-) และบางทีเขาเรียกมันง่าย ๆ ว่า บวกและลบ
- (2) ประจุชนิดเดียวกันขจัดกัน และ ประจุต่างชนิดกันดูดดึงดูดกัน นั่น คือ ลบ ผลัก ลบ บวก ผลัก บวก แต่ ลบ ดึง บวก

### 8. การตั้งชื่อชนิดของประจุ

เพื่อความสะดวกและเพื่อเป็นมาตรฐาน จำเป็นต้องรู้แน่นอนว่า ประจุชนิดไหน เป็นบวกเป็นลบ และด้วยเหตุนี้ และเพื่อจะจำให้ได้ง่าย ๆ นักเรียนควรจำหลักต่อไปนี้

ให้ถือว่า ประจุบนแท่งแก้วซึ่งเกิดขึ้นโดยการถูกับแพรเป็นปฏิฐาน (+)

และ ประจุบนแท่งยางแข็งซึ่งเกิดขึ้นโดยการถูกับขนสัตว์เป็นลบ (-)

ในเมื่อต้องการทราบชนิดของประจุชนิดอื่น ๆ ก็ให้เอาไปทดสอบ โดยใช้ วัตถุในหัวข้อสอง และใช้หลักในหัวข้ออื่นเดียวกันประกอบ (ดูหัวข้อหลักประกอบและเพิ่มเติม)

จากการทดลอง อาจรวบรวมประจุชนิดต่าง ๆ ซึ่งมีประจุเกิดขึ้นโดยการถูกัน ดังต่อไปนี้ :-

- |             |                |                       |
|-------------|----------------|-----------------------|
| 1. ขนแมว    | 6. ฝรั่ง       | 11. แก้วผิวขรุขระ     |
| 2. ดักหลอด  | 7. แก้วเกลี้ยง | 12. โลหะชนิดต่าง ๆ    |
| 3. ไม้      | 8. ผ้าดี       | 13. ขำพัน             |
| 4. เซลลูลอส | 9. กระดาษ      | 14. กำมะถัน           |
| 5. ยางไม้   | 10. แพร        | 15. ยางแข็ง (Ebonite) |

ถ้าเอาวัตถุที่มีเลขกำกับน้อย ถูกับอันที่มีเลขกำกับมากกว่า จะได้ ประจุ ปฏิฐาน (+) บนวัตถุที่มีเลขกำกับน้อยกว่า และ ประจุลบ (-) บนอันที่มีตัวเลขกำกับมากกว่า เช่นถ้าเอาขนสัตว์ถูกับแก้วเกลี้ยง จะได้ประจุลบบนแก้ว แต่ถ้าเอา แก้วขึ้นเดี่ยวกั้กับแพร จะได้ประจุบวกบนแก้ว แต่ประจุลบไปปรากฏที่แพร

ข้อสังเกต (1) ของชนิดเดียวกัน ถ้าผิวหรือสภาพหรือสถานะไม่เหมือนกัน ก็อาจจะทำให้เกิดประจุไม่เหมือนกัน เช่นแก้ว

(2) ถ้าคัมสำหรับโลหะชนิดต่าง ๆ มีอยู่ในคอนไฟฟ้ากระแส

- (3) ถ้าใช้โลหะทอง ต้องมีค้ำทำด้วยฉนวน เช่น ยางแข็ง สำหรับจับ ถ้าไม่เช่นนั้น จะไม่ประจุปรากฏบนแท่งโลหะ เมื่อถูเสร็จแล้ว (ฉนวน คือสิ่งที่ไม่ยอมให้ไฟฟ้าไหลผ่าน)
- (4) เมื่อถูวัตถุสอง ชนิด ประจุ จะเกิดขึ้น ทั้งสองชนิดพร้อมกัน ขั้วบนวัตถุอย่างละชนิด อยู่ในหัวข้อต่อไป

#### 4. ทฤษฎีไฟฟ้าสถิต

เมื่อไฟฟ้าเกิดขึ้นบนวัตถุ และอยู่นิ่งไม่เคลื่อนที่จากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง เราถือว่ามันเป็นไฟฟ้าสถิต จากการทดลอง ดังที่ได้อธิบายไว้ข้างๆ และจากการทดลองอื่น ๆ เราได้สร้างทฤษฎีขึ้นสำหรับอธิบาย ธรรมชาติอันนี้ ดังต่อไปนี้

ก. ทฤษฎีของไหลเล็ก ๆ สิมเมอร์และคอปเปอร์สร้างทฤษฎีขึ้น เขาถือว่า มีอนุภาคเบา ๆ สองชนิด ซึ่งตรงกับสถานะปฏิฐานและนิเสธของไฟฟ้า วัตถุที่เป็นสเทินมีละอองไฟฟ้าทั้งสองชนิดเท่ากัน วัตถุใดที่มีละอองไฟฟ้าปฏิฐานมากกว่าก็แสดงสถานะไฟฟ้าปฏิฐาน ที่มีละอองไฟฟ้านิเสธมากกว่าก็แสดงสถานะไฟฟ้านิเสธ และเพื่อจะอธิบาย การจัด และคดโค้งระหว่างประจุ เขาถือว่า ของไหลชนิดเดียวกันขจัดกันและของไหลคนละชนิดดึงดูดกัน และมีของไหลสองชนิดนี้อยู่ครบคู่อย่างในวัตถุที่เป็นกลาง มันก็จะไม่ผลักหรือดึงดูดกับอะไรอีก นอกจากจะเกิดการย้ายเปลี่ยนที่หรือوجدนของของไหลบนวัตถุที่เป็นกลาง การที่ได้ให้ญาติกับแท่งแก้วที่มีประจุ ก็เพราะ ประจุ (ละอองหรือของไหล) บนผิวของได้ให้ญาติเคลื่อนที่ และทำให้ประจุทุก ๆ ส่วนบนได้ให้ญาติไม่เหมือนกัน

ข. ทฤษฎีของไหลเดียว แฟรงกลิน พยายามทำให้ทฤษฎีที่หนึ่งง่ายขึ้น จึงสร้างทฤษฎี แฟรงกลินถือว่า มีละอองไฟฟ้าชนิดเดียว และตามปรกตินั้นก็อบบนวัตถุที่เป็นกลางหรือสเทิน จะมีจำนวน ของไหลชนิดนี้ อยู่ครบ ตามจำนวนที่ควรจะมี ถ้าหากว่า วัตถุสิ่งใดไม่มีของไหลนี้ครบตามจำนวนปรกติ ก็ี่จะแสดง

สถานะไฟฟ้าในสสาร ถ้ามีของไหลชนิดหนึ่งเกิดขึ้นก็จะแสดงสถานะไฟฟ้าปฏิฐาน และสมมุติต่อไปอีกว่า พวกละอองไฟฟ้าหลักพวกมันเอง และจะคิดสารรวมดา หรือวัตถุที่ขาดละอองไฟฟ้า ดังนั้นสารรวมดาจึงไม่ติดกันเพราะต่างก็มีละอองไฟฟ้า และอำนาจของมันจึงถูกทำลายไปโดยเนือซาคัพคิต

ตามทฤษฎีนี้ มีละอองหรือของไหลไฟฟ้าชนิดเดียว แต่มีสถานะไฟฟ้าสองอย่าง ส่วนในทฤษฎีแรก มีของไหลสองชนิดและสถานะสองอย่าง

ก. ทฤษฎีอเล็กตรอนปัจจุบัน ตามที่ได้อธิบายมาแล้วในวิชาแม่เหล็ก และมีหลักฐานยืนยันพอที่จะเชื่อถือได้ว่ามีละอองไฟฟ้าเล็กๆ อยู่จริง และ ละอองนี้มีมวล แต่เพียงราว  $\frac{1}{1836}$  ของมวลสารของอะตอมของไฮโดรเจน ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $1.65 \times 10^{-24}$  กรัม



อะตอมไฮโดรเจน



อะตอมขนาดเล็ก

รูปที่ 68

ละอองชนิดนี้มีประจุไฟฟ้าในสสาร (-) ประจำตัว และเขาเรียกมันว่าอเล็กตรอน บางทีเขาก็นำว่ามวลสาร ของอเล็กตรอนนี้แตกต่างจากประจุนี้เอง ตัวอเล็กตรอนทั้งหมดรอบนิวเคลียส ซึ่งมี

ประจุปฏิฐาน (+) เวลาวัดดูเป็นกลางในสสารนั้นมีจำนวนอเล็กตรอน ซึ่งมีประจุลบพอที่จะทำลายอำนาจของประจุบวก ที่นิวเคลียส - เมื่อจำนวนไฟฟ้าลบของอเล็กตรอนนี้ยิ่งกว่าจำนวนไฟฟ้าบวกที่นิวเคลียส วัตถุก็จะอยู่ในสถานะไฟฟ้าลบ แต่ถ้าวัดได้มีประจุลบมากกว่า มันก็จะอยู่ในสถานะไฟฟ้าลบ ตามทฤษฎีของอเล็กตรอนเท่านั้นทฤษฎีจะเคลื่อนที่โดยตัวนิวเคลียสนั้นมีมวลสาร มากไม่สามารถจะเคลื่อนที่จากวัตถุหนึ่งไปยังอีกวัตถุหนึ่งได้ง่าย

ทฤษฎีนี้คล้ายกับทฤษฎี ก. ในทำนองที่ว่า มันกล่าวว่ามีไฟฟ้าสองชนิด บวกและลบ และเหมือนกับทฤษฎี ข. ที่ว่ามีไฟฟ้าชนิดเดียวเท่านั้นเคลื่อนที่ไปมาได้ ในทฤษฎีนี้บอกว่าการเคลื่อนที่ของอเล็กตรอนที่มีประจุลบเคลื่อนที่ ส่วนในทฤษฎี ข. กล่าวว่าการเคลื่อนที่ของไฟฟ้าบวกเคลื่อนที่ก็ได้

ตัวอย่าง วิธีใช้ทฤษฎีเหล่านี้อธิบายธรรมชาติง่าย ๆ เช่น เมื่อเขาแทงแก้ว  
กับเพชร และทำไมจึงมีประจุบวกบนแท่งแก้ว

| ตามทฤษฎีของโทยด์                                                                                                                                                       | ตามทฤษฎีของโทยด์เดียว                                                                                                            | ตามทฤษฎีปัจจุบัน                                                                                                                                             |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| เมื่อถลกหนังโทยด์ออก<br>ไปยืดยาวมากจน ๆ และ<br>เมื่อถลกหนังแล้ว แก้วจะมีช่อง<br>โทยด์ชนิดหนึ่งเกิดขึ้นและมากกว่า<br>ของโทยด์ชนิดหนึ่ง ดังนั้น<br>มันจึงมีสถานะไฟฟ้าบวก | เมื่อถลกหนังโทยด์ ออก<br>จากเพชรไปยังแก้วมากขึ้น ๆ<br>ฉะนั้นเราจึง ได้ แก้ว อยู่ใน<br>สถานะไฟฟ้าบวก เพราะมี<br>ของโทยด์เกินจำนวน | เมื่อ ถลก อีเล็กตรอน<br>ออก จาก แก้ว ไปยัง เพชร<br>ฉะนั้นเมื่อหยุด แก้วจะขาด<br>อีเล็กตรอน จำนวนไฟฟ้า<br>บวกจะเกิน ด้วยเหตุนี้แก้วจึง<br>อยู่ในสถานะไฟฟ้าบวก |

### 5. ตัวนำและฉนวน

ตามการทดลองปรากฏว่า เมื่อเขาแทงโลหะกำไว้ในมือแล้วกับขนสัตว์ จะ  
ไม่ได้ประจุไฟฟ้าบนแท่งโลหะเลย แต่เมื่อใช้วัตถุอย่างอื่นเช่น แท่งยางแข็งหรือกำมะถัน  
ถลกหนัง ก็จะได้ประจุบนแท่งยางและกำมะถัน ทั้งการใช้โลหะที่มีตัวนำด้วยยางแข็ง,  
แก้วหรือกำมะถัน แล้วเขามันถูอย่างคร่าวๆ ก็จะได้ประจุเหลืออยู่บนแท่งโลหะ  
ถ้าจะยังไม่ให้มือแตะโลหะเลย นี่แสดงให้เห็นว่าวัตถุเหล่านี้มีสมบัติต่างกัน พวกโลหะ  
ปล่อยให้ประจุวิ่งผ่านมือหนีไปได้ ส่วนอีกพวกหนึ่งไม่ยอมให้ประจุวิ่งผ่านหนีไปมันจึง  
เหลืออยู่ ดังนั้นเราจึงจำแนกจำพวกสารออกเป็นสองพวก คือ ตัวนำ ไฟฟ้า และ  
ฉนวน โลหะและสิ่งอื่น ๆ ที่ยอมให้ประจุวิ่งผ่านไปได้ อยู่ในจำพวกตัวนำ พวก  
ที่ไม่ยอมให้ประจุวิ่งผ่านหรือผ่านได้เรียกว่า ฉนวน ฉะนั้น แก้ว, กำมะถัน และ  
ยางแข็งเป็นฉนวน ร่างกายเราก็คือตัวนำ เหตุฉนั้น เมื่อจับตัวนำที่มีประจุ ๆ  
จึงวิ่งผ่านร่างกายเราลงไปยังดินหมด หรือไม้กั้วอีเล็กตรอนก็จะวิ่งลงจากดินมาทั่วด้วย  
อำนาจของประจุบวกบนก้อนโลหะหมด

สมบัติในการนำประจุไฟฟ้าของสสารเปลี่ยนแปลงไปกับอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิเพิ่ม ตัวนำจะนำไฟฟ้าได้สะดวก แต่ฉนวนจะนำไฟฟ้าได้ด้อย นั่นคือตัวนำจะค่อยๆ กลายเป็นฉนวน ส่วนฉนวนจะค่อยๆ กลายเป็นตัวนำ เมื่ออุณหภูมิลด ผลก็จะตรงกันข้าม

ในชั้นนี้ นักเรียนควรจะได้คิดว่า ไม่มีอะไรที่เป็น ฉนวนจริง ๆ นั่นคือไม่ยอมให้ประจุผ่านเลย ที่บอกว่างดงามถึงเป็นฉนวน ก็เป็นแค่เพียงการเปรียบเทียบเท่านั้น ไฟฟ้าอาจผ่านฉนวนได้ดี เมื่อ แรงดันไฟฟ้า—ศักดา—มีค่าสูงพอ และเมื่อจะวินิจฉัยการเคลื่อนที่หรือการไหลของไฟฟ้า ต้องวัดถึง ศักดาเสมอ (ดูหัวข้อ 8)

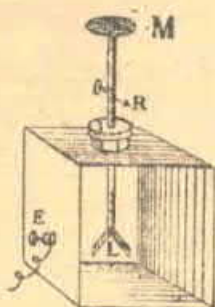
### บัญชีตัวนำและฉนวน

เรียงตามลำดับตัวเลข—จากตัวนำที่ด้อยที่สุดถึงที่เลิศที่สุด

| ตัวนำ                | ครึ่งตัวนำ    | ฉนวน                   |
|----------------------|---------------|------------------------|
| 1 เงิน               | 12 ลิเธียม    | 17 น้ำมัน              |
| 2 ทองแดง             | 13 คัลเซียม   | 18 กระเบื้อง (ถ้วยชาม) |
| 3 ทองคำ              | 14 โมลิบดีนัม | 19 ขนสัตว์             |
| 4 สังกะสี            | 15 กระจก      | 20 ไหม                 |
| 5 ปลาตินัม           | 16 งา         | 21 ทราย                |
| 6 เหล็ก              |               | 22 กำมะถัน             |
| 7 พรอท               |               | 23 ขางแข็ง             |
| 8 แท่งถ่าน (คาร์บอน) |               | 24 เทียนไข             |
| 9 นิกเกิล, นิกเกิล   |               | 25 แก้ว                |
| 10 น้ำ               |               | 26 อากาศ               |
| 11 ร่างกาย           |               |                        |

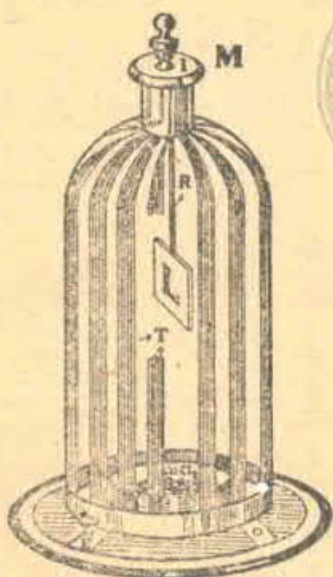
## 6. อิเล็กโทรสโคป

อิเล็กโทรสโคป คือเครื่องมือสำหรับตรวจประจุไฟฟ้า ชนิดง่าย ๆ ที่ได้อธิบายแล้วเรียกว่า อิเล็กโทรสโคปลูกพิค ชนิดที่ใช้ได้ผลจริง ๆ และที่จะใช้ต่อไปนี้เรียกว่า อิเล็กโทรสโคป แผ่นทองหรือทองใบ



อิเล็กโทรสโคปทองใบอย่างง่าย

รูปที่ 69



อิเล็กโทรสโคปแผ่นทองแบบแควร์ตัน

รูปที่ 70

### อิเล็กโทรสโคปทองใบ เครื่องมือ

ประกอบด้วยแผ่นทองใบ L ห้อย และติดอยู่กับแท่งโลหะ R ซึ่งปลายบนติดอยู่กับแผ่นทองจากทองเหลืองกลม ๆ หรือลูกกลม M. แผ่นทองใบมีกรอบแก้วหรือหีบรอบ สำหรับป้องกันกระแสอากาศ ซึ่งระหว่างกรอบและแท่งโลหะมีฉนวน I เช่นยางแข็งกันและยึดแท่งโลหะให้อยู่กับที่ ข้างล่าง กรอบแก้วมีจานรอง ๆ นี้ โดยมากเป็นแผ่นโลหะ ในเครื่องมือที่ดัดแปลงไปอีก เขามีฉากโลหะรอบกรอบแก้ว และมี E สำหรับต่อฉากโลหะเหล่านี้ลงดิน เพื่อรักษาให้กรอบมีศักดาคงตัว (นั่นคือเท่ากับศักดาของดิน ซึ่งเขาดัดว่าเป็นศูนย์เสมอ) และบางทีเขาเอาเกลือ เช่น  $\text{NaCl}$  หรือ  $\text{CaCl}_2$  ใสในจานเล็ก ๆ วางไว้ในกรอบแก้ว สำหรับดูดไอน้ำในกรอบแก้ว ซึ่งอาจจะช่วยให้อากาศนำประจุไฟฟ้าออกไปได้ง่าย

## หน้าที่และประโยชน์บางอย่างของอิเล็กทรอนิกส์ การทดลอง

(1) วิธีให้ประจุแก่อิเล็กทรอนิกส์ เช้าตุกของหลอดที่มีด้ามเป็นฉนวน ถูกกับแผ่นยางดักครู่ แล้วเขาไปแตะแผ่นทองเหลืองของอิเล็กโตรสโกป แผ่นทองใบก็จะกางออก แสดงว่ามันได้รับประจุจากตุกของหลอด อาจอธิบายเหตุที่แผ่นทองใบกางออกอย่างง่าย ๆ ได้ว่า แผ่นทองใบทั้งสองแผ่นได้รับประจุชนิดเดียวกัน มันจึงผลักกันและแผ่นทองจึงกางออก ในการที่ทำเช่นนั้น เราให้ประจุบวกแก่เครื่องมือโดยวิธีสัมผัส ถ้าให้ประจุลบแก่มันโดยวิธีเดียวกัน เราต้องถอดตุกของหลอดโดยรวดเร็ว แล้วนำมันไปสัมผัสจากหลอดของอิเล็กโตรสโกป ในวิธีนี้ให้สังเกตุดำตรึงใช้ โลหะถูกกับฉนวน จึงจะถ่ายประจุได้

(2) ฉนวนกับตัวนำ เมื่อได้ประจุบนแผ่นทองของเครื่องมือแล้ว ถอดเขาแท่งแก้ว, งาม และแท่งโลหะหรือถ่าน ไปแตะจากหลอดอิเล็กโตรสโกปที่ละอัน จะเห็นว่าครั้งแรกแผ่นทองยังคงกางอยู่อย่างเดิม เมื่อใช้งาม แผ่นทอง จะค่อยหุบลงแต่ช้ามาก แต่พอเขาแท่งโลหะหรือถ่านไปแตะบ้าง แผ่นทองจะหุบลงเฉยทีเดียว นี่แสดงให้เห็นว่าไฟฟ้าหนีออกจากเครื่องมือผ่านถึงแผ่นด้วยอัตราเร็วไม่เหมือนกัน แท่งแก้วซึ่งไม่ยอมให้ประจุผ่าน เป็นฉนวน งามซึ่งยอมให้ผ่านบ้าง แต่ช้า เป็นตัวนำ ส่วนโลหะซึ่งยอมให้ผ่านได้ง่าย เป็นตัวนำ หรือ สื่อไฟฟ้า

ฉะนั้น ในการทดลองว่าสิ่งใดจะเป็นฉนวนหรือตัวนำ ก็ให้นำเขาถึงนั้นไปสัมผัสจากหลอดอิเล็กโตรสโกปซึ่งมีประจุอยู่แล้ว เมื่อแผ่นทองยังคงกางเท่าเดิม ก็ถือว่าสิ่งนั้นเป็นฉนวน ถ้าแผ่นทองหุบลง เราก็ถือว่ามันเป็นตัวนำ—ในการทดลอง ควรระวังอย่าให้แท่งวัตถุที่ใช้สั้น เพราะความชื้นช่วยนำไฟฟ้าได้ดี

(3) ทดลองว่าวัตถุสิ่งใดมีประจุอยู่หรือไม่ ที่แรกให้ปล่อยประจุออกจากเครื่องมืออิเล็กโตรสโกปให้หมดโดยเขานิ้วมือสัมผัสกับจาน เมื่อเป็นเช่นนั้นแผ่นทองจะไม่กางเลย แล้วนำเขาวัตถุที่ตั้งสงสัยว่ามีประจุหรือไม่นั้นเข้าไปใกล้ ๆ กับจานของหลอด

ถ้ามีประจุ แผ่นทองจะคายทางออกโดยอำนาจ การเหนี่ยวนำ (กฎข้อต่อไป) ถ้า  
ดังนั้นไม่มีประจุเลย แผ่นทองก็จะคงหยุดอยู่อย่างเดิม ถ้าวัตถุนี้เป็นตัวนำ จะนำ  
เอามันไปแตะจานเดียวกันได้ ถ้าวัตถุนี้มีประจุ แผ่นทองก็จะคายประจุจากมัน เมื่อ  
นำเอาวัตถุนี้ออกไปให้ไกลแล้ว และแผ่นทองก็ยังคงทางอยู่ แต่ในกรณีแรกแผ่น  
ทองจะหุบ

(4) ตรวจชนิดของประจุ นำอิเล็กโตรสโกปมาต่อของอัน ประจุอันที่หนึ่ง  
ด้วยประจุบวก อันที่สองด้วยประจุลบ

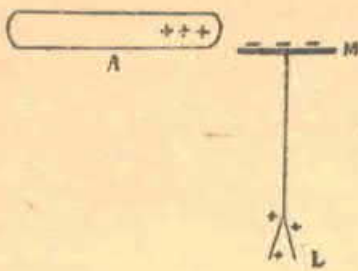
ถ้ามีประจุบวกบนวัตถุ และนำมันเข้าไปใกล้อิเล็กโตรสโกปอันที่หนึ่ง แผ่น  
ทองก็จะกางมากขึ้น ถ้านำมันเข้าไปใกล้อันที่มีประจุลบ แผ่นทองก็จะคายหยุด  
ทันทีสมมติว่า นำเอาประจุลบบนวัตถุเข้าไปใกล้อิเล็กโตรสโกปอันแรกบ้าง  
ทันทีแผ่นทองจะหุบ แต่มันจะทำให้แผ่นทองของอิเล็กโตรสโกปอันที่สองกางออก

จากการทดลองทั้งสองครั้งนี้ จะเห็นว่า ถ้าประจุบนอิเล็กโตรสโกป และ  
วัตถุเหมือนกัน แผ่นทองจะกางมากขึ้น ถ้าประจุไม่เหมือนกัน แผ่นทอง  
จะหุบลง

ฉะนั้น ถ้าอยากรู้ว่าวัตถุ A มีประจุชนิดใด เราก็ให้นำมันไปใกล้ ๆ จานของ  
อิเล็กโตรสโกปที่มีประจุไฟฟ้าบวก ถ้าแผ่นทองกางออก A ก็จะมีประจุบวก ถ้า  
หุบลง A ก็จะมีประจุลบ (ถ้าอิเล็กโตรสโกปมีประจุลบ ผลก็จะตรงกันข้ามกับที่  
ได้ทำการทดลองแสดง)

## 7. การเหนี่ยวนำ

เมื่อเอาประจุเข้าไปใกล้ตัวนำที่เป็นกลาง เช่น อิเล็กโตรสโกป การเคลื่อนที่  
ของไฟฟ้าจะเกิดขึ้นจนแสดงให้เห็นชัด ด้วยการย้ายของแผ่นทอง และการคืบคลานระหว่าง  
ประจุกับวัตถุที่เป็นกลาง ที่บนเช่นนี้ ก็เพราะ เกิดการย้ายเคลื่อนที่หรือวิถีอัน  
(displacement) ของอิเล็กตรอนบนตัวนำ จนถึงส่วนที่ใกล้และไกลของตัวนำที่เป็น  
กลางนั้นมีประจุไม่เหมือนกัน เช่นเมื่อเรานำเอาแท่งแก้ว A ที่มีประจุบวกเข้าไปใกล้

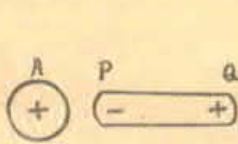


การเหนี่ยวนำบนอิเล็กโตรสโกป  
รูปที่ 71

จานอิเล็กโตรสโกปหรือลูกโด้น อิเล็กตรอนก็จะถูกดูดเข้ามา และข้างที่ไกลออกไปก็จะมีประจุบวกเกิน ดังนั้นแผ่นทองซึ่งมีประจุบวกจึงผลักดันและทางออก และลูกโด้นซึ่งเบาจึงเคลื่อนเข้าไปหาแท่งแก้ว

โดยการทดลองต่อไปนี้ เราอาจแสดงให้เห็นได้ว่า มีการเคลื่อนที่ หรือ วิจลน์ ของอิเล็กตรอนบนตัวนำจริง (Electric Displacement)

การทดลองที่ 1 ให้นำเอาวัตถุ A ซึ่งมีประจุบวกเข้าไปใกล้ตัวนำ PQ แล้ว



การเหนี่ยวนำบนตัวนำ  
เนื่องจากประจุบวก

รูปที่ 72

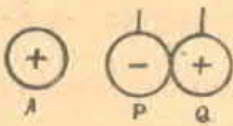
Proof Plane

นำเอาแผ่นโลหะที่มีค่าความเป็นฉนวน (Proof Plane) ไปสัมผัส P แล้วไปทดลอง กับอิเล็กโตรสโกป เราจะเห็นว่าประจุบน P นั้นเคลื่อนที่มาแตะโลหะนั้น เพื่อให้ประจุที่ได้มาจาก P นั้นไปหมด แล้วนำมันไปแตะ Q และทดลองกับอิเล็กโตรสโกปอีกที ก็จะทำให้เห็นว่าประจุบนปรูฟเพลนนั้น นั่นคือ Q มีประจุบวก

ถ้าให้ A มีประจุลบ ผลก็จะตรงกันข้าม

นี่แสดงให้เห็นว่าประจุบวกที่นำเข้าไปคืออิเล็กตรอนเข้ามาใกล้ อิเล็กตรอนจึงเข้ามารวมกันอยู่ที่ปลาย P มาก และปลาย Q จึงมีประจุบวก เพราะพร่องอิเล็กตรอน

การทดลองที่ 2 การทดลองนี้ ทำคล้ายกับการทดลองแรก แต่คัดแปลงเพิ่มเติม คือแทนที่จะใช้ PQ เป็นตัวนำแท่งเดียว ใช้ตัวนำสองอัน คือ P และ Q สัมผัสกัน และสามารถจะแยกออกจากกันได้ง่าย



การเห็นของนำบนตัวนำ P  
และ Q ตั้มีผลกัน

รูปที่ 78

นำประจุบนวัตถุ A เข้ามาใกล้ P และ Q  
ทางด้าน P แล้วแยก P และ Q ออกจากกัน และ  
นำไปทดลองกับขั้วเล็กโครสโกปที่ละอัน จะเห็นว่  
บน Q มีประจุบวก บน P มีประจุลบ

เราเรียกปรากฏการณ์ ดังที่ได้อธิบายมาข้าง  
บนนี้ว่า การเคลื่อนที่หรือการวิจลน์ของประจุ  
โดยการเหนี่ยวนำ นั่นคือประจุที่เราพาเข้าไปใกล้

ตัวนำ เหนี่ยวนำให้ไฟฟ้าเคลื่อนที่ และตัวกลางฉนวนที่อยู่ระหว่างประจุกับตัวนำ เรา  
เรียกว่า ไดอิเล็กทริก ในการทดลองที่กล่าวมาแล้ว ตัวกลางที่ฉนวนกลาง คือ อากาศ

อาจจะอธิบายเหตุผลข้างบนนี้ โดยอาศัยหลักของ ศักดา (ซึ่งได้อธิบายแล้ว  
ในตอนต้นที่กล่าวด้วยแม่เหล็ก และถ้าอยากจะทราบให้ละเอียด ควรอ่านหัวข้อต่อไป  
แล้วจึงกลับมาอ่านข้อความต่อไปนี้) เราอาจเปรียบ ศักดา กับ ระดับสูงต่ำ วัตถุ  
พยายามตกจากที่สูงมายังที่ต่ำ เช่นเดียวกัน ไฟฟ้า (ประจุบวก) จะไหลจากที่ศักดา  
สูงไปยังที่ศักดาต่ำ (แต่ประจุลบนั้นคืออิเล็กตรอน จะไหลจากที่ศักดาต่ำไปยังที่  
ศักดาสูง)

เมื่อเอาประจุมาไว้ที่ใด มันก็จะแผ่รังสีออกไปโดยรอบ รังสีนั้นเราเรียก  
ว่า สนามไฟฟ้า และในเวลาเดียวกัน มันก็จะทำให้เกิด ความดัน ศักดาความดันของภาว  
ความดันไฟฟ้านี้ เพิ่มขึ้นเมื่อเข้าไปใกล้ประจุบวก และลดเมื่อเข้าไปใกล้ประจุลบ  
ดังนั้น เมื่อนำเอาประจุบวกบนวัตถุ A เข้ามาใกล้ PQ ทางด้าน P P ก็จะมีศักดาสูง  
กว่า Q เนื่องจาก PQ เป็นตัวนำ ไม่สามารถต้านทานการไหลของไฟฟ้าได้อย่างฉนวน  
ดังนั้น ไฟฟ้า (ประจุบวก) ก็จะไหลจาก P ไปยัง Q นั่นคืออิเล็กตรอนจะไหลจาก Q  
ไปยัง P ไฟฟ้าจะไหลเรื่อย ๆ ไป จนกระทั่งทุกจุดบน PQ มีศักดาเท่ากัน มันก็  
จะหยุด ดังนั้น เราจึงได้ประจุลบที่ P และประจุบวกที่ Q ปริมาณไฟฟ้าลบที่ P และ

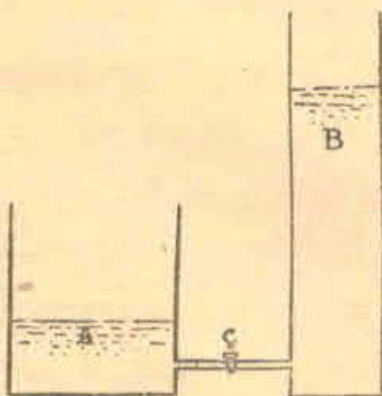
ปริมาณไฟฟ้าบวกที่  $Q$  นี้ เท่ากัน และ  $PQ$  จะกลับไปสู่สถานะเดิม คือ สติณ เมื่อ เรานำเอา  $A$  ออกไปไกล การที่เป็นเช่นนั้น ก็เพราะประจุหนีจากตัวนำผ่านอากาศ ออกไปไม่สะดวก

## 8. ศักดาไฟฟ้า

เนื่องจากไฟฟ้าเป็นสิ่งที่เราไม่เคยชิน และมองเห็นได้โดยตรง จึงเป็นการลำบากในการที่จะรู้ความหมายเกี่ยวกับศักดาได้โดยตรง เหมือนกับสิ่งที่เราเห็นได้ด้วยตา เช่น น้ำ, ปรอทหรือของเหลวอื่น ๆ ในคันแรกนี้ ควรนึกถึงภาพว่าไฟฟ้ามักตัวคนและมีระดับอย่างน้ำในถัง ศักดาเป็นคำที่ใช้สำหรับไฟฟ้า ซึ่งตรงกับ คำธรรมดาว่า ระดับใน ถังน้ำ, อุณหภูมิ ในวิชาความร้อน ความดันในก๊าซหรือของเหลว ซึ่งหมายถึงระดับ แห่งความดัน การไหลหรือคั้นของโมเลกุล

ความร้อน พยายามไหลจากที่มีอุณหภูมิสูงไปยังที่มีอุณหภูมิต่ำ ปริมาณ ความร้อนสองแห่งนั้นไม่เป็นเครื่องบอกความมันจะไหลจากไหนไปไหนโดยตรง

ก๊าซ ในที่ซึ่งมีความดันมาก พยายามวิ่งเข้าไปยังก๊าซที่มีความดันน้อย เช่น อากาศที่ในยางรถหรือลูกหนังซึ่งสูบให้ตึง มีความดันมากกว่า อากาศ ภายนอก และ เมื่อเบ็ดให้มันไหล มันก็จะวิ่งออกมาปะปนกับอากาศ ภายนอก ซึ่งมีปริมาณมากกว่า มันหลายล้านเท่า

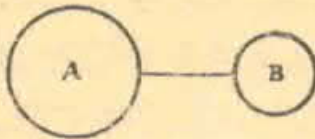


รูปที่ 74

การตกของวัตถุและของเหลวก็เช่น เดียวกัน เวลาปล่อยก้อนหินจากมือมันก็จะ ตกลงไปที่พื้นโลกเสมอ

ถ้าเอาระบอบอกน้ำ  $A$  และ  $B$  ซึ่งมีทอ ค์ถึงกัน และมีก๊อก  $C$  สำหรับเปิดให้น้ำ ไหลผ่านไปได้  $B$  มีขนาดเล็ก แต่สูงกว่า  $A$  ให้น้ำให้เต็มทั้งสองขึ้น ระดับน้ำใน  $B$  จะสูง กว่าใน  $A$  ดังนั้นเมื่อเปิดก๊อก  $C$  น้ำก็จะไหล

จาก B ไปยัง A ถึงแม่น้ำใน A จะมากกว่าน้ำใน B ทั้งสองหรือสามเท่า น้ำจะไหล  
เรื่อย ๆ ไปจนกระทั่งระดับน้ำใน A และ B เท่ากัน



ตัวนำ A และ B  
B มีศักย์สูงกว่า A

รูปที่ 75

โดยการเปรียบเทียบกับ การไหลของความร้อน การนำ และการตกของวัตถุ  
จะเห็นว่า ไฟฟ้าจะไหลไปยังที่ศักย์ต่ำกว่า  
เสมอ เช่นถ้าเราตัวนำ A และ B ต่อกัน  
เข้าด้วยลวด และถ้า B มีประจุน้อยกว่า A,  
ขนาดเล็กกว่า A แต่ศักย์สูงกว่า A กระแส  
ไฟฟ้า (ประจุบวก) ก็จะไหลจาก B ไปยัง  
A ปริมาณไฟฟ้า ที่ A หรือ B จะไม่เป็น  
เครื่องทำให้กระแสไหลโดยตรง

เนื่องจากความคล้ายคลึง ระหว่าง ธรรมชาติเหล่านี้ บางทีเราเรียก “ศักย์” ว่า

“ความดันไฟฟ้า” หรือ “ความแรงดันไฟฟ้า”

ให้นักเรียนดูเพิ่มเติมอีกในบทต่อไป

## 9. ศักย์ของดิน

ในการวัดอุณหภูมิ ถ้าเราจุดแรงและจุดเดียวของน้ำเป็นหลัก เช่นให้จุด  
แรงเป็นจุดศูนย์ของเทอร์โมมิเตอร์ชนิดเซนติเกรด เช่นเดียวกัน ในการวัดศักย์  
ต้องมีหลัก เขาก็เอา ศักย์ของดินเป็นหลัก และให้มีค่าเป็นศูนย์ ศักย์ที่สูง  
กว่านี้ เขาก็ถือว่าเป็นบวก ต่ำกว่านี้เขาก็คือว่าเป็นลบ ในการที่ถือเอาหลักนี้ ก็  
เพราะแผ่นดินเราใหญ่โตเป็นตัวนำ และศักย์ของมันก็จะคงที่เสมอ แม้จะให้ประจุแก่  
มันสักเท่าใดก็ได้ หรือจะเอาประจุออกจากมันสักเท่าใดก็ได้ ศักย์ของมันจะไม่เพิ่ม  
ขึ้นหรือลดลง เปรียบดังกับเมื่อตักน้ำจากหรือเทน้ำลงจากถังน้ำในถังใด ๆ หนึ่ง  
น้ำในถังนั้นก็ยังไม่ปรากฏว่าค่าหรือสูงขึ้นเลย ด้วยเหตุนี้ ตัวนำที่ติดต่อกับดินโดยตลอด  
ก็จะมีศักย์เท่ากับดินและเป็นศูนย์เสมอ

เราจะไรท์ถักขึ้นสำหรับอธิบาย การประจุไฟฟ้าโดยการเหนี่ยวนำได้ ดังต่อไปนี้

### 10. การประจุไฟฟ้าบนตัวนำโดยการเหนี่ยวนำ

ได้ทราบมาแล้วว่า โดยการขัดสี เราสามารถทำให้เกิดประจุบนวัตถุสองชนิดที่ไรท์ได้ ถ้าต้องการแบ่งเอาประจุจากตัวนำไปไว้บนตัวนำอีกชนิด ก็อาจทำได้โดยเอาตัวนำทั้งสองนั้นสัมผัสกัน แต่จะย้ายประจุจากฉนวนโดยวิธีสัมผัสไม่ได้ มีอีกวิธีหนึ่ง ชื่อว่าวิธีเหนี่ยวนำ ดังจะอธิบายต่อไปนี้

สมมุติว่า มีประจุบวกบนแท่งแก้ว เมื่อนำมันเข้าไปใกล้ วัตถุโลหะโกปของใบแผ่นทองก็จะกางออก แต่หุบลงอย่างเดิมเมื่อนำแท่งแก้วออกไป ทันทีเอาแท่งแก้วนั้นเข้าไปอีก และคอยสังเกตให้ดี จะเห็นว่า แผ่นทองจะค้อยกางมากขึ้น ๆ จนแท่งแก้วสัมผัสกับจานทองเหลือง แล้วนำเอาแท่งแก้วออกไปอีก แผ่นทองก็จะหุบลงดังเดิมอีก นำเอาแท่งแก้วเข้าไปอีกครั้ง แล้วเอามือแตะที่จาน แผ่นทองจะหุบลงเมื่อเอามือออกแผ่นทองจะหุบอยู่อย่างเดิม ทันทีเอาแท่งแก้วออกไปซ้ำ ๆ จะเห็นแผ่นทองค้อยกางมากขึ้น จนถึงขีดสุดแล้วก็จะหยุดนิ่ง (จะนำแท่งแก้วออกไปเร็ว ๆ ก็ได้ เพื่อให้เขาออกซ้ำ ๆ เพื่อจะได้สังเกตเห็นว่าแผ่นทองมีค้อยกางมากขึ้นเท่านั้น บางทีในการทดลอง เขาเอามือแตะแท่งแก้วออกพร้อมกัน ผลก็จะเป็นเช่นเดียวกัน แต่อย่าเอามือออกทีหลังจะไม่มีประจุเหลือบนวัตถุโลหะโกป) ฉะนั้นเราได้ประจุบนตัวนำ โดยไม่ต้องเอาจานทองเหลืองไปถูหรือสัมผัสกับตัวนำที่มีประจุ วิธีทำให้ได้ประจุบนตัวนำเช่นนี้ เรียกว่า การเหนี่ยวนำ และการกระทำทั้งหมด ชื่อว่าการประจุไฟฟ้าโดยการเหนี่ยวนำ

ถ้าหวนกลับมาคิดถึงผลการทดลองที่กล่าวมาแล้วตอนต้น จะเห็นว่า ประจุที่ได้นั้นเป็นลบ เพราะเมื่อแท่งแก้วที่มีประจุบวกอยู่ใกล้ แผ่นทองหุบลง ถ้าลองเอาประจุลบเข้าไปบ้าง ก็จะได้เห็นว่า แผ่นทองกางออก

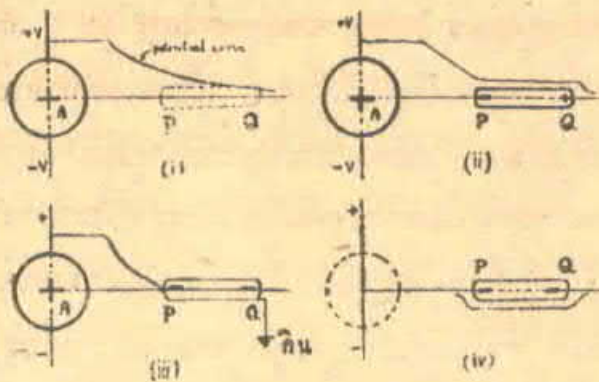
ดังนั้น ถ้าต้องการประจุไฟฟ้าลบ โดยการเหนี่ยวนำบนตัวนำใด ๆ ก็ดี ต้องนำประจุบวกเข้าไป และตัวนำลดยมือหรือใช้ตัวลคมันลงดินก็ได้ ยกมือออกหรือตัดสายดิน (ต่อ) แล้วนำเอาประจุที่นำเอาเข้ามานั้นออกไป ในทำนองเดียวกัน ถ้าต้องการประจุไฟฟ้าบวกบนตัวนำ เราต้องนำประจุลบเข้าไป แล้วกระทำอย่างคร่าวก่อน (ประจุที่นำเอาเข้าไปนั้นจะอยู่บนตัวนำหรือฉนวนก็ได้ ถ้าอยู่บนตัวนำ ระวังอย่าให้มันสัมผัสกับวัตถุที่ขึงการให้ไฟฟ้า)

### คำอธิบายการเหนี่ยวนำ

ก่อนจะอธิบาย ผู้เรียนควรพยายามเข้าใจคำเหล่านี้

**ประจุอิสระ** เราถือว่าตัวนำหรือฉนวนที่มีประจุอยู่บนตัวของมันเอง โดยไม่อาศัยอำนาจภายนอก มีประจุอิสระ เช่นเมื่อเราเอาแท่งแก้วมากลึงกับแพร แก้วและแพรต่างก็จะมีประจุอิสระ อันนี้ ชี้เด็กตรอนในตัวนำซึ่งสามารถวิ่งเฟ้นผ่านไปมาได้ เราเรียกว่า ชี้เด็กตรอนเสรี หรือ อิสระ ด้วย ทนถ้าเราเอาแท่งแก้วไปใกล้แท่งโลหะหรือตัวนำอื่น ๆ ก็จะมีประจุบนส่วนต่าง ๆ ของตัวนำ ประจุที่เกิดขึ้นบนตัวนำโดยการเหนี่ยวนำ เราเรียกว่า ประจุถูกเหนี่ยวนำ ศักดาที่เกิดขึ้นโดยประจุอิสระ เราให้ชื่อว่า ศักดาอิสระ และดังนั้น ศักดาเหนี่ยวนำ ก็จะมีผลจากการเหนี่ยวนำ

เมื่อนำประจุบวกมาไว้ที่ A ในบริเวณซึ่งเป็นอากาศรอบ A ก็จะมีอำนาจแผ่ออกไป และศักดาจะค่อยลดลง เมื่อระยะห่างจาก A มากขึ้น เราอาจเขียนกราฟแสดงค่าของศักดา เนื่องจาก A ได้ ดังในรูปที่หนึ่ง ทนถ้าเรานำเอาตัวนำอันหนึ่งมาวางระหว่างจุด P และ Q ดังในรูปที่สอง เนื่องจากว่า เต็มศักดาที่จุด P มากกว่าจุด Q เมื่อเราเอา PQ มาวาง ที่แรกศักดาที่ P และ Q ก็จะไม่เท่ากัน ดังนั้นก็จะเกิดการไหลของชี้เด็กตรอนขึ้น ชี้เด็กตรอนจะวิ่งจาก Q ไปยัง P จนศักดาตลอดตัวนำเท่ากันหมด มันจึงจะหยุดไหล ดังนั้นจึงได้ประจุบวกที่ P และประจุลบ



- (i) ก่อนนำ PQ เข้ามา (ii) เมื่อนำ PQ เข้ามา  
(iii) เมื่อต่อ PQ ลงดิน (iv) เมื่อตัดสายดินแล้ว  
นำเอาประจุ A ออก

รูปที่ 76

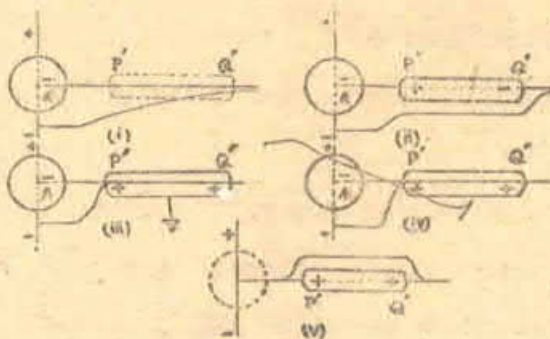
ตอนนี้เป็นเส้นตรงและขนานกับ “แกนระยะทาง” เพราะศักย์คงที่ ทันทีที่เราต่อ PQ ลงดิน E โดยตัวนำ ศักย์ของ PQ ก็จะกลายเป็นศูนย์ทันที เพราะจะมีการไหลของอิเล็กตรอนจากดินขึ้นมาทำลายประจุบวกบนตัวนำ PQ ซึ่งเมื่อก่อนคือมีศักย์เหนี่ยวนำเป็นบวก ในรูปที่สาม กราฟแสดงว่าศักย์ระหว่างจุด P และ Q เป็นศูนย์ และหายไปตามแนว “แกนระยะทาง” ในขณะนั้น PQ เราประจุลบเท่านั้น ถ้าหากจะคงอยู่เมื่อเราตัดสายดิน เพราะศักย์คงที่เหนี่ยวนำเนื่องจาก A รวมกับศักย์ของมันเอง PQ จะมีศักย์เป็นศูนย์อย่างเดิม แต่พอเรานำประจุ A ออกไป ประจุลบที่เหลืออยู่บนตัวของมัน (จึงหนีไม่ได้ เพราะเราตัดสายดินแล้ว) ก็จะทำให้มันมีศักย์เป็นลบ ดังนั้น ระหว่างจุด P และ Q ศักย์คงจะเป็นลบ แต่สม่ำเสมอ ข้างนอกจุด P และ Q ศักย์ก็จะค่อยเพิ่มขึ้นไปจนถึงศูนย์ (รูปที่สี่)

ทันตองพิจารณาเมื่อเรานำประจุ A ออกไปก่อนตัดสายดิน เมื่อแตะ PQ หรือต่อมันลงดิน ศักย์ของ PQ ก็จะเป็นศูนย์อย่างสม่ำเสมอ ทันทีที่เราเอา A ออกไป ศักย์ของมันก็จะกลับไปเป็นศูนย์อย่างเดิม ดังนั้นประจุลบที่มันมีอยู่ เมื่อ A ยังอยู่บน ก็จะไหลลงดินหมด

ที่ Q ในขณะนั้นตัวนำ PQ จะมีศักย์เหนี่ยวนำเนื่องจากประจุที่ A เมื่อเรานำเอา A ออกไป ข้างนอกการเหนี่ยวนำก็จะหมดไป ศักย์ที่ P และ Q ก็จะไม่เท่ากันอีก อิเล็กตรอนจึงวิ่งกลับที่เดิม และทำให้ PQ มีศักย์เป็นศูนย์อย่างเดิม รูปที่สอง มีกราฟแสดงศักย์ระหว่างจุด P และ Q เมื่อมีตัวนำ กราฟ

โดยเหตุนี้เอง เมื่อนำเอาประจุบวกเข้าไปใกล้จานของอิเล็กโตรสโคป แผ่นทองจึงกาง เมื่อค้อนมันตงดินแผ่นทองหุบ เพราะศักย์ตามมันเป็นศูนย์ เนื่องจากอิเล็กตรอนวิ่งเข้าไปจากดินเพื่อทำลายประจุบวกที่แผ่นทอง และคงมีประจุลบเหลืออยู่บนจานเท่านั้น เมื่อนำเอาประจุออกไปซ้ำ ๆ แผ่นทองจึงค่อยกางมากขึ้นอีก เพราะประจุบนจานค่อยกระจายลงไปยังแผ่นทองมากขึ้น เนื่องจากว่าศักย์ตามบนจานและแผ่นทองค่อยต่างกันมากขึ้น และเพื่อจะให้ศักย์ทั้งสองแห่งนี้เท่ากัน ประจุจึงไหลลงดิน หรืออาจอธิบายอย่างง่ายได้ว่า เพราะขานาค้างคุดระหว่างประจุที่กำลังนำออกไป กับประจุบนจานน้อยลง ประจุบนจานจึงไปยังที่อื่นได้ทันที ถ้านำเอาประจุเข้าไปใกล้จานมาก ๆ เมื่อเขามือแตะ จะเห็นว่าแผ่นทองกางขึ้น นี่แสดงให้เห็นว่า การเหนี่ยวนำได้เกิดมากขึ้นอีก และประจุบนจานเพิ่มขึ้น ฉะนั้น ที่แผ่นทองก็จะเกิดมีประจุบวกขึ้น มันจึงได้กางออก เมื่อนำเอาประจุออกไป ประจุลบและบวกที่เกิดขึ้นใหม่ก็จะทำลายกันพอดี

เราอาจอธิบายการประจุไฟฟ้าของบนตัวนำหรืออิเล็กโตรสโคปได้ โดยวิธีเดียวกันกับข้างบน แต่ต้องนำประจุลบเข้าไป กราฟแสดงศักย์ของตัวนำ  $P'Q'$  ปรากฏดังในภาพถัดกันเมื่อคราวที่แล้วมา



การเหนี่ยวนำเมื่อใช้ประจุลบ

- (i) ก่อนนำ  $P'Q'$  เข้าไป
- (ii) เมื่อนำ  $P'Q'$  เข้าไปแล้ว
- (iii) เมื่อค้อน  $P'Q'$  ลงดิน
- (iv) เมื่อค้อนดำดิน
- (v) เมื่อนำ  $A$  ออก

## หมายเหตุ 1 ศักดาและชนิดของประจุ

ศักดาเนื่องจากประจุบวก ตามปกติ เป็น บวก  
และศักดาเนื่องจากประจุลบ ตามปกติ เป็น ลบ

แต่ในกรณีที่เกิดการเหนี่ยวนำขึ้น ศักดากับประจุอาจไม่เหมือนกัน เช่นในการทดลองข้างบน ที่แรกก่อนนำเข้าไปใกล้ประจุ  $PQ$  และ  $P'Q'$  มีศักดาเป็นศูนย์ พอ นำมันเข้าไปใกล้ประจุบวกและลบ  $PQ$  และ  $P'Q'$  ก็จะมีศักดาบวกและลบ เนื่องจาก ประจุอื่น ๆ ตามลำดับ ในทันที  $PQ$  และ  $P'Q'$  มีศักดาเหนี่ยวนำ เมื่อเกิดการเหนี่ยวนำขึ้น อิเล็กตรอนก็จะไหลและทำให้  $P$  มีประจุลบ  $Q$  มีประจุบวก, และ  $P'$  มีประจุบวก  $Q'$  มีประจุลบ แต่เพราะว่า  $PQ$  และ  $P'Q'$  เป็นตัวนำศักดาทุก ๆ จุดบนมันต่างก็ยอมเท่ากัน ฉะนั้น  $P$  ก็จะมีศักดาเป็นบวก เนื่องจากประจุบวกภายนอก แต่ มันมีประจุเป็นลบ และ  $Q$  มีศักดาและประจุเป็นบวก ฉะนั้น  $P'$  มีศักดาเป็นลบ เนื่องจากประจุลบภายนอก แต่มันมีประจุเป็นบวก และ  $Q'$  มีศักดาและประจุเป็นลบ

พฤติกรรมเช่นนี้จะเกิดขึ้นด้วยเหมือนกัน เมื่อนำประจุบวกและลบมาชนตัวนำสองอัน ซึ่งมีค่าไม่เท่ากัน เข้าไปใกล้กัน (ดูข้างบน)

## หมายเหตุ 2 ประจุจะวิ่งจากที่ศักดาสูงไปยังที่ศักดาล่างกว่า ในทันที

หมายถึงประจุบวก แต่ถ้าวัดประจุลบหรืออิเล็กตรอนมันจะวิ่งทวน คือวิ่งจากที่ศักดาล่างไปยังที่ศักดาสูง ทางที่ประจุบวกวิ่ง เราเรียกว่า ทางเดินของกระแสไฟฟ้า เพราะฉะนั้นอิเล็กตรอนจะวิ่งทวนกับกระแสไฟฟ้า

## 11. หลักของการใช้อิเล็กโตรสโคป เช่น อิเล็กโตรสโคปแผ่นทอง

ต่อไปนี้จะแสดงการทดลองให้เห็นว่า ในการที่แผ่นทองจะกางหรือไม่ นั้นแล้วแต่ศักดาระหว่างแผ่นทองและหีบ ต่างกันหรือเท่ากัน ถ้าศักดาต่างกันมากแผ่นทองก็จะกางมาก ถ้าต่างกันน้อยก็จะกางออกน้อย ไม่จำเป็นว่าต้องมีประจุบนแผ่นทองมาก จึงจะกางมาก บางทีแผ่นทองไม่มีประจุดีสักระยะมันก็จะกางออกได้ ถ้าหีบที่บรรจุมันต้องมีศักดาสูง

การทดลอง คือไปจะทำให้เราเห็นจริงตามที่กล่าวแล้ว

(1) ค่อยๆ (คาดโลหะ) ลงดินด้วยลวด แล้วปล่อยประจุบนจานของขั้วเด็ก ไตรัสโกป หรือค้อนเข้ากับขั้วหนึ่งของแบบเคอร์ซึ่งมีขั้วหนึ่งต่อดิน แผ่นทอง จะกาง ในขณะที่ศักดาของหีบเป็นศูนย์ แต่แผ่นทองมีศักดาเป็นบวกหรือลบ แล้วแต่ชนิดของประจุหรือศักดาที่มันได้รับ ถ้าเพิ่มศักดาบนแผ่นทอง ใดๆ ก็จะทำให้มากขึ้น

(2) ค่อยๆ ของขั้วเด็ก ไตรัสโกป (นั่นคือแผ่นทอง) ลงดิน แต่ปล่อยประจุบน หรือให้ศักดาแก่หีบซึ่งมีขนาดกะทัดรัดกับโลหะหรือดิน แผ่นทองก็จะกางออกอีก เวลานี้ แผ่นทองมีศักดาเป็นศูนย์ และหีบมีศักดาเป็นบวกหรือลบแต่แต่ชนิดที่มันได้รับ ถ้าเราเพิ่มศักดาบนหีบ แผ่นทองก็จะกางมากขึ้น

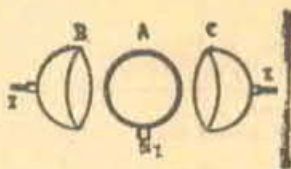
(3) ค่อยๆ เข้ากับหีบโดยตัวนำ และให้หีบวางอยู่บนฉนวน เวลานี้ถ้าค้อนเข้ากับอะไร เช่นดิน, ขั้วของแบบเคอร์ซึ่งมีขั้วหนึ่งต่อดิน หรือให้ประจุแก่มันสักเท่าใดก็ได้ แผ่นทองจะไม่กางออกเลย

การทดลองเหล่านี้ แสดงให้เห็นว่า เราจะใช้ขั้วเด็ก ไตรัสโกปสำหรับวัดศักดาไฟฟ้าสักใดก็ได้ โดยเปรียบกับศักดาที่เรารู้ค่าหรือแบ่งขีดไว้

## 12. ประจุจะอยู่แต่บนผิวนอกของตัวนำเท่านั้น

### (1) การทดลองของบิโอติ (Biot)

บิโอติทำการทดลองโดยใช้โลหะทรงกลม A ซึ่งมีครบโลหะ B และ C



รูปที่ 78

ต้องอัน ครอบโลหะหุ้ม A ได้พอดี แต่มันมีค่าเป็นฉนวน I ถ้าหีบจับ ลูกโลหะ A ก็ตั้งอยู่บนฉนวน I

ปล่อยประจุบนตัวนำ A แล้วนำ B และ C

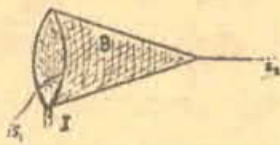
เมื่อเขา B และ C ออก โดยการทดลองด้วยขั้วเด็ก

ไตรัสโกป จะเห็นว่าไม่มีประจุเหลืออยู่บน A เลย เพราะมันได้ชกไปอยู่ที่ B และ

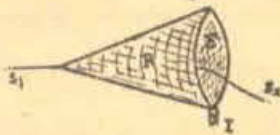
C หมด

## (2) การทดลองของฟาราเดย์

ฟาราเดย์ ใช้ถังฉนวน ที่ก้นถังมีเส้นไหมยาวๆ  $S_1$  และ  $S_2$  สองข้างสำหรับ



ตัวนำ A ขยายใน



ตัวนำ B ขยายใน

รูปที่ 79

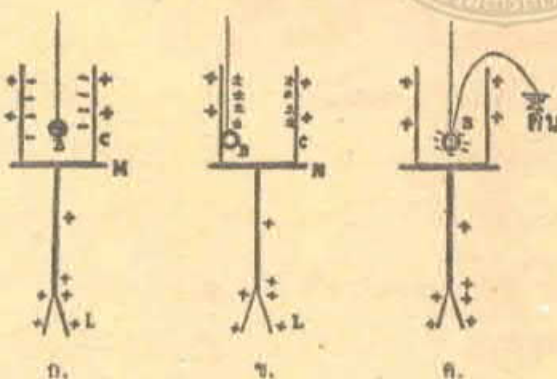
คัง ฉนวนเป็นครึ่งตัวนำ โหมดเป็นฉนวน ปากของถัง  
พันรอบกรวย และตั้งอยู่บนฉนวนเช่นแท่งแก้ว ปล่อยให้  
ประจุบนฉนวน เขาปรฟเฟอเนนแต่ละผิวใน A ของฉนวน  
ฉนวน แล้วเขาไปแตะจานของขั้วเล็กไดรตโกป แผ่น  
ทองจะไม่กาง แสดงว่าผิว A ของฉนวนไม่มีประจุ คัง  
เส้นไหม  $S_1$  ให้ถังกลับ B จะเข้าอยู่ข้างใน A มาอยู่  
ข้างนอก แล้วเขาปรฟเฟอเนนแต่ละ B ทดลองกับขั้วเล็ก  
ไดรตโกป จะเห็นว่ามีประจุที่ B ซึ่งเป็นผิวใน แต่  
เมื่อเขาฉนวนแต่ละผิว A ซึ่งเคยฉนวนเป็นผิวนอก แล้วทดลอง  
กับขั้วเล็กไดรตโกป จะเห็นว่ามีประจุบนผิว A ถ้าคัง

$S_2$  ให้ถังกลับอีก และทดลอง เราจะเห็นว่ามีประจุอยู่บนผิวนอก B แต่ไม่มีบนผิวใน A

## 12 ก. ตัวนำกลวง

การทดลองกระป๋องน้ำแข็งของฟาราเดย์

เมื่อมีตัวนำกลวงเช่นกระป๋อง สักตาที่ทุก ๆ จุดภายในกระป๋องจะเท่า



รูปที่ 80

กันหมด และมีค่าเท่ากับศักดาของ  
กระป๋อง ดังนั้นถ้าเรานำตัวนำเข้า  
ไปภายในกระป๋องที่มีประจุ จะไม่  
มีการเหนี่ยวนำเกิดขึ้นบนตัวนำ  
เลย เพราะศักดาของมันเป็นค่าคงที่ทุก  
จุด (ระวังกระป๋องของเรามีฝาปิด หรือ  
ไม้ก็ไม่ควรให้มีรอยโหว่ปากกระป๋อง)  
และ จาก การทดลอง ที่ แล้ว มาจะ  
ทราบทันทีว่า ไม่มีประจุอยู่บนผิว  
ในของกระป๋องเลย

การทดลองเหล่านี้จะทำให้เห็นจริง

นำเอากระป๋องมาวางไว้บนจานของชอล์กโคโรสโกปแผ่นทอง แล้วพิจารณาการทดลองต่อไปนี้

(1) นำเอาตัวนำที่มีประจุบวกซึ่งแขวนโดยฉนวนเข้าไปในกระป๋อง แค่ว่ายให้ถูกกระป๋อง แผ่นทองจะกางออก เมื่อเคลื่อนประจุไปมาภายในกระป๋อง แผ่นทองก็จะกางอยู่เท่าเดิม ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นมีค่าคงที่ นั่นคือ ศักดาบนกระป๋องไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อประจุเคลื่อนไปมา (ไม่เหมือนกับเมื่อไม่มีกระป๋อง) ฉะนั้นศักดาภายในกระป๋องควรจะมีค่าคงตัว (รูป ก.)

(2) ให้ตัวนำมีสัมผัสกับผิวในของกระป๋อง แผ่นทองยังจะกางอยู่เท่าเดิม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าศักดาที่เกิดขึ้นโดยการเหนี่ยวนำ จะเท่ากับศักดาที่มันได้รับจากประจุ และถ้าเรานำตัวนำที่นำเข้าไปนั้น ไปทดลองกับชอล์กโคโรสโกปอีกชิ้นหนึ่ง เราจะเห็นว่าไม่มีประจุเหลืออยู่เลย ฉะนั้น ประจุที่เกิดขึ้นโดยการเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับประจุที่นำเข้าไป (รูป ข.)

(3) ทิ้งของเอาตัวนำที่มีตามจับเป็นฉนวน เข้าไปสัมผัสกับผิวในของกระป๋อง แล้วมาทดลองกับชอล์กโคโรสโกปอีกชิ้นหนึ่ง เราจะเห็นว่าไม่มีประจุเลย และถ้าเราเข้าไปแตะผิวนอกบ้าง เราก็จะแสดงให้เห็นได้ว่ามีประจุติดออกมา นั่นคือไม่มีประจุบนผิวในของกระป๋องเลย มีอยู่แต่บนผิวนอกเท่านั้น

(4) ถ้าเรานำตัวนำอีกชิ้นหนึ่งเข้าไปใหม่ ค่อยมันลงดิน คัดด้วยดิน แล้วนำมันออกมาทดลองกับชอล์กโคโรสโกป เราจะเห็นว่า มีประจุชนิดตรงกันข้ามกับที่มันอยู่บนกระป๋อง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกิดการเหนี่ยวนำขึ้นในกระป๋องได้ เมื่อเราค่อยมันลงดิน ฉะนั้นศักดาข้างในกระป๋องและดินไม่เท่ากัน นั่นคือ ข้างในกระป๋องมี ศักดาไม่เป็นศูนย์ ลองทำการทดลองเช่นนี้หลาย ๆ ทน โดยให้ตัวนำที่นำเข้าไปอยู่คนละแห่งในกระป๋อง เราก็จะเห็นว่า ประจุเกิดขึ้นโดยการเหนี่ยวนำทุกครั้งเท่ากัน นั่นคือ ศักดาภายในกระป๋องเท่ากันทุกจุด (รูป ค.)

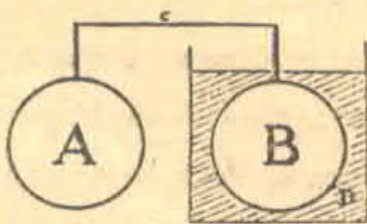
(5) ถ้ากระป๋องโลหะ ให้เอาขี้เหล็กโครสโกปแผ่นทองขนาดเด็กใส่เข้าไป แผ่นทองจะไม่กางออกเลย เพราะหีบและแผ่นทองของขี้เหล็กโครสโกปมีศักดาเท่ากัน ดังนั้น เราจะเห็นแผ่นขี้เหล็กโครสโกปในกระป๋องคงตัว ถ้าหีบค่ออยู่กับ กระป๋อง แผ่นทองก็จะยังไม่กางออกอยู่เช่นเดิม ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ศักดาของ กระป๋องเท่ากับศักดาภายในกระป๋อง

จากการทดลอง (1) และ (2) เราอาจสรุปรวมความได้อีกอย่างหนึ่งว่า กระป๋อง ก็นำให้อำนาจการเหนี่ยวนำที่ลดลงออกมาได้ ดังนั้นเขาจึงใช้แผ่นโลหะ หรือฉนวนตัวที่ติดลงดินเป็น ฉากกันไฟฟ้า การกระทำเช่นนี้จำเป็นอย่างยิ่ง ใน เมื่อต้องการทำการทดลองเพื่อให้ได้ผลอย่างถูกต้องแม่นยำ

### 18. ปริมาณของประจุบนตัวนำย่อมอาศัยโคอีเล็คทริก ซึ่งหุ้มห่อมัน

การเหนี่ยวนำย่อมอาศัยสมบัติของตัวฉนวนซึ่งอยู่ระหว่างกลาง ถ้าศักดาบน ตัวนำที่มีประจุคงตัว และวัด ค่าคงตัว โคอีเล็คทริก  $K$  โดยอัตราส่วนระหว่าง ปริมาณของประจุบนตัวนำ เวลาอยู่ในกำบังไฟฟ้าชนิดนั้น และปริมาณไฟฟ้าบน ตัวนำอันเดียวกันในสูญญากาศ เมื่อศักดาเท่ากันทั้งสองครั้ง

การทดลอง เอาโลหะรูปทรงกลมสองก้อนมีขนาดเท่ากัน และเหมือนกัน ทุกประการ อัน A อยู่ในอากาศ อัน B หุ้มด้วย ฉนวนเช่นเทียนไข A และ B มีขั้ว



รูปที่ 81

โลหะโผล่สำหรับปล่อยประจุ หรือต่อกับแบตเตอรี่ คือ A และ B เข้าหากันด้วยตัวนำ C แล้วปล่อยประจุบนตัวนำนี้ เวลาในตัวนำทั้งสอง จะมีศักดาเท่ากัน คัดสายฉนวน C แล้วนำ A และ B ไปทดลอง กับ ขี้เหล็กโครสโกป ที่ละอัน จะเห็นว่า ประจุบน B มากกว่าประจุบน A

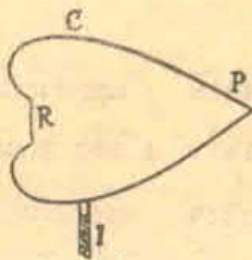
(สังเกต เมื่อขยายให้ตัวนำสองอันมีศักดาเท่ากัน ให้ต่อมันเข้าหากันโดยตัวนำ นี่เป็นวิธีที่แน่นอนที่สุด)

#### 14. ประจุบนผิวตัวนำรูปต่าง ๆ

ปริมาณของประจุไฟฟ้าบนหนึ่งหน่วยของพื้นที่ เราเรียกว่า ความหนาแน่นผิว สำหรับโลหะทรงกลม ปริมาณไฟฟ้าทุก ๆ จุดบนผิวจะเท่ากันหมด ดังนั้นเราจะหาความหนาแน่นผิวได้ โดยหารปริมาณไฟฟ้าทั้งหมดโดยพื้นที่ของทรงกลม สำหรับตัวนำอื่น ๆ ปริมาณไฟฟ้าทุก ๆ จุดบนผิวจะไม่เท่ากัน ดังนั้นเราต้องหาความหนาแน่นผิวเป็นจุด ๆ ไป โดยหาปริมาณของประจุบนผิวเล็กน้อยรอบจุดนั้นหารด้วยพื้นที่เล็ก ๆ นั้น

จากการทดลองต่อไปนี้ จะเห็นได้ว่าประจุ ชอบอยู่ที่ปลายแหลมมากกว่าที่ราบ ปลายทู่ ๆ และในผิวที่เว้าเข้าไป (เช่นผิวภายในของกระป๋อง) มีประจุน้อย ถ้าเว้ามาก ๆ ประจุจะไม่มีเลย (ดูการทดลองของฟาราเดย์) แต่นักเรียนต้องจำเสมอว่า ศักดาจะเท่ากันทุกแห่งบนและในตัวนำ

การทดลอง ใช้ตัวนำ CPR ดังในรูป ตัวนำนี้มีผิวหลายรูปตั้งแต่ปลายแหลมที่ตัดถึงเว้า ตัวนำนี้ตั้งอยู่บนฉนวนเพื่อกันไม่ให้ประจุไหลลงดิน



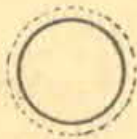
รูปที่ 82

(1) เราวัดซึ่งต่ออยู่กับ แผ่นทอง ของอิเล็กโตรสโคป ไปสัมผัสกับส่วนต่าง ๆ ของตัวนำ CPR ที่ละจุด แผ่นทองจะกางเท่าเดิมเสมอ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าศักดาบนตัวนำเท่ากันทุก ๆ จุด

(2) ที่นี้ลองเอาปรุฟเลต และจุด C, P, R, 1, 2, 3 ที่ละจุด และทุกครั้งไปทดลองกับอิเล็ก-

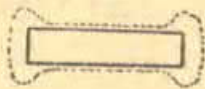
โตรสโคป จะเห็นว่า เมื่อสัมผัสกับ P จะได้ประจุออกมามากที่สุด เพราะแผ่นทองจะกางมากที่สุด และกับ R แผ่นทองจะกางน้อยที่สุด หรืออาจไม่กางเลย โดยสังเกตลักษณะของผิว และแผ่นทองที่กาง จะเห็นว่า ปลายแหลม P มีประจุน้อยมากที่สุด C มีประจุน้อยลง R ไม่มีประจุหรือมีน้อยที่สุด

นี้แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นผิวจะคงตัวหรือไม่นี้ แล้วแต่รูปลักษณะของผิว  
 คือน้ำ ความหนาแน่นผิวจะสม่ำเสมอสำหรับคือน้ำทรงกลม สำหรับผิวรูปอื่น ความ  
 หนาแน่นผิวมากที่สุดที่ปลายแหลมซอก น้อยที่สุดที่เว้าเข้าไปในคือน้ำ  
 โดยการทดลองอย่างข้างบน อาจเขียนเส้นแสดงความหนาแน่นผิวของประจุบน  
 ผิวรูปต่าง ๆ ได้ดังนี้



ก. คือน้ำรูปทรงกลม

ความหนาแน่นผิวเท่ากันทุกจุด



ข. คือน้ำแบน

ความหนาแน่นผิวมากที่สุดที่ขอบ



ค. คือน้ำรูปกรวย

ความหนาแน่นผิวมากที่สุดที่ปลายแหลม

รูปที่ 88

### 15. สนามไฟฟ้าสถิต

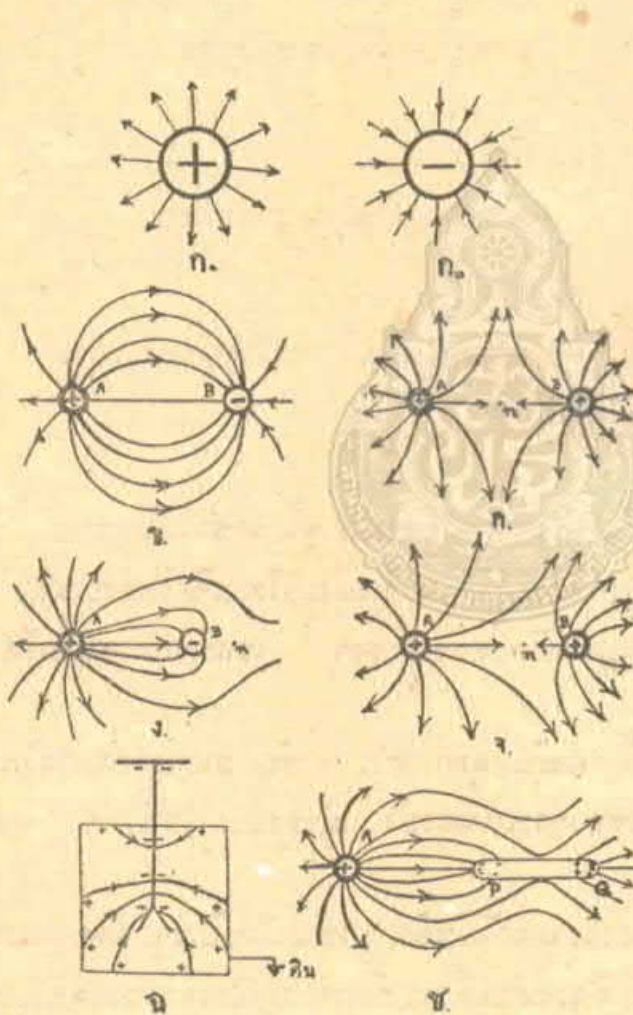
เมื่อมีประจุไฟฟ้าอยู่ที่ใด ย่อมมีอำนาจของประจุแผ่ออกไปโดยรอบ ซึ่ง  
 แสดงให้เห็นโดยการผลักหรือดูดประจุอีกอันหนึ่ง ซึ่งอยู่ในบริเวณอิทธิพลของมัน  
 บริเวณรอบประจุซึ่งปรากฏว่ามีอิทธิพลของประจุ เราเรียกว่า สนามไฟฟ้า  
 สถิต เนื่องจากประจุนั้น

บางทีเรียกชื่อต่างไปจากนี้ แต่ได้พูดถึงอะไร เช่น สนามของแรงไฟฟ้า  
 เมื่อพูดถึงการผลักหรือดูด สนามของการเหนี่ยวนำ เมื่อพูดถึงการเหนี่ยวนำ ความ  
 หมายก็คล้ายคลึงกันทั้งสองอย่าง

เส้นแรง เมื่อเรานำเอาประจุบนคือน้ำเล็ก ๆ เข้ามาใกล้ประจุนอกจำนวนหนึ่ง  
 แล้วปล่อยมัน วัตถุเล็ก ๆ นั้น ก็จะเคลื่อนที่โดยอำนาจแรง เนื่องจาก ประจุจำนวนนั้น  
 ไปตามแนวทางหนึ่งทางใดโดยเฉพาะเสมอ แนวที่มันเคลื่อนที่ไปนี้ เรียกว่าเส้นแรง

ดังนั้นเส้นแรงย่อมมีทิศทาง และเราจะให้มันมีทิศทางนี้ “เส้นแรงที่ผ่านจุด ๆ หนึ่งในสนามไฟฟ้า คือแนวที่ประจุปฏิฐาน (+) จะพยายามเคลื่อนตามไป และ แนวนี้จะเป็นแนวสนามรวมที่จุดนั้นเสมอ” จากนิยามนี้ เราถือได้ว่าประจุ นิเสธ (-) จึงทวนสนามเสมอ

เราอาจเขียนเส้น แสดงเส้นแรง เนื่องจากประจุซึ่งอยู่โดยลำพังได้คร่าว ๆ ดัง ต่อไปนี้



รูปที่ 84

ก. เส้นแรงหรือสนาม ช ออกจาก ประจุบวก.

ข. เส้นแรงหรือสนาม ช เข้าหาประจุลบ

ค. เส้นแรงหรือสนาม ระหว่าง ประจุบวก และ ลบ อยู่ใกล้กัน ประจุมีค่าเท่ากัน

ง. เส้นแรงหรือสนาม ระหว่าง ประจุบวกสองอันที่มีค่าเท่ากัน เส้นแรงผลักกัน

ก คือ Neutral Point จุดไม่มีความเข้มของสนาม - จุดที่เห็น ถ้าเป็นประจุลบ ถูกศรจะกลับกัน กับ ค. และ ง.

จ. ประจุบวกและลบค่าไม่เท่ากัน

ฉ. ประจุบวก สองอัน มีค่าไม่เท่ากัน, อัน A มากกว่าอัน B

ช. เส้นแรงเนื่องจากประจุ บนแผ่นทองในหีบตัวนำ

ซ. ประจุ A อยู่ใกล้ตัวนำ PQ

ข้อสังเกต (ก) เส้นแรงออกจากหรือเข้าหาประจุชนิดเดียวกันจะผลักกัน  
ที่ออกจากประจุบวกและเข้าหาประจุลบจะดึงดูดกัน ดังเกิดการผลักและการดึงดูดระหว่าง  
เส้นแรง ในภาพ ก. และ ข. ตามลำดับ (เปรียบกับเส้นแรงในแม่เหล็ก)

(ข) ในภาพ ข. เส้นแรงเบียด เนื่องจากตัวนำซึ่งอยู่ใกล้ ๆ ดังนั้นเส้น  
แรงเนื่องจากประจุซึ่งอยู่ในห้อง ก็จะหนีเข้าหาตัวนำ อย่างเดียวกับเส้นแรงแม่เหล็ก  
ซึ่งหนีเข้าหาเหล็ก และให้สังเกตชนิดของประจุบนตัวนำ PQ (ซึ่งถูกเหนี่ยวนำ)  
เมื่อเส้นแรงเข้าและออกจากมัน ถ้าประจุที่นำเข้าไปเป็นประจุลบ ผลก็จะตรงกันข้ามกับ  
เมื่อนำประจุบวกเข้าไป

ในภาพ ค. เส้นแรงคงจบลงที่หีบซึ่งเป็นตัวนำ แต่ในภาพ ข. เส้นแรงยังยัด  
ต่อไปอีกจนถึงดินหรือตัวนำอื่น ๆ

### แบบฝึกหัดบทที่ 6

- จงอธิบาย คำต่อไปนี้ คักตา, การเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิต, ตัวนำ, ฉนวน,  
โวลต์อิเล็กตริก (กัมมันต์ไฟฟ้า)
- ท่านเข้าใจทฤษฎีไฟฟ้าสถิตอย่างไร และทฤษฎีไหนเป็นทฤษฎีที่ถูกต้อง  
ให้เหตุผลประกอบด้วย
- ทำอย่างไรจึงจะให้ตัวนำ A
  - มีประจุลบ แต่ คักตาเป็นบวก
  - มีประจุบวก แต่ คักตาเป็นลบ
  - มีประจุลบหรือบวก แต่ คักตาเป็นศูนย์
- เมื่อเราแบ่งครึ่งแท่งแม่เหล็ก กับเอาตัวนำที่มีประจุมาแบ่งครึ่ง ผลจะ  
คล้ายคลึงหรือแตกต่างกันอย่างไรบ้าง
- จงแสดงเส้นแรงจากประจุซึ่งวางอยู่ในห้อง

6. จงอธิบายว่า ในการเหนี่ยวนำ ทำไมเมื่อเราค่อยตัวนำลงดินจึงเกิดการไหลของไฟฟ้าขึ้น ในขณะที่มีประจุอยู่ใกล้ตัวนำนั้น ผลจะแตกต่างกันอย่างไร กับเมื่อเรานำประจุไปใกล้ก้อนโลหะซึ่งวางอยู่บนดินแล้ว

7. จงอธิบายการทดลองอันใดอันหนึ่ง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ประจุจะอยู่บนผิวนอกของตัวนำเท่านั้น และชี้ให้เห็นชัดด้วยว่า เมื่อไรจะเป็นเช่นนั้น และมีข้อยกเว้นหรือไม่ จงให้เหตุผลประกอบ

8. ภายในกระป๋องที่มีประจุ ศักติจะเป็นเท่าใด และเราจะทำอย่างไรจึงแสดงว่า มีศักติ และมีค่าเท่าไร

9. ถ้าเราอยากได้ประจุลบบนตัวนำ A โดยการเหนี่ยวนำจากประจุลบบน B เราจะต้องทำอย่างไรบ้างจึงจะสมประสงค์ และประจุที่เราได้ จะมีค่าเท่ากับประจุบน B หรือไม่ เพราะเหตุใด

10. จงอธิบายวิธีทดลองเพื่อแสดงว่า ความหนาแน่นผิวของประจุบนตัวนำไม่สม่ำเสมอ นอกจากตัวนำนั้นเป็นรูปทรงกลม แต่ศักติของตัวนำเท่ากันทุกจุด ทำไมจึงเป็นเช่นนั้น



## บทที่ 7

## คำนวณเกี่ยวกับไฟฟ้าสถิต

## 1. แรงระหว่างประจุ หน่วยของประจุ สนาม

เมื่อเรานำประจุสองพวกเข้ามาหากัน ก็เกิดแรงดึงดูดหรือผลัดกันระหว่างประจุทั้งสองพวกนั้น แรงจะมากหรือน้อยแล้วแต่ระยะระหว่างมันและค่าของประจุ ถ้า  $Q_1$  และ  $Q_2$  เป็นค่าของประจุสองอันซึ่งอยู่ห่างกัน  $r$  ซม. โดยการพิจารณาอย่างในวิชาแม่เหล็ก จะเห็นได้ว่า

$$\text{แรง } F = \alpha \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

$\alpha$  มีค่าคงตัวสำหรับ ไดอิเล็กตริกชนิดหนึ่ง ๆ ซึ่งอยู่ระหว่างประจุทั้งสองนั้นและ

$\alpha = \frac{1}{K}$  เมื่อ  $K$  คือความจุเหนี่ยวนำจำเพาะ (specific inductive capacity) หรือ ค่าคงตัว ไดอิเล็กตริก (คูนทันท) ดังนั้นเราอาจเขียนใหม่ได้

$$F = \frac{1}{K} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

สำหรับไดอิเล็กตริกโดยมาก  $K$  มีค่ามากกว่า 1 เราถือเอาสูญญากาศเป็นมาตรฐาน และให้มันมีค่าเท่ากับ 1 ในอากาศ  $K$  เกือบเท่ากับ 1

ในการคำนวณ คือในนี้ จะถือว่า  $K = 1$  ดังนั้นสูตรกลายเป็น

$$F = \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

เราจะใช้สูตรนี้เสมอ นอกจากจะบอกค่า  $K$  มีค่าเปลี่ยนไปจากหนึ่ง จากสูตรข้างบนอาจให้นิยาม หน่วยของประจุ ดังนี้

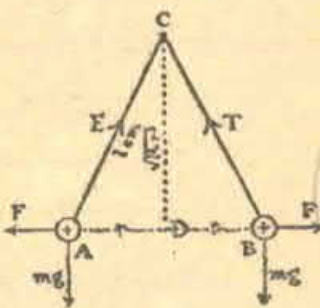
ถ้าประจุชนิดเดียวกันสองอันมีค่าเท่ากัน ในสูญญากาศ ผลักกันด้วยแรงหนึ่งดาวยน์ เมื่ออยู่ห่างกันหนึ่งเซนติเมตร ค่าของประจุต่างก็เท่ากับ หนึ่งหน่วยไฟฟ้าสถิต (e.s.u. = electrostatic unit)

หน่วยไฟฟ้าสถิตนั้นจะเล็กไป เพื่อให้เหมาะกับทางปฏิบัติการเราเลือก  
เอาหน่วย คูอมบ์ ซึ่งเป็น  $3,000,000,000 (3 \times 10^9)$  เท่าของหน่วยไฟฟ้าสถิต

เราอาจ หาค่าของประจุโดยวิธีกลศาสตร์ ได้ดังต่อไปนี้

สมมุติ ว่ามีประจุบนตัวนำเล็ก ๆ A นำเอาตัวนำ B ซึ่งมีขนาดเท่ากันเข้ามา  
แตะ แล้ว A และ B ก็จะมีประจุเท่ากัน

สมมุติ เดิม A มีประจุ  $2q$  หลังจากสัมผัสกัน A และ B ต่างก็มีประจุ  $q$   
ถ้าแขวน A และ B จากจุดเดียวกัน C โดยเส้นไหมเล็ก ๆ สองเส้น (ละวน) ยาว  
เส้นละ  $l$  ซม. และสมมุติว่าเมื่อ A และ B ผิดกันจนห่างออกจากกัน  $2r$  ก็จะเกิด  
สมดุลขึ้น



เมื่อเป็นเช่นนั้น แรงบน A หรือ B ก็จะมีสามอัน คือ

- (1) ตามแนวเชือก มีแรงตึงในเชือก T
- (2) แรงผลักรในแนวระดับ F
- (3) แรงเนื่องจากการดึงดูดของโลกต่อ A หรือ B

$mg$  ( $m$  คือมวลของ A หรือ B  $g = 981$  คือ  
อัตราเร่ง เนื่องจากการดึงดูดของโลก)

ประจุอยู่บน A และ B อันละ  $q$

รูปที่ 85

จากรูปสามเหลี่ยมของแรง เราได้

$$\begin{array}{l} \frac{F}{AD} = \frac{mg}{CD} \\ \therefore \frac{q^2/4r^2}{r} = \frac{mg}{\sqrt{l^2 - r^2}} \end{array} \quad \left| \quad \begin{array}{l} \text{แต่ } F = \frac{q \times q}{AD^2} = \frac{q^2}{4r^2} \\ CD^2 = AC^2 - AD^2 \\ = l^2 - r^2 \end{array} \right.$$

$$\text{หรือ } q^2 = \sqrt{\frac{4mg r^3}{l^2 - r^2}}$$

$$q = 2r \sqrt{\frac{mgr}{(l^2 - r^2)^{\frac{1}{2}}}} \text{ e. s. u. (หน่วยไฟฟ้าสถิต)}$$

$$= \frac{1}{3 \times 10^9} \times 2r \sqrt{\frac{mgr}{(l^2 - r^2)^{\frac{1}{2}}}} \text{ คูณลบ}$$

วิธีคำนวณหาแรงระหว่างประจุ หรือแรงบนประจุในสนามไฟฟ้าก็อย่างเดียวกันกับในวิชาแม่เหล็ก

### สนามไฟฟ้าสถิต

สนามไฟฟ้าสถิตคือบริเวณที่มีอิทธิพลของไฟฟ้า ซึ่งแสดงให้เห็นปรากฏโดยแรงที่บังเกิดขึ้นต่อประจุ หรือเกิดการเหนี่ยวนำขึ้น เราจะวัดอำนาจของสนามนี้โดยอำนาจแรงซึ่งเกิดขึ้นบนหน่วยของประจุดังนี้

ความเข้มของสนามไฟฟ้าสถิตที่จุดใดจุดหนึ่งคือ แรงที่บังเกิดขึ้นบนหนึ่งหน่วยของประจุบวกที่จุดนั้น ถ้าวัดแรงเป็นไดน์ และใช้หน่วยไฟฟ้าสถิตสำหรับวัดประจุ หน่วยของความเข้มก็จะกลายเป็นค่าพจน์ไฟฟ้าสถิต กระนั้นสนามที่มีความเข้มหนึ่งหน่วยไฟฟ้าสถิต ก็คือ สนามที่ตัวให้เกิดแรง หนึ่งไดน์บนหนึ่งหน่วยบวกก็จำได้ว่า ทิศทางของสนามจะเป็นทิศทางเดียวกับทิศทางของแรง บนหน่วยจุด และเส้นแรงเนื่องจากประจุบวกจะชี้บอกสู่ทุกประจุ สนามเนื่องจากประจุลบจะชี้เข้าหาประจุ

จากนิยามข้างบนนี้ อาจหาความเข้มของสนามไฟฟ้าสถิตได้จาก

$$\text{แรง } f = \frac{1}{K} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

∴ ความเข้มของสนามไฟฟ้า  $E$  ที่จุดห่างจากประจุ  $Q_1$  อยู่  $r$  ซม.

$$= \frac{1}{K} \frac{Q_1 \times 1}{r^2} \quad Q_2 = +1$$

$$= \frac{1}{K} \frac{Q_1}{r^2}$$

สำหรับ ในสุญญากาศ  $F = \frac{Q_1}{r^2}$

ถ้ามีสนามเนื่องจากประจุหลาย ๆ อัน ก็คำนวณหาสนามเนื่องจากประจุแต่ละอัน แล้วรวมกันเข้าอย่างในวิชาแม่เหล็ก

## 2. ศักดาไฟฟ้า, ความต่างศักยะ, เส้นสมศักดาและผิวสมศักดา

เราถือเอาศักดาของแผ่นดินเป็นมาตรฐาน และมีค่าศูนย์ และได้ทราบแล้วว่า ศักดาเป็นเครื่องบอกการไหลของไฟฟ้า จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง ผลต่างระหว่างจุดสองจุด เราให้ชื่อว่า ความต่างศักยะ ระหว่างจุดสองจุดนี้ และศักดาต่างนี้เองเป็นเหตุให้ไฟฟ้าไหลและมันจะไหลจากที่ศักดาสูงไปยังที่ศักดาต่ำ

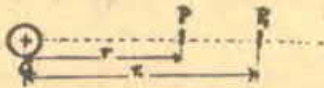
เราจะให้นิยามของศักดาที่จุด ๆ หนึ่ง ในสนามแม่เหล็กว่า “ ศักดาที่จุดนั้นมีค่าเท่ากับ งานที่เราจะต้องทำในการที่นำ ประจุปฏิฐาน หนึ่งหน่วยมายังจุดนั้น จากอนันตะ infinity ซึ่งเราถือว่ามีศักดาเป็นศูนย์ ” ฉะนั้น ศักดาต่างระหว่างจุดสองจุดก็คือ “ งานที่เราจะต้องทำในการเคลื่อน ประจุปฏิฐาน หนึ่งหน่วย จากจุดที่มีศักดาต่ำ ไปยังจุดที่มีศักดาสูง ”

หน่วยของศักดา จากนิยามข้างบน เราทราบกันที่ว่าจุด ๆ หนึ่ง จะมี ศักดาหนึ่งหน่วย C. G. S. หรือ E. S. U. ถ้าต้องทำงานหนึ่งเออร์กในการนำประจุบวก หนึ่งหน่วย E. S. U. จาก infinity มายังจุดนั้น

หน่วยที่ใช้กันอยู่เดิมนั้น มีชื่อว่า วอลต์ (หน่วยปฏิบัติ) ซึ่งมีค่าเป็น  $\frac{1}{300}$  ของ หน่วยไฟฟ้าสถิต เราจะให้นิยามของวอลต์ได้ดังนี้ ศักดาที่จุด ๆ หนึ่ง จะมีค่าหนึ่งวอลต์ ถ้าเราต้องทำงานหนึ่งเจดท์ในการนำประจุหนึ่งคูตอมบ์ จากอนันตะ infinity มายังจุดนั้น (เจดท์ เป็นหน่วยของงาน ซึ่งเท่ากับสิบล้านเออร์ก)

ค่าของศักดาที่จุดใดจุดหนึ่งเนื่องจากประจุ โดยใช้วิธีเดียวกันกับในวิชาน้ำหนัก เราอาจแสดงให้เห็นได้ว่า

$V_P$  ศักดาที่จุด  $P = \frac{Q}{r}$  e.s.u. ในเมื่อจุด  $P$  ห่างจากประจุ  $Q$  e.s.u. อยู่  $r$  ซม.



รูปที่ 86

$\therefore$  ศักดาค้างระหว่างจุด  $P$  และ  $P_1 = \frac{Q}{r} - \frac{Q}{r_1}$

จากสูตรเหล่านี้ เราเห็นได้ทันทีว่า ศักดาบนตัวนำรูปทรงกลม รัศมี  $r$  ซึ่งมีประจุ  $Q$  จะมีค่าเท่ากับ  $\frac{Q}{r}$  ใน

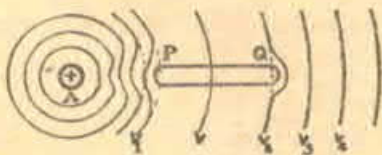
สัญญาภาค

เส้นสมศักดาและผิวสมศักดา เส้นที่ลากผ่านจุดต่างๆ ในบริเวณอิทธิพลของประจุ ซึ่งมีศักดาเท่ากันหมด เรียกว่า เส้นสมศักดา ในบริเวณหนึ่งๆ ย่อมมีเส้นสมศักดามากมาย เส้นเหล่านี้ต่างกับค่าของศักดาประจำเส้นหนึ่ง

เส้นเดียวกัน ผิวซึ่งผ่านจุดที่มีศักดาเท่ากันหรือเส้นสมศักดาที่มีศักดาเท่ากัน เรียกว่าผิวสมศักดา

ฉะนั้น จาก  $V_P = \frac{Q}{r}$  เราอาจพิจารณาได้ทันทีว่า ถ้าประจุเป็นจุด เส้นสมศักดาจะเป็นวงกลม และผิวสมศักดาจะเป็นรูปทรงกลม ในทำนองเดียวกัน ถ้ามีประจุอยู่บนตัวนำรูปทรงกลม ผลักจะเป็นอย่างเดียวกัน ข้อความนี้ จริงเฉพาะ

เมื่อไม่มีประจุอื่น หรือตัวนำอื่น ๆ อยู่ใกล้เลย



เส้นสมศักดาเมื่อนำดี PQ เข้ามา

รูปที่ 87

เมื่อเรานำตัวนำเข้าใกล้ประจุ เส้นสมศักดาจะโยไป ดังในภาพ และศักดาของตัวนำก็จะเท่ากันทั้งตัว และเท่ากับ  $V$  ซึ่งเป็นค่าของศักดาอยู่ระหว่างจุด  $A$  และ  $B$

### 3. ความจุไฟฟ้า

บนตัวนำหนึ่ง ๆ ซึ่งมีศักดาคงตัว ประจุจะมีค่าคงตัวเสมอ สำหรับไดอิเล็กตริกชนิดหนึ่ง แต่ประจุจำนวนหนึ่ง อาจจะทำให้ตัวนำซึ่งมีขนาดรูปและลักษณะต่าง ๆ กันมีศักดาไม่เหมือนกันได้ เช่น โลหะรูปทรงกลม รัศมี 10 ซม. และมีประจุ + 80 หน่วย ไฟฟ้าสถิต จะมีศักดา  $= \frac{Q}{r} = \frac{80}{10} = 8$  หน่วยไฟฟ้าสถิต ไฟฟ้าจำนวนนี้จะไม่ทำให้ศักดาของโลกเพิ่มขึ้นจากศูนย์เลย แต่จะทำให้ศักดาของตัวนำรูปทรงกลม รัศมี 5 ซม. เพิ่มขึ้น  $\frac{80}{5} = 16$  หน่วยไฟฟ้าสถิต ถ้าเราใช้ตัวนำรูปอื่น ผลก็จะต่างไปอีก

เราอาจรวมความได้ว่า ในการที่ตัวนำหนึ่งจะมีศักดามากหรือน้อย เมื่อมันได้รับประจุจำนวนหนึ่งนั้น ขึ้นอยู่กับขนาด, รูป และลักษณะ และบนอนซึ่งล้อมรอบตัวนำนั้น ฉะนั้น ตัวนำหลายอันอาจมีประจุไม่เท่ากัน ถึงแม้ว่าศักดาของมันเท่ากัน เราพูดว่าตัวนำเหล่านี้มีความจุไฟฟ้าไม่เท่ากัน ความจุไฟฟ้ามีความหมายคล้ายกับความจุความร้อนของตัวนำ ซึ่งหมายถึงความร้อนที่ตัวนำนั้นรับเพื่อให้อุณหภูมิมันเพิ่มขึ้นหนึ่งองศา ความจุแห่งความร้อน ก็แล้วแต่ชนิดของวัตถุ และมวลสารของมัน ดังนั้น เราจะให้นิยามของความจุไฟฟ้า  $C$  ของตัวนำดังนี้ “ความจุ  $C$  ของตัวนำหนึ่ง คือ อัตราส่วนระหว่างประจุ  $Q$  ที่ตัวนำได้รับ และศักดา  $V$  ที่ตัวนำได้รับเพิ่มขึ้น”

$$\therefore \text{ความจุ } C = \frac{Q}{V}$$

ซึ่งคงที่เสมอสำหรับตัวนำหนึ่ง ๆ [ให้นักเรียนเปรียบเทียบความจุไฟฟ้า, ความจุความร้อน]

หน่วยความจุ จากนิยามของความจุ เราอาจให้คำจำกัดความ หน่วยความจุได้ว่า “ตัวนำหนึ่งที่มีความจุหนึ่งหน่วย, ถ้าเมื่อเราให้ประจุมันหนึ่งหน่วย ศักดาของมันเพิ่มขึ้นหนึ่งหน่วย”

ถ้าหน่วยของประจุของเราเป็นคูลอมบ์ และของศักย์เป็นโวลต์ หน่วยของความจุจะเป็นฟารัด (farad) ซึ่งมีค่า  $9 \times 10^{11}$  e.s.u. แต่ตามปกติเขาใช้หน่วยความจุเล็กน้อย หน่วยนี้ คือ ไมโครฟารัด (micro-farad) ซึ่งมีค่า  $\frac{1}{10^6}$  ฟารัด

ฉะนั้น เราอาจวัดความจุของตัวนำได้ โดยปริมาณไฟฟ้า ซึ่งทำให้ศักย์ของตัวนำเพิ่มขึ้นหนึ่งหน่วย เช่น ถ้าประจุ 10 คูลอมบ์ ทำให้ตัวนำขึ้นหนึ่งมีศักย์เพิ่มขึ้นหนึ่งโวลต์ ความจุของตัวนำ จะมีค่า 10 ฟารัด

#### 4. ความจุของตัวนำทรงกลม. รัศมี $r$ , ซึ่งอยู่ในสุญญากาศ และไม่มีตัวนำอื่นอยู่ใกล้

สำหรับรูปทรงกลม เราอาจคำนวณหาความจุได้ง่าย ๆ ดังนี้ สมมติเราปล่อยประจุ  $Q$  บนตัวนำรูปทรงกลมซึ่งมีรัศมี  $r$  ประจุเหล่านี้ก็จะกระจายไปทั่ว บนความหนาแน่นผิวสม่ำเสมอ ฉะนั้นเราอาจถือได้ว่าประจุเหล่านี้รวมกันอยู่ที่ศูนย์กลางของรูปทรงกลม ดังนั้น ถ้าประจุ  $Q$  อยู่ที่ศูนย์กลาง ศักย์ที่จุด  $P$  ห่างจากมัน  $r$  คือบนผิวของตัวนำ ก็จะมีค่า  $\frac{Q}{r}$  แต่ศักย์ของตัวนำย่อมเท่ากันทุกจุด

$$\text{เพราะฉะนั้น ศักย์ของตัวนำ } V = \frac{Q}{r}$$

$$\therefore \text{ความจุของตัวนำ } C = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{Q/r} = r \text{ e.s.u.}$$

นั่นคือ ถ้าเราวัด  $r$  เป็น ซม. ความจุของตัวนำนี้จะ เป็น  $r$  ซม. หรือ  $r$  e.s.u. ซึ่งเท่ากับ  $\frac{r}{9 \times 10^{11}}$  ฟารัด หรือ  $\frac{r}{9 \times 10^5}$  ไมโครฟารัด

ในทำนองเดียวกัน หากคำนวณหา ความจุของตัวนำรูปทรงกลมสองอันวางซ้อนกัน ได้ ถ้าตัวนำสองอัน รัศมี  $r_1$  และ  $r_2$  วางซ้อนกัน และให้ศูนย์กลางทับกัน

สมมติว่ามีประจุ  $Q$  อยู่ที่ศูนย์กลางของมัน ศักย์ต่างระหว่างผิวทั้งสอง  
ก็จะเป็น  $\frac{Q}{r_1} - \frac{Q}{r_2}$  ถ้า  $r_2 > r_1$

ดังนั้น ความจุของตัวนำทั้งสองนี้  $= \frac{Q}{V} = \frac{Q}{\frac{Q}{r_1} - \frac{Q}{r_2}}$

∴ ความจุของตัวนำทรงกลมต้องขึ้นจากรัศมี  $= \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1}$  e.s.u.

ถ้ามีไดอิเล็กตริก ซึ่งมีค่าคงตัว  $K$  ถกกลาง มันจะมีความจุเพิ่มขึ้นเป็น  $K \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1}$  e.s.u. หรือ ซม. ความจุของตัวนำแบบอื่น มีอยู่ในบทที่ 8

## 5. พลังงานศักยะของประจุ Potential Energy

พิจารณาคำนำขึ้นหนึ่ง ซึ่งมีประจุ  $Q$  และศักย์  $V$

ถ้านำประจุบวกหนึ่งหน่วย จากอนันต์ มาถึงผิวที่มี ศักย์  $V$  เราต้องทำงาน  $V$   
(จากนิยามของศักย์) ฉะนั้นถ้านำประจุ  $Q$  เข้ามา ต้องทำงาน  $QV$

แต่ในที่นี้ ศักย์ มีค่าคงตัว ฉะนั้นถ้ารวบรวมประจุจากอนันต์เข้ามารวม  
กัน ศักย์ของประจุเหล่านี้จะเพิ่มจากศูนย์ (เมื่ออยู่ห่างกันมาก) จนถึง  $V$   
(เมื่ออยู่บนตัวนำอันเดียวกันหมด) เพราะฉะนั้นในการรวมประจุเข้ามา ศักย์เฉลี่ย  
จะเป็น  $\frac{V}{2}$  แต่ประจุที่เรารวบรวมเข้ามามีเป็น  $Q$  ดังนั้นงานที่ต้องทำในการรวมประจุนี้

$$= \text{ศักย์} \times \text{ประจุ} = \frac{V}{2} \times Q = \frac{QV}{2}$$

นั่นคือพลังงานศักย์ของประจุ  $Q$  บนตัวนำขึ้น  $= \frac{QV}{2}$

หรือถ้าแทนค่า  $Q$  หรือ  $V$  จาก

$Q = C V$  เราจะได้

พลังงานศักยะ

$$W = \frac{Q V}{2}$$

$$= \frac{1}{2} Q \times \frac{Q}{C} = \frac{Q^2}{2C}$$

$$= \frac{1}{2} C V \times V = \frac{C V^2}{2}$$

ถ้า  $Q$ ,  $V$  และ  $C$  มีค่าเป็นหน่วยไฟฟ้าสถิต พลังงานศักยะจะมีค่าเป็นเออร์ก  
และถ้าหน่วยเป็นหน่วยปฏิบัติ พลังงานศักยะจะมีค่าเป็นจูล - วินาที

หมายเหตุ (1) พลังงานศักยะของประจุ หมายถึงงานที่ไฟฟ้ามันจะทำ  
ได้ ถ้าปล่อยให้มันไหลไปยังที่ศักย์ศูนย์จนหมด

(2) ควรจำสูตรข้างบนนี้ไว้ให้ได้ และเลือกสูตรที่เหมาะสม  
สำหรับโจทย์ใช้

### โจทย์ตัวอย่างแรง สนาม และ ศักย์

#### ก. แรงและสนาม

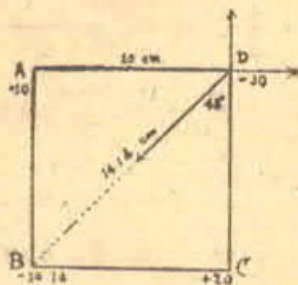
(1) ประจุบวกสองปริมาณ ๆ ละ 10 หน่วยไฟฟ้าสถิต อยู่ห่างกัน 10 ซม.  
แรงผลักระหว่างประจุเป็นเท่าใด (1) ถ้าประจุทั้งสองอันอยู่ในอากาศ (2) ถ้า  
ประจุทั้งสองอันอยู่ในตัวกลาง ซึ่งค่าคงตัวไดอิเล็กตริก  $K$

$$\text{แรงผลัก} = \frac{(\text{ประจุอันที่หนึ่ง}) \times (\text{ประจุอันที่สอง})}{K (\text{ระยะระหว่างประจุ})^2}$$

ในอากาศ  $K = 1$  . . . แรงผลัก =  $\frac{10 \times 10}{1 \times 10^2} = 1$  ไดน์

ในตัวกลาง  $K = 3$  . . . แรงผลัก =  $\frac{10 \times 10}{3 \times 10^2} = \frac{1}{3}$  ไดน์

(2) จตุรัส ABCD ด้านยาว 10 ซม. มีประจุ +10, -14, 14, +20 และ -30 ที่จุด A, B, C และ D ตามลำดับ จงหาสนามที่จุด D เนื่องจากประจุอื่น อีกด้านอื่น และหาแรงบนประจุที่จุด D



รูปที่ 88

ในการหาโจทย์ตามปกติ เราถือว่า

$K = 1$  นอกจากเขากำหนดให้

$$\text{สนาม} = \frac{\text{ประจุ}}{K (\text{ระยะ})^2} \quad K = 1$$

$$\therefore \text{สนามที่จุด D เนื่องจากประจุ A} = \frac{10}{10^2} = \frac{1}{10}$$

ตามแนว AD

$$\begin{aligned} \text{สนามที่จุด D เนื่องจากประจุ B} &= \frac{14 \cdot 14}{(10\sqrt{2})^2} \\ &= \frac{1}{10\sqrt{2}} \end{aligned}$$

ตามแนว DB

$$\text{สนามที่จุด D เนื่องจากประจุ C} = \frac{20}{10^2} = \frac{2}{10} \quad \text{ตามแนว CD}$$

จากภาพ ได้ขนาดสนามเนื่องจาก B ตามแนว DC

$$= \frac{1}{10\sqrt{2}} \sin 45$$

$$= \frac{1}{20}$$

และขนาดสนามเนื่องจาก B ตามแนว DA

$$= \frac{1}{10\sqrt{2}} \sin 45$$

$$= \frac{1}{20}$$

$\therefore$  สนามลัพธ์ตามแนว AD

$$= \frac{1}{10} - \frac{1}{20} = \frac{1}{20}$$

$$\text{สนามกักรตามแนว } C D = \frac{1}{10} + \frac{1}{20} = \frac{3}{20}$$

$$\therefore \text{สนามกักรทั้งหมดที่จุด } D = \sqrt{\left[\left(\frac{1}{20}\right)^2 + \left(\frac{3}{20}\right)^2\right]} = 0.158$$

$$\text{สนามจะรตามแนว } D P \text{ ตาม } \theta = \tan^{-1} \frac{1}{3} \text{ กับ } C D$$

$$\therefore \text{แรงบนประจุ } -30 \text{ หน่วยที่ } D = 0.158 \times 30 = 4.74 \text{ ไนน์ ตามแนว } P D$$

หมายเหตุ เราจะทำอย่างข้อหนึ่งก็ได้ คือหาแรงบน D เนื่องจากประจุทั้งสามที่ละอันแล้วรวมกันเข้า อย่างข้างบน โดยใช้สูตร

$$R = \sqrt{P^2 + Q^2 + 2 P Q \cos \theta}$$

ข. ศักดาเนื่องจากประจุ

(1) จงหาศักดาเนื่องจากประจุ  $-10$  หน่วยที่จุด P ห่างจากประจุ  $+5$  ซม.

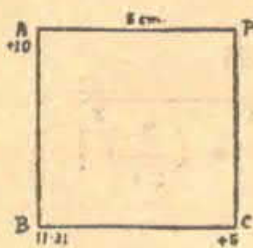
$$\text{ศักดา} = \frac{\text{ประจุ}}{\text{ระยะทาง}}$$

$$\therefore \text{ศักดาที่จุด } P = \frac{-10}{5} = -2 \text{ หน่วยไฟฟ้าสถิต}$$

ถ้าประจุ  $-10$  และจุด P อยู่ในตัวกลางซึ่งมี  $K = 2$

$$\text{ศักดาที่จุด } P \text{ จะ} = \frac{-10}{2 \times 5} = -1 \text{ หน่วยไฟฟ้าสถิต}$$

(2) จงหาศักดาที่จุด P เนื่องจากประจุ  $10, -11.31$  และ  $+5$  ซึ่งอยู่ที่จุด A, B ซึ่ง C ตามลำดับ ถ้า ABCP เป็นจัตุรัส ด้านยาว 5 ซม.



รูปที่ 89

$$\text{ศักดาที่ } P \text{ เนื่องจากประจุที่ } A = \frac{+10}{5} = +2 \text{ หน่วย e.s.}$$

$$\text{ศักดาที่ } P \text{ เนื่องจากประจุที่ } B = \frac{-11.31}{5\sqrt{2}} = -1.6 \text{ หน่วย e.s.}$$

$$\text{ศักดาที่ } P \text{ เนื่องจากประจุที่ } C = \frac{+5}{5} = +1 \text{ หน่วย e.s.}$$

$$\therefore \text{ศักดาทั้งหมดที่จุด } P = +2 - 1.6 + 1 = 1.4 \text{ หน่วย e.s.}$$

หมายเหตุ (1) ในการคำนวณหาแรงหรือสนาม เพื่อความสะดวกนักเรียนควรใช้สูตรแสดงทิศและทางของมัน ถ้ามันชี้ไปทางเดียวกันเขาบวกกัน ถ้ามันชี้ไปคนละทาง (ตรงกันข้าม) เขาลบกัน ถ้ามันทำมุม  $\theta$  แก่กัน เราใช้สูตร

$$R = \sqrt{P^2 + Q^2 + 2PQ \cos \theta}$$

วิธีเขียนสูตร ให้ทำอย่างเดียวกับในวิชาแม่เหล็ก คือเส้นแรงพุ่งออกจากประจุบวก แต่พุ่งเข้าหาประจุลบ

(2) ในการคำนวณหาศักดา ศักดาไม่มีทิศทางอย่างแรงหรือสนาม แต่มันอาจเป็นบวกหรือลบได้ ศักดาเนื่องจากประจุบวกเป็นบวกเนื่องจากประจุลบเป็นลบ สำหรับความสะดวกในเมื่อทำโจทย์ให้นักเรียนวัดขนาดเครื่องหมายของศักดาไว้ แล้วให้บวกศักดาทุกอันเข้าอย่างวิธีพีชคณิต

## 7. ประจุ, ความจุ, ศักดา และพลังงานศักยะ

เมื่อตัวนำสองอันซึ่งมีศักดาไม่เท่ากันสัมผัสกัน ไฟฟ้าจะให้จนศักดาเท่ากัน จึงจะหยุด ต่อไปนี้จะแสดงวิธีคำนวณหาศักดา หลังจากคำนวณสัมผัสกัน และพลังงานศักดาที่เสียไป

ในการทำโจทย์ เราต้องถือหลักเช่นเดียวกับหลักในวิชาความร้อน ซึ่งมีความร้อนไม่สูญหายไป แต่อาจเปลี่ยนที่อยู่ได้ และอุณหภูมิอาจลด

งได้ ในวิชาไฟฟ้าสถิต เราถือว่าปริมาณไฟฟ้าจะไม่สูญหายไปหรือเพิ่มขึ้น แต่  
 ศักดาของตัวนำอาจลดลงได้ หนึ่งเมื่อเอาตัวนำสองอันมาสัมผัสกัน และเกิดการไหล  
 ของไฟฟ้าขึ้น ประจุทั้งหมดบนตัวนำทั้งสองก่อนและหลังสัมผัสกัน จะมีค่าเท่า  
 เดิม แต่ศักดาของอันที่มากกว่าจะลด ของอันที่น้อยกว่าจะเพิ่ม จนศักดา  
 เท่ากันทั้งสองอัน แต่ถ้าศักดาเดิมเท่ากัน หลังจากสัมผัสแล้วศักดาจะไม่เปลี่ยน  
 และประจุบนตัวนำทั้งสองต่างก็คงเดิม

1. ศักดา ของตัวนำสองอัน ก่อนและหลังตัวนำสองอันนั้นสัมผัส  
 หรือต่อกันเข้าด้วยตัวนำ

สมมติตัวนำ A มีความจุ  $C_1$  และศักดา  $V_1$

และตัวนำ B มีความจุ  $C_2$  และศักดา  $V_2$

ต้องการหาศักดาเมื่อตัวนำทั้งสองนี้สัมผัสกันเข้าแล้ว

สมมติ  $V$  เป็นศักดาของตัวนำทั้งสองเมื่อสัมผัสกันแล้ว และ  $V_1$  มีค่าสูง

กว่า  $V_2$  นั่นคือ A เสียประจุให้แก่ B

ตัวนำ A เดิมมีประจุ  $Q_1 =$  ประจุที่ให้แก่ B + ประจุที่เหลือจากให้ B จนมี  
 ศักดา  $V$

$$C_1 V_1 = \text{ประจุที่ให้แก่ B} + C_1 V$$

ในทำนองเดียวกัน,

$$\begin{aligned} \text{B ได้ประจุเพิ่มจาก A} &= \text{ประจุที่มีหลังสัมผัส} - \text{ประจุที่มีก่อนสัมผัส } Q_2 \\ &= C_2 V - C_2 V_2 \end{aligned}$$

แต่ A เสียประจุไปเท่าใด B ก็ได้รับทั้งหมด เพราะประจุไม่หายไปเลย

$$\therefore C_1 V_1 - C_1 V = C_2 V - C_2 V_2$$

$$\therefore C_1 V + C_2 V = C_1 V_1 + C_2 V_2$$

$$\therefore V = \frac{C_1 V_1 + C_2 V_2}{C_1 + C_2}$$

หรือเราจะใช้กฎหนึ่งก็ได้ ดังนี้ :-

$$\begin{aligned}\text{ประจุของ A และ B ก่อนสัมผัส} &= \text{ประจุของ A ก่อนสัมผัส} + \text{ประจุของ B ก่อนสัมผัส} \\ &= C_1 V_1 + C_2 V_2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{ประจุของ A และ B หลังสัมผัส} &= (\text{ศักดาของ A และ B}) \times (\text{ความจุของ A และ B รวมกัน}) \\ &= V (C_1 + C_2)\end{aligned}$$

แต่ประจุไม่ได้หายไปเลย

$$\therefore V (C_1 + C_2) = C_1 V_1 + C_2 V_2$$

$$\therefore V = \frac{C_1 V_1 + C_2 V_2}{C_1 + C_2} \quad \text{หรือ} \quad \frac{Q_1 + Q_2}{C_1 + C_2}$$

ตัวอย่าง ถ้าตัวนำอันหนึ่งมีความจุ 5 e.s.u. และประจุ 100 e.s.u. และอีกอันหนึ่งมีศักดา 10 e.s.u. และประจุ 80 e.s.u. เมื่อแตะกันแล้วตัวศักดาของตัวนำจะกลายเป็นเท่าใด

เดิม A มีประจุอยู่ 100 e.s.u.  $C = 5$  e.s.u. และ B มีศักดา  $V = 10$  e.s.u. และประจุ  $Q = 80$  e.s.u.

$$\therefore B \text{ มีความจุ} = \frac{Q \text{ ของ B}}{V \text{ ของ B}} = \frac{80}{10} = 8 \text{ e.s.u.}$$

$$\text{ก่อนสัมผัส A และ B มีประจุ} = 100 + 80 = 180 \text{ e.s.u.}$$

หลังสัมผัสสมมุติศักดาของ A และ B กลายเป็น V แต่ความจุของ A และ

$$B = \text{ความจุของ A} + \text{ความจุของ B} = 5 + 8 = 13 \text{ e.s.u.}$$

$$\text{แต่ประจุก่อนสัมผัสของ A และ B} = \text{ประจุหลังสัมผัสของ A และ B}$$

$$\therefore 180 = 13 V$$

$$\therefore V = \frac{180}{13} = 13 \frac{11}{13} \text{ e.s.u.}$$

เราอาจใช้วิธีที่หนึ่ง โดยหาว่า A เสียประจุ =  $100 - 5 \text{ V}$

และ B ได้ประจุเพิ่ม =  $8 \text{ V} - 80$

$$\therefore 100 - 5 \text{ V} = 8 \text{ V} - 80$$

$$\text{V} = \frac{180}{13} = 13 \frac{11}{13} \text{ e. s. u.}$$

ถ้ามีตัวนำหลายอันหรือหลายพวก หาประจุของทุก ๆ อันก่อนแล้วจึงบวกกันเข้า แล้วสมมติ V ให้เป็นศักดาหลังสัมผัส ประจุหลังสัมผัสก็คือ  $V \times$  (ผลบวกของความจุของตัวนำทุกอัน) แล้วจะได้ประจรรวมทั้งสองพวกที่หาได้เข้าเท่ากัน

(2) พลังงานศักยะของตัวนำหลายอันซึ่งมีศักดาไม่เท่ากันจะลดลงเมื่อสัมผัสกัน

ถ้าตัวนำสองอันมีศักดา  $V_1$  และ  $V_2$  และความจุ  $C_1$  และ  $C_2$  ตามลำดับ พลังงานศักยะจะลดลงเท่าใด เมื่อเราเอาอันหนึ่งสัมผัสกับหรือต่อกันเข้าด้วยตัวนำ

สมมติศักดา  $V_1$  สูงกว่า  $V_2$

พลังงานศักยะก่อน สัมผัส = พลังงานศักยะของสองอันบวกกัน

$$= \frac{1}{2} C_1 V_1^2 + \frac{1}{2} C_2 V_2^2$$

หลังจากติดต่อแล้ว สมมติศักดากลายเป็น V

$$\therefore V = \frac{C_1 V_1 + C_2 V_2}{C_1 + C_2}$$

$\therefore$  พลังงานศักยะของตัวนำทั้งสองเมื่อต่อกันแล้ว

$$= \frac{1}{2} V^2 (C_1 + C_2)$$

แทนค่า V

$$= \frac{1}{2} \left( \frac{C_1 V_1 + C_2 V_2}{C_1 + C_2} \right)^2 \times (C_1 + C_2)$$

$$= \frac{1}{2} \frac{(C_1 V_1 + C_2 V_2)^2}{C_1 + C_2}$$

$$\therefore \text{พลังงานศักย์รวม} = \left\{ \frac{v_1^2 C_1}{2} + \frac{v_2^2 C_2}{2} \right\} - \frac{1}{2} \frac{(C_1 v_1 + C_2 v_2)^2}{C_1 + C_2}$$

$$= \frac{C_1 C_2 (v_1 - v_2)^2}{2 (C_1 + C_2)}$$

หรือถ้าเรารู้ค่าของประจุ  $Q_1$  และ  $Q_2$  และความจุ  $C_1$  และ  $C_2$  เราจะได้

$$\text{พลังงานศักย์เดิมของขั้นแรก} = \frac{1}{2} \frac{Q_1^2}{C_1}$$

$$\text{พลังงานศักย์เดิมของขั้นที่สอง} = \frac{1}{2} \frac{Q_2^2}{C_2}$$

$$\text{พลังงานศักย์รวมก่อนต่อ} = \frac{1}{2} \frac{Q_1^2}{C_1} + \frac{1}{2} \frac{Q_2^2}{C_2}$$

$$\text{และพลังงานศักย์รวมหลังต่อ} = \frac{1}{2} \frac{(Q_1 + Q_2)^2}{(C_1 + C_2)} \quad (\text{เพราะประจุรวม} = Q_1 + Q_2)$$

$$\therefore \text{พลังงานศักย์เปลี่ยนแปลงไป} = \left\{ \frac{1}{2} \frac{Q_1^2}{C_1} + \frac{1}{2} \frac{Q_2^2}{C_2} \right\} - \frac{1}{2} \frac{(Q_1 + Q_2)^2}{(C_1 + C_2)}$$

ตัวอย่าง คำนวณรูปกลมสองอันรัศมี 80 และ 45 ซม. และมีประจุ +60 และ -15 หน่วยตามลำดับ จงหาพลังงานศักย์ก่อนต่อและหลังต่อกัน และหาว่าพลังงานศักย์จะลดลงเท่าใดเมื่อต่อกัน

$$\text{ก่อนตัว} \quad \text{อันแรกมีศักย์} = \frac{60}{80} = 2 \text{ e.s.u.}$$

$$\text{อันที่สองมีศักย์} = \frac{-15}{45} = -\frac{1}{3} \text{ e.s.u.}$$

$$\therefore \text{อันแรกมีพลังงานศักย์} = \frac{1}{2} Q_1 V_1 = \frac{1}{2} \times 60 \times 2 = 60 \text{ เซอร์ก}$$

$$\text{อันที่สองมีพลังงานศักย์} = \frac{1}{2} Q_2 V_2 = \frac{1}{2} \times (-15) \left(-\frac{1}{3}\right) = 2\frac{1}{2} \text{ เซอร์ก}$$

$$\therefore \text{ก่อนต่อ} \quad \text{ทั้งสองอันมีพลังงานศักย์} = 60 + 2\frac{1}{2} = 62\frac{1}{2} \text{ เซอร์ก}$$

$$\begin{aligned} \text{หาค่า} \quad \text{ศักดาของทั้งสองชั้น} &= \frac{\text{ประจุรวม}}{\text{ความจุรวม}} = \frac{60-15}{30+45} \\ &= \frac{3}{5} \quad \text{e. s. u.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{พลังงานศักยะหลังค่อ} &= \frac{1}{2} QV = \frac{1}{2} \times (60-15) \times \frac{3}{5} \\ &= 13.5 \quad \text{e. s. u.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{พลังงานศักยะที่เหลือไป} &= 62.5 - 13.5 \\ &= 49.0 \quad \text{e. s. u.} \end{aligned}$$

ถ้าใช้สูตรเลขก็ได้เช่นเดียวกัน

$$\begin{aligned} \text{พลังงานศักยะที่เหลือไป} &= \frac{1}{2} \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} (V_1 - V_2)^2 \\ &= \frac{1}{2} \frac{30 \times 45}{30 + 45} \left(2 + \frac{1}{3}\right)^2 = 49 \text{ e.s.u.} \end{aligned}$$

แต่ไม่ควรใช้สูตรค่าเงิน ควรหาเขาค่าเงิน แล้วหาผลต่างอย่างตอนแรก

ให้สังเกตดูให้ดีว่า พลังงานศักยะจะเสียไปเต็มที่ในการ ค่อยคั่นนำ สองชั้นที่  
ศักดาไม่เท่ากัน เพราะ  $\frac{C_1 C_2}{2(C_1 + C_2)} (V_1 - V_2)^2$  จะมีค่าเป็นบวกเสมอเมื่อเราแทน  
ค่า  $C$  และ  $V$   $C$  มีค่าเป็นบวกเสมอ  $(V_1 - V_2)^2$  ก็มีค่าเป็นบวกเสมอเช่นเดียวกัน  
กัน แต่มันจะเป็นศูนย์เมื่อ  $V_1 = V_2$  นั่นคือพลังงานศักยะจะไม่เสียไป ถ้าไฟฟ้า  
ไม่ไหล ในการที่จะทราบเหตุผลดี ว่าทำไมพลังงานศักยะเสียไป เมื่อเกิดการไหล  
ของไฟฟ้าขึ้น เราต้องอาศัยและเปรียบเทียบกับหลักในวิชากลศาสตร์ ความร้อน และ  
ไฟฟ้ากระแส ในวิชาไฟฟ้ากระแส เมื่อไฟฟ้าไหลก็เกิดพลังงานความร้อน หรือ  
สภาพอื่นของพลังงานขึ้น ถ้าพูดในทางกลศาสตร์ เมื่อวัตถุขยับที่สูง มันจะมีพลัง  
งานศักยะ เมื่อมันกำลังตกลงมามันอาจทำงานให้เกิดขึ้นได้ แต่เมื่อมันตกลงมาพลัง  
งานศักยะของมันจะลดลง ๆ และทำงานไปได้เท่ากับพลังงานศักยะที่ลดลง ฉะนั้นใน  
วิชาไฟฟ้าล็ก พลังงานที่ลดลงนี้ จะทำให้เกิดพลังงานความร้อน หรือพลังงาน

ชนิดอื่นนั้น แต่พลังงานที่เสียไปกับพลังงานศักยที่เหลืรวมกันเข้าจะเท่าเดิมตามกฎความถาวรของพลังงาน (Law of Conservation of Energy) และให้สังเกตด้วยว่า ตัวนำที่มีประจุไม่อาจบวกหรือลบ จะมีพลังงานศักยเป็นบวกเสมอ

## แบบฝึกหัดบทที่ 7

### ตอน ก แรงกับสนาม

1. จงหาสนามที่จุด P ห่างจากประจุ + 10, 5 ซม. ( $\frac{2}{3}$ )

2. ABC เป็นเส้นตรง AB = 5 ซม. BC = 5 ซม. จงหาความเข้มที่จุด C และให้บอกทิศของสนามด้วย ถ้า

ก. ที่ A มีประจุ + 50 และที่ B มีประจุ + 75 (BC  $3\frac{1}{2}$ )

ข. ,, A ,, - 50 ,, B ,, + 75 (BC  $2\frac{1}{2}$ )

ค. ,, A ,, + 50 ,, B ,, - 75 (CB  $2\frac{1}{2}$ )

ง. ,, A ,, - 50 ,, B ,, - 75 (CB  $3\frac{1}{2}$ )

จ. ,, A ,, - 200 ,, B ,, + 100 (BC 2)

3. ABC เป็นเส้นตรง AB = 5 ซม. BC = 5 ซม. จงหาความเข้มของสนามที่จุด B และบอกทิศทางของสนาม ถ้า

ก. ที่ A มีประจุ + 50 และที่ C มีประจุ + 75 (BA 1)

ข. ,, A ,, - 50 ,, C ,, - 75 (AB 1)

ค. ,, A ,, - 50 ,, C ,, + 75 (BA 5)

ง. ,, A ,, + 50 ,, C ,, - 75 (AB 5)

4. ABC เป็นเส้นตรง AB = 5 ซม. BC = 8 ซม. ถ้าที่ A มีประจุ + 169, ที่ B มีประจุ + 16 ที่ C มีประจุ - 104 หน่วย

ก. จงหาแรงบนประจุที่ A เนื่องจากประจุอีกสองอัน (AB 4.16)

ข. ,, ,, B ,, ,, (BC 134.2)

ค. ,, ,, C ,, ,, (CB 130)

5. ประจุสองอันผลักกันด้วยแรง 60 ไนน์ เมื่ออยู่ห่างกัน 6 ซม. ถ้าประจุอันหนึ่ง เป็น  $-36$  อีกอันหนึ่งเป็นเท่าใด ถ้าประจุห่างกัน 12 ซม. แรงจะเป็นเท่าใด และถ้าแรงผลักเป็น 180 ไนน์ ระยะระหว่างประจุจะเป็นเท่าใด ( $-60$ ) (ก. 15, ข. 3.464)

6. ประจุสองอัน เมื่ออยู่ห่างกัน 10 ซม. ดึงกันด้วยแรง 100 ไนน์ เมื่ออยู่ห่างกัน 8 ซม. แรงดึงดูดจะเป็นเท่าใด (156.25)

7. ABCD เป็นจตุรัส ด้านยาว 10 ซม. มีประจุ  $-60$ ,  $+28.28$ ,  $-30$  และ  $+100$  ที่ A, B, C และ D ตามลำดับ จงหาสนามที่จุด D เนื่องจากประจุที่ A, B และ C แล้ว หาแรงบนประจุที่ D เนื่องจากประจุทั้งสามนั้น (0.024; 2.4)

8. ABCD เป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า  $AB = 10$  ซม.  $BC = 5$  ซม. มีประจุ  $+100$ ,  $-200$  และ  $+672$  ที่ A, C และ D ตามลำดับ จงหาสนามที่จุด B (14.66)

9. ประจุ A  $+140$  ประจุ B  $-35$  ห่างกัน 15 ซม. ต้องเอาประจุ C ไว้ที่ไหน จึงจะไม่เกิดแรงบนประจุ C เลย [ 15 ซม. จาก ( $-35$ ) และ 30 ซม. จาก ( $+140$ ) ]

10. จากข้อ (9) ถ้าประจุ A เป็น  $+140$  และ B เป็น  $+35$

C จะต้องอยู่ที่ไหน (5 ซม. จาก  $-35$ , 10 ซม. จาก  $+140$ )

(จุดที่เราต้องการหาเขาเรียกว่า Neutral Point)

#### ตอน ข. ศักดา

11. A-B-C เป็นเส้นตรง  $AB = 8$  ซม.  $BC = 6$  ซม. จงหาศักดาที่จุด C เนื่องจากประจุที่จุด A และ B

ก. ที่จุด A มีประจุ  $+64$  และที่ B มีประจุ  $+90$  ( $+23$ )

ข. ,, A ,,  $-64$  ,, B ,,  $-90$  ( $-23$ )

ค. ,, A ,,  $-64$  ,, B ,,  $+90$  ( $+7$ )

ง. ,, A ,,  $+64$  ,, B ,,  $-90$  ( $-7$ )

12. ABCD เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า  $AB = 8$  ซม.  $BC = 6$  ซม. จงหา  
ศักดาที่จุด D เนื่องจากประจุที่ A และ B

ก. ที่ A มีประจุ  $+108$  หน่วย ที่ B มีประจุ  $+60$  หน่วย ( $+30$ )

ข. ,, A ,,  $-108$  ,, B ,,  $-60$  ,, ( $-30$ )

ค. ,, A ,,  $-108$  ,, B ,,  $+60$  ,, ( $-6$ )

ง. ,, A ,,  $+108$  ,, B ,,  $-60$  ,, ( $+6$ )

13. ABCDEF เป็นหกเหลี่ยมด้านเท่า มีด้านยาวด้านละ 12 ซม. จงหา  
ศักดาที่จุดกึ่งกลาง ถ้ามีประจุ  $+6, -12, +30, -100, +25$  และ  $-80$  หน่วย ที่จุด  
A, B, C, D, E, และ F ตามลำดับ ( $-10.92$ )

### คอน ก. ศักดาของตัวนำ

14. ตัวนำ A และ B มีความจุ 8 และ 15 หน่วยไฟฟ้าสถิตตามลำดับ ถ้า  
เราประจุ A และ B ให้มีศักดา 120 และ 100 หน่วยไฟฟ้าสถิต ความลำดับ จงหา  
ศักดา เมื่อเอาตัวนำเหล่านี้มาสัมผัสกัน (107)

15. ตัวนำสองอันได้รับประจุ  $+60$  และ  $30$  ตามลำดับ ถ้าอันหนึ่งมีความจุ  
30 หน่วยและอันที่สอง 5 หน่วย จงหาศักดาเมื่อตัวนำเหล่านี้สัมผัสกันแล้ว (2.57)

16. ตัวนำสองอันได้รับประจุ 100 และ  $-120$  ตามลำดับและมีศักดา 50 และ  
 $-12$  จงหาว่าศักดาหลังสัมผัสจะเป็นเท่าใด ( $-1.67$ )

17. ตัวนำหนึ่ง มีความจุ 10 ฟารัด เมื่อเราเอาประจุให้แก่นัน 150 คูลอมน์  
ก็ทำตามนี้จะกลายเป็น 10 วอลต์ จงหาว่าเรามีประจุชนิดใดและมีอยู่เท่าใด  $(-50)$

18. ตัวนำหนึ่งมีความจุ 60 ฟารัดและศักดา 13 วอลต์ เมื่อเอาไปแตะกับ  
ตัวนำหนึ่งซึ่งมีความจุเป็นสองเท่าของตัวนำอันนี้ และไม่มีประจุเลย จงหาว่าศักดา  
ของตัวนำที่มีประจุอยู่เดิมจะลดลงเท่าใด  $(8 \frac{1}{2})$

19. ตัวนำรูปทรงกลมรัศมี 15 และ 18 ซม. ต่างก็มีประจุอันละ 275 หน่วย  
ไฟฟ้าสถิต เวลาเอาตัวนำสองอันนี้สัมผัสกัน หนึ่งอันจะเสียประจุ และเสียไปเท่าใด  
และให้หาศักดาเมื่อสัมผัสกันแล้ว  $(\text{อันที่ 1 เสียประจุ } 20; 16.67)$

20. ตัวนำรูปทรงกลม A มีรัศมี 16 ซม. สัมผัสอยู่กับตัวนำรูปทรงกลม B  
รัศมี 10 ซม. ถ้าเราเอาประจุไปปล่อยบนตัวนำ A - 180 หน่วย เมื่อแยกตัวนำออกจากกัน  
ศักดาของมันจะเป็นอันละเท่าใดและจะมีประจุอันละเท่าใด  $(-5; -80, -50)$

### ตอน ง. พลังงานศักยะ

21. ตัวนำมีความจุ 6 หน่วย e.s. และศักดา 80 หน่วย e.s. มีพลังงาน  
ศักยะเท่าใด  $(19200 \text{ เอจวร์ก})$

22. ตัวนำมีศักดา 120 วอลต์ และประจุ 10 คูลอมน์จะมีพลังงานศักยะเท่าใด  
(หน่วยเรียกว่าวอลต์ Watt)  $(600)$

23. ตัวนำทรงกลมรัศมี 5 และ 15 ซม. มีประจุอันละ + 10 หน่วย จงหา  
ว่าเดิมรูปทรงกลมนี้มีพลังงานศักยะอันละเท่าใด เมื่อสัมผัสกันจะมีพลังงานศักยะอันละ  
เท่าใด และพลังงานศักยะทั้งหมดจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงเท่าใด

$(\text{ก. } 10, 3 \frac{1}{2}, \text{ ข. } 2 \frac{1}{2}, 7 \frac{1}{2}, \text{ ค. } 3 \frac{1}{3})$

24. ตัวนำสองอันมีความจุอันละ 4 และ 5 หน่วย e.s. อันที่หนึ่งมีศักดา + 5 หน่วย  
และอันที่สองมีศักดา + 10 หน่วย เมื่อต่อกันเข้า พลังงานศักยะจะลดลงเท่าใด

$(\text{ลด } 30 \text{ เอจวร์ก})$

25. ตัวนำสองอันมีความจุ 18 และ 30 หน่วย เมื่อเอาตัวนำทั้งสองอันนั้นสัมผัสกัน ปรากฏว่าอันแรกมีศักดาตดลง 10 หน่วย อันที่สองมีศักดาเพิ่ม 6 หน่วย และประจุทั้งหมดเป็น 240 หน่วย จงหาพลังงานศักยะของตัวนำทั้งสองอัน ก่อนสัมผัสและหลังสัมผัสว่าจะมีอันละเท่าใด และพลังงานศักยะลดลงเท่าใด

(ก. 2025, 15, ข. 225, 375, ค. ๑๓ 1440)

## บทที่ 8

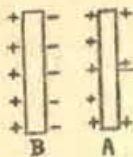
### เครื่องมือไฟฟ้าสถิต

#### 1. คอนเดนเซอร์และความจุของคอนเดนเซอร์ ( Condenser )

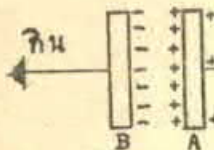
เครื่องควบแน่นหรือคอนเดนเซอร์คือเครื่องสำหรับเก็บประจุ และเหตุผลที่มันเก็บประจุได้มาก ๆ จะได้ทราบจากหลักดังที่จะได้อธิบายต่อไปนี้



ก. ตัวนำ A ต่ออยู่กับเครื่องทำไฟฟ้าหรือแบตเตอรี่ D



ข. เมื่อนำตัวนำ B เข้ามาการเหนี่ยวนำเกิดขึ้น และประจุบน A เพิ่ม



ค. เมื่อต่อ B ลงดินประจุบน B มีอยู่ชนิดเดียว และประจุบน A และ B เพิ่ม

รูปที่ 90

เมื่อเรานำแผ่นโลหะ A ต่อเข้ากับเครื่องทำไฟฟ้า D โดยจุด D อาจเป็นหม้อ  
แบบเคอร์ ซึ่งมีขั้วหนึ่งต่อลงดิน หรือเครื่องทำไฟฟ้าชนิดแบบจิมเซดส์ก็ได้ เครื่องมือ  
จะทำให้ศักดาของ A เป็นบวก (หรือลบ) และมีค่าคงตัวเท่ากันเสมอ เมื่อ A  
อยู่โดยลำพัง (รูป ก.) ประจุบน A ก็จะมีค่าคงตัว

ถ้าเรานำเอาตัวนำ B อีกอันหนึ่งเข้ามาใกล้ A ก็จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นบน B  
เนื่องจาก A (รูป ข.) และ B ก็จะมีศักดาเหนี่ยวนำเป็นบวก ประจุด้านใกล้กับ A เป็นลบ  
ที่แรกมันจะทำให้ศักดาของ A ลดลงกว่าเดิม ดังนั้น เพื่อจะดำรงให้ศักดาของ A ซึ่งต่อ  
อยู่กับตัวมันคงตัว เครื่องไฟฟ้า D ก็จำเป็นต้องส่งประจุบวกมาอีก จนศักดาของ  
A เท่ากับศักดาของมัน ฉะนั้นในรูป ข. A จะมีประจุบวกเพิ่ม

ถ้าต่อ B ลงดิน B ก็จะมีแค่ประจุลบเหลือ เพราะตัวอิเล็กตรอนวิ่งมา  
ทำลายประจุบวกของมันหมด ฉะนั้น B ก็จะมีเหนี่ยวนำ A ได้ยิ่งขึ้น ศักดาของ A  
ก็จะลดลงมากขึ้น ด้วยเหตุผลอันเดียวกับข้างบน A ก็จะได้รับประจุจากเครื่องไฟฟ้า  
D มากขึ้นอีก ในเวลาเดียวกันประจุบน B ก็เพิ่มขึ้น (รูป ค.) การเหนี่ยวนำ  
นาระหว่าง A และ B กลับไปกลับมาเช่นนี้ ทำให้ A และ B มีประจุเพิ่มขึ้นจนถึง  
ค่าสูงสุด ตามที่ได้ทราบมาแล้วจากบทก่อนๆ การเหนี่ยวนำจะมากขึ้นเมื่อ A และ  
B ยังอยู่ใกล้กัน นั่นคือประจุบน A และประจุบน B จะเพิ่มขึ้น เมื่อเลื่อน  
A และ B เข้าหากัน (แต่ไม่ใช่จนสัมผัสกัน และให้ไฟฟ้าไหลผ่านได้) และ  
จำนวนประจุจะคงตัว เมื่อระยะระหว่าง A และ B คงตัว

ดังนั้นเราอาจรวมความได้ว่า ความจุของ A จะเพิ่มขึ้น เมื่อ A และ B  
อยู่ใกล้กันเข้า นั่นเป็นเพราะประจุเพิ่ม แต่ศักดาของ A ยังคงตัว เนื่องจาก  
เครื่องมือ D

ฉะนั้น เราจึงใช้หลักอันนี้สำหรับสร้างคอนเดนเซอร์ขึ้น บางที่แทนที่ด้วย B  
ลงดิน เราคือ B เข้ากับขั้วลบของเครื่องไฟฟ้า D ผลก็จะเช่นเดียวกัน

จากที่ได้อธิบายมาแล้วนี้ ควรสังเกตว่า เมื่อเรานำเอาตัวนำที่มีประจุบวกมาใกล้ตัวนำที่ต่อลงดิน หรือมาใกล้ดิน ศักดาของตัวนำที่เราเอาเข้ามานั้นก็ลดลง แม้ประจุบนตัวมันเองจะคงตัว เพราะไม่มีเครื่องส่งประจุไฟฟ้าบวกให้แก่มันเพื่อกลับไปมีศักดาเท่าเดิมอีก แต่นั่นก็เพราะความจุของมันเพิ่มขึ้นเอง ถ้าตัวนำที่นำเข้ามานั้นมีประจุลบ ผลก็จะตรงกันข้ามกับที่ได้อธิบายมาแล้ว

เราอาจจะให้นิยามของความจุของคอนเดนเซอร์ ว่า “ความจุของ คอนเดนเซอร์อันหนึ่ง จะมีค่าเท่ากับประจุที่กระทำให้ศักดาต่างระหว่างแผ่นโลหะทั้งสองเป็นหนึ่งหน่วย” หรือความจุของคอนเดนเซอร์อันหนึ่ง คือ ส่วนอัตราส่วนระหว่างปริมาณของประจุบนแผ่นตัวนำอันหนึ่ง และศักดาต่างระหว่างตัวนำทั้งสอง ถ้าเราจัดศักดาต่างเป็นวอลต์ และปริมาณไฟฟ้าเป็นคูลอมบ์ ความจุของคอนเดนเซอร์ก็จะเป็นฟารัดอย่างแค่นั้น

เราทราบมาจากการทดลองคอนเดนกันแล้วว่า ตัวนำสองอันซึ่งมีขนาดเท่ากัน แต่กำลังไฟฟ้าล้อมรอบไม่เหมือนกัน จะมีประจุ นั่นคือความจุไม่เท่ากัน สำหรับคอนเดนเซอร์ที่เช่นเดียวกัน ความจุของมันนอกจากจะอาศัย ขนาด ลักษณะ และระยะระหว่างตัวนำแล้ว มันยังต้องอาศัยระยะที่มันอยู่โดยเฉลี่ยอีกด้วย และความจุของมันจะมีค่าคงตัว ถ้าสิ่งเหล่านี้ไม่เปลี่ยนแปลง

## 2. โลเดินจา คอนเดนเซอร์ และไดอิเล็กตริก

ส่วนประกอบที่สำคัญของคอนเดนเซอร์ ก็คือ ตัวนำสองอัน วางขนานกัน ระหว่างกลางมีฉนวนซึ่งเราเรียกว่า ไดอิเล็กตริกกัน ไดอิเล็กตริกบางทีก็เป็นอากาศ แต่ถึงแม้ว่าอากาศจะเป็นฉนวนที่ดีมากก็จริง ประกายไฟฟ้าอาจจะผ่านได้ง่าย การที่เป็นเช่นนั้น ก็เนื่องมาจากผลการเคลื่อนไหวของโมเลกุลของอากาศนั่นเอง โดยการเคลื่อนไหวของโมเลกุลเหล่านี้ ประจุไฟฟ้าจึงข้ามไปมาได้ง่าย ฉะนั้นเราจึงพูดว่า อากาศต้านทานศักดาต่างหรือความดันของไฟฟ้าไม่ค่อยได้ดี ด้วยเหตุนี้ อากาศจึงไม่

เหมาะสำหรับทำคอนเดนเซอร์ เมื่อแผ่นตัวนำอยู่ใกล้กันมาก หรือเมื่อต้องการจะให้แผ่นตัวนำทั้งสองมีศักดาต่างกันมาก ดังนั้นจึงจะเป็นไดอิเล็กตริกได้ดี นอกจากจะเป็น ฉนวนที่ดี แล้ว ควรต้องมี ความต้านทานต่อศักดาต่าง ๆ ได้ดี และควรมี ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกมาก บัญชีต่อไปนี้ แสดงสมบัติของไดอิเล็กตริกต่าง ๆ ซึ่งอาจใช้ทำคอนเดนเซอร์ได้

ก. บัญชีแสดง ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก K (Dielectric Constant)

| ฉนวน    | K   | ฉนวน   | K         |
|---------|-----|--------|-----------|
| อากาศ   | 1   | เซตแตก | 2.9 - 3.7 |
| เทียนไข | 2.3 | ไมกา   | 5 - 8     |
| ยาง     | 2.5 | แก้ว   | 6 - 9     |
| ยางแข็ง | 3.2 |        |           |

ข. กระแสจะผ่านความหนา 1 ซม. เมื่อศักดาต่างมีค่าดังต่อไปนี้

| ฉนวน            | วอลต์ | ฉนวน             | วอลต์           |
|-----------------|-------|------------------|-----------------|
| อากาศ           | 3000  | ไมกา             | 5-60000         |
| กระดาษขมเทียนไข | 34000 | แก้วธรรมดา       | 16000           |
| ยางบริสุทธิ์    | 47000 | กระเบื้องแข็ง    | 18000           |
| ยางแข็ง         | 53000 | ยางหุ้มสายเคเบิล | 19000—<br>25000 |

ฉะนั้น ในการทำคอนเดนเซอร์ เราต้องเลือกเอาไดอิเล็กตริกที่มีค่าทั้งสองสูง เช่น แก้วและไมกา

แฟรงกลิน เป็นคนแรกที่คิดทำคอนเดนเซอร์ชนิดที่ใช้ไดอิเล็กตริกขึ้นแทนอากาศ เขาใช้แผ่นแก้วหรือเอปอไนต์ (ยางแข็ง) ซึ่งมีแผ่นตะกั่วบาง ๆ กระหนาบสองข้างเป็นตัวนำ

คอนเดนเซอร์แบบที่เหมาะสม และใช้กันแพร่หลายมาก คือ แบบของไลเดน (Leyden Jar) ซึ่งประกอบด้วยขวดแก้วปากกว้าง มีโลหะบางๆ เป็นกระบอกอยู่ทั้งข้างใน และข้างนอก ผ่าปิดเป็นฉนวนทำด้วยเซโบไนค์ ซึ่งมีปุ่มโลหะติดอยู่ข้างบน ปุ่มโลหะนี้



Leyden Jar

R = แท่งโลหะมีไข้อย่นลงไป

จุดแผ่นโลหะ T ภายใน

I = ฉนวนปิดปากขวด

T = Tinfoil หรือแผ่นโลหะบางๆ ของขวดแก้ว T



Leyden Jar

เมื่อผ่าครึ่ง, แสดง

แก้ว G และตัวก

บางๆ ทั้งสองข้าง

ของขวดแก้ว T

รูปที่ 91

ติดอยู่กับไข ซึ่งหย่อนลงไป

จุดโลหะด้านในของขวด เมื่อ

ขวดนี้คงอยู่บนโต๊ะ ในการ

ทดลอง โลหะด้านนอกของ

ขวดก็จะ “ ค่อยตึง ” เพราะ

โต๊ะเป็นฉนวนที่เฉว เพราะ

ฉะนั้น ในการประจุเครื่องมือ

ชนิดนี้ เราปล่อยประจุบน

แผ่นโลหะข้างในเท่านั้น และ

แผ่นโลหะด้านนอกซึ่ง “ ค่อยกับ

ดิน ” ก็จะมีประจุอีกชนิด

หนึ่งเอง โดยไม่ต้องเขาขวด

โยงมันลงดิน มีข้อควรสังเกต

ว่า เวลาเขาพูดว่า ประจุ

คอนเดนเซอร์แบบไลเดน ด้วยประจุบวกหรือลบ เขาหมายถึงชนิดของประจุ ที่เราให้แก่วิถีโลหะข้างในขวด ถ้าเป็นบวกหรือลบตามลำดับ

คอนเดนเซอร์แบบนี้มีขนาดเล็กๆ และมีความจุมาก ฉะนั้นถ้าใช้ขั้วเล็กโทรฟอรัส ประจุไฟฟ้าให้แก่มัน เราก็จะไม่ค่อยได้ศักดาสูง เมื่อเวลา มันมีศักดาสูงๆ ผู้ใช้ ควรระวัง ไม่สัมผัสปุ่มโลหะหรือฉนวนนอกของขวด มันอาจจะทำให้เราสั่นได้มากทีเดียว ถ้าศักดาหรือพลังงานศักยะของประจุมีสูงมาก

เราอาจทำคอนเดนเซอร์ได้ง่าย ๆ ดังนี้ ใช้ถ้วยแก้วเป็นไดอิเล็กตริก แล้ว  
เอากระป๋องสังกะสีสองอัน ซึ่งมีขนาดโตกว่ากันพอสมควร ให้เอาอันเล็กใส่ลงไปใน  
ถ้วยแก้ว แล้วเอาถ้วยแก้ววางลงไปในกระป๋องอันโต ถ้าจะให้ดียิ่งขึ้น ควรหา  
กระป๋องให้ผิวเรียบเสมอกับถ้วยแก้วพอดี และควรมีฉนวนดีห่อหุ้มกับกระป๋องชั้นใน  
สำหรับจะปล่อยประจุได้ดีและสะดวก

### 8. ค่าความจุของคอนเดนเซอร์ ชนิดต่าง ๆ — จำนวน

ก. ทรงกลมสองอันซ้อนกัน สมมติ  $r_1$  และ  $r_2$  เป็นรัศมี และมี  
ไดอิเล็กตริกที่มีค่าคงตัว  $K$  กัน  $r_1$  ยาวกว่า  $r_2$

$$\text{ความจุ} \quad C = K \frac{r_1 r_2}{r_1 - r_2} \quad (\text{คูณทุกอัน})$$

$$\text{ในอากาศ} \quad C = \frac{r_1 r_2}{r_1 - r_2} \quad K = 1$$

ข. แผ่นตัวนำสองอันขนานกัน (Parallel Plates Condenser) สมมติแผ่น  
ตัวนำพื้นที่แต่ละ  $S$  และอยู่ห่างกัน  $d$  และค่าคงตัวไดอิเล็กตริก  $K$

สำหรับการพิจารณา ที่แรกให้คิดว่ามีรูปทรงกลมสองอันซ้อนกันอย่าง ก.  
ถ้ารูปทรงกลมทั้งสองนี้ใหญ่มาก  $r_1$  และ  $r_2$  ก็จะยาวมาก และสมมติต่างก็เกือบเท่า  
กับ  $r$  และสมมติ ระยะระหว่างตัวนำ  $d = r_1 - r_2$

$$\therefore \text{พื้นที่ของรูปทรงกลม} = 4\pi r^2$$

$$\text{และสมมติว่ามีประจุบนผิว} = Q$$

$\therefore$  ประจุบนผิว  $S$  (ส่วนเล็ก ๆ ส่วนหนึ่งของรูปทรงกลม ซึ่งเราจะถือได้

$$\text{จำนวน}) \quad Q_s = \frac{Q}{4\pi r^2} \times S$$

แต่ศักดาต่างระหว่างแผ่นโลหะทั้งสองนี้ สำหรับตัวนำทรงกลมสองอัน

$$= \frac{Q}{K r_2} - \frac{Q}{K r_1} = \frac{Q}{K} \left( \frac{r_1 - r_2}{r_1 r_2} \right)$$

แต่นี้ก็เท่ากับศักดาต่าง  $V_s$  ระหว่างแผ่นโลหะทั้งสองสำหรับส่วนเล็ก ๆ  $S$  ของรูปทรงกลมมนด้วย

$$\therefore V_s = \frac{Q}{K} \left( \frac{r_1 - r_2}{r_1 r_2} \right) = \frac{Q d}{K r^2}$$

$$\therefore \text{ความจุ } C_s = \frac{Q_s}{V_s}$$

$$= \frac{Q S}{4 \pi r^2} / \frac{Q d}{K r^2}$$

$$= K \frac{S}{4 \pi d}$$

หรือจะคิดเขาง่าย ๆ เช่นนกโต ให้ถือว่าพื้นที่  $S$  ของจานเป็นส่วนเล็ก ๆ ของรูปทรงกลมใหญ่สองอัน เพราะฉะนั้นความจุของคอนเดนเซอร์นี้

$$= \frac{\text{พื้นที่ของจาน}}{\text{เนื้อที่ของรูปทรงกลม}} \times (\text{ความจุของทรงกลมข้อนี้ ๆ กัน})$$

$$= \frac{S}{4 \pi r^2} \times K \frac{r_1 r_2}{r_1 - r_2}$$

$$= K \frac{S}{4 \pi d} \quad (\text{เพราะ } r_1 r_2 = r^2, r_1 - r_2 = d)$$

ถ้าไดอิเล็กทริกเป็นก๊าซหรืออากาศ  $K = 1$  ความจุ  $= \frac{S}{4 \pi d}$

ก. กระบอกตัวนำสองอันวางอยู่บนแกนอันเดียว

ถ้า  $r_1, r_2$  เป็นรัศมีของกระบอกสองอัน ( $r_1$  ยาวกว่า  $r_2$ )

และ  $l$  เป็นความยาว  $K$  เป็นค่าคงตัวไดอิเล็กตริก

$$\log_e x = .4343 \log_{10} x$$

$$\text{จากคำนวณได้ว่า } C = K \frac{l}{2 \log_e \frac{r_1}{r_2}} = \frac{K l}{.8686 \log \frac{r_1}{r_2}}$$

ง. ความจุของแผ่นโลหะบาง, กลม, และรัศมี  $r$  ซึ่งไม่ต่อกันอะไร

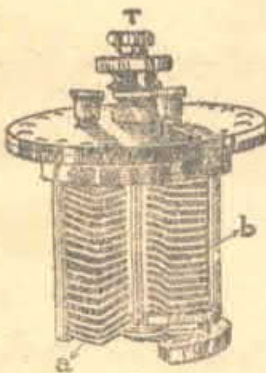
$$= \frac{2\pi r}{\pi} \quad \text{ในอากาศ}$$

จ. ความจุ ของสวดรัศมี  $r$  และห่างจากพื้นดิน  $h$  (เช่นสายโทรเลข)

$$= \frac{1}{2 \log_e \frac{2h}{r}} \quad \text{คอตหนึ่ง ซม.}$$

หมายเหตุ

เพื่อความสะดวกในการใช้ และเหมาะสมกับเครื่องบางชนิด บางที



รูปที่ 92

Variable Condenser

T ที่สำหรับหมุนให้ความจุเปลี่ยน

a และ b เป็นพวกแผ่นโลหะ

สองพวก

เขาสร้าง คอนเดนเซอร์ ชนิดที่ความจุเปลี่ยนแปลง

ได้ (Variable Condenser) คอนเดนเซอร์ ชนิดนี้

มีหลายอย่างเช่น แบบรูปกระบอกและแบบจานแบนๆ

สำหรับชนิดกระบอก เราอาจทำให้ความจุของมัน

เปลี่ยนได้โดยเปลี่ยนความยาวของพื้นที่ซ้อนของกระบอก

นั่นคือ โดยดึงกระบอกเข้าออก เมื่อกระบอกทั้ง

สองอันซ้อนกันมาก ความจุจะมากเมื่อซ้อนกันน้อย

ความจุจะลด สำหรับชนิดที่สอง เขาใช้แผ่นโลหะ

แบนๆ ซ้อนกันเป็นชั้น แต่ไม่ให้สัมผัสกัน แผ่นโลหะ

นี้แบ่งออกเป็นสองพวกวางสลับกัน พวกหนึ่งอยู่กับที่



รูปที่ ๑๓

แสดงการซ้อนกันระหว่างแผ่นโลหะ

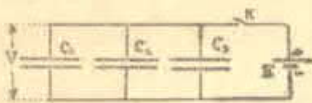
พวก a และ b เมื่อหมุน T

สำหรับหมุนรับวิทยุ ก็คือที่สำหรับหมุนเปลี่ยนความถี่ของ คอนเดนเซอร์ นั้นเอง (ดูรูป) เมื่อ ความถี่ ของเครื่องรับวิทยุของเราเปลี่ยนไป “ความถี่” ของเครื่องเราก็ก่เปลี่ยนไป เมื่อ “ความถี่” ของเครื่องเรากับ “ความถี่” ของสถานีที่ตั้ง ก็จะได้ยินเสียง เรืองขึ้นเหมือนกับ “ความถี่” ในวิชาเสียง ( Resonance )

#### 4. การต่อคอนเดนเซอร์หลาย ๆ อัน

วิธีต่อมีสองวิธี คือ ขนาน และอนุกรม

ก. วิธีต่ออย่างขนาน คือ เอาแผ่นหนึ่งของ คอนเดนเซอร์ ทุก ๆ อันต่อเข้า ด้วยลวดเส้นเดียวกันหรือต่อไปรวมที่จุดเดียวกัน อีกข้างหนึ่งก็ต่อเช่นเดียวกัน แล้วทั้ง สองข้างนี้ต่อไปยังเครื่องมีคลื่น ดังในภาพ



รูปที่ ๑๔

E คือ หม้อแบตเตอรี่

K คือ ค

สมมุติ คอนเดนเซอร์ ที่มีค่าความถี่  $C_1, C_2, C_3$  ต่อ กับหม้อไฟฟ้า E คอนเดนเซอร์ ทุก ๆ อันจะมี ศักดิ์เท่ากันและเท่ากับ V และเมื่อประจุไฟฟ้าแล้ว สมมุติว่าเราได้ไฟฟ้า  $Q_1, Q_2, Q_3, \dots$  ออกมาจาก  $C_1, C_2, C_3, \dots$  ตามลำดับ

∴ ประจุทั้งหมดที่เราจะได้  $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \dots$

ถ้า  $C$  เป็นความจุทั้งหมดของคอนเดนเซอร์ทุกอันเพราะต่างก็มีศักดา  $= V$

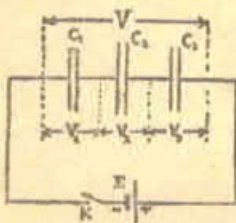
$$\therefore CV = C_1 V + C_2 V + C_3 V \dots \dots \text{โดยแทนค่า}$$

$$CV = V \{ C_1 + C_2 + C_3 \dots \dots \}$$

$$\therefore C = C_1 + C_2 + C_3 \dots \dots$$

เพราะฉะนั้น เมื่อ คอนเดนเซอร์ต่อกันเป็นขนาน ความจุรวมจะเท่ากับผลบวกของความจุของ คอนเดนเซอร์ ทุก ๆ อัน

ข.. วิธีต่ออย่างอนุกรม เราต่อ คอนเดนเซอร์ เรียงกัน ข้างหนึ่งของ คอนเดน



รูปที่ 95

E คือ แบตเตอรี่

K คือ ค

เซอร์อันหนึ่ง ต่อกับอีกข้างหนึ่งของอีกอันหนึ่ง ต่อ ๆ กันไปดังในภาพ ฉะนั้นศักดาต่างระหว่างแผ่นทั้งสองของคอนเดนเซอร์ทุกอันอาจไม่เท่ากัน และ  $V$  ศักดาทั้งหมดระหว่างจุด A และ B จะเท่ากับผลบวก ของ ศักดา ต่าง ระหว่างแผ่นโลหะ ทั้งสอง ของ คอนเดนเซอร์ ทุก ๆ อัน

$$\therefore V = V_1 + V_2 + V_3 + \dots \dots$$

ฉะนั้นถ้า  $Q$  และ  $C$  คือประจุและความจุทั้งหมดและ  $C_1, C_2, C_3 \dots \dots$  เป็น ความจุของ คอนเดนเซอร์ อันที่ 1, ที่ 2, ที่ 3, ตามลำดับ จากสิ่งเหล่านี้เราเห็นได้ทันทีว่า ถ้าประจุทั้งหมดเป็นเท่าใด คอนเดนเซอร์ ทุก ๆ อันก็จะมีประจุเท่ากันหมด

$$\therefore \frac{Q}{C} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3} + \dots \dots$$

$$\therefore \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots \dots$$

ฉะนั้นเมื่อคอนเดนเซอร์คือแบบอนุกรม เศษหนึ่งส่วนความจุรวมจะเท่ากับ  
ผลบวกของ เศษหนึ่งส่วน ความจุของทุกๆ อัน

โจทย์ ตัวอย่างเกี่ยวกับการรวมความจุ

คอนเดนเซอร์สามอันมีความจุ 10, 20, และ 15 หน่วย จงหาความจุรวม

ก. เมื่อ คอนเดนเซอร์ คือเป็นขนานทั้งหมด

ข. ,, ,, ,, อนุกรมทั้งหมด

ก. เมื่อค่อกันเป็นขนาน

$$\text{ความจุ รวม} = 10 + 20 + 15 = 45 \text{ หน่วย}$$

ข. เมื่อค่อกันเป็นอันดับ ถ้าความจุรวม = C

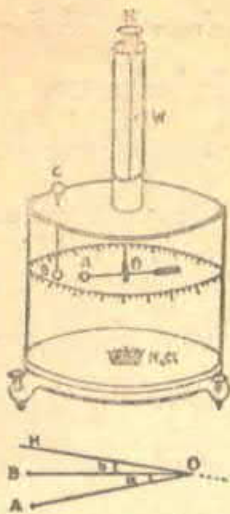
$$\frac{1}{C} = \frac{1}{10} + \frac{1}{20} + \frac{1}{15} = \frac{6 + 3 + 4}{60} = \frac{13}{60}$$

$$\therefore \text{ความจุรวม} = \frac{60}{13} = 4 \frac{8}{13}$$

## 5. เครื่องวัดไฟฟ้าสถิตต่าง ๆ

ในวิชาไฟฟ้าสถิต เราใช้เครื่องมือหลายชนิด สำหรับใช้วัดประจุ เปรียบเทียบประจุ หรือวัดศักย์และเปรียบเทียบศักย์ ดังจะอธิบายต่อไปนี้

ก. ตาชั่งความบิด (Torsion Balance) เครื่องมือชนิดนี้อาศัยหลักเดียวกันกับเครื่องมือซึ่งเคยดูกับในวิชาแม่เหล็ก และส่วนประกอบก็คล้ายกัน ผิดแต่เพียงว่าเรามีตุลกกถมนเล็กๆ ต้องอัน ขนาดเท่ากัน แทนแม่เหล็ก เมื่อจะหาค่าของประจุเราเอาประจุไฟฟ้าไปไว้บน



Torsion Balance

A และ B เป็นบัพสำหรับ  
ปล่อยประจุขนาดเท่ากัน  
W คือน้ำหนักสำหรับแขน A  
H เป็น Torsion Head

รูปที่ 96

ตุลกลมตุลกลึงซึ่งอยู่กับที่ แล้วนำเอาตุลกลึงที่แขน  
เข้ามาให้สัมผัสกัน ประจุก็จะแบ่งออกเป็นสองพวกเท่า ๆ  
กัน แล้วมันก็จะผลักกัน แล้วเราจะพิสูจน์ได้ว่า

$$q^2 = k (a + b) \sin \frac{a}{2} \tan \frac{a}{2}$$

$q$  = คือ คิวบ์ของประจุที่เราต้องการทราบค่า

$k = 4 \times$  (ระยะจากตุลกลึงที่แขน ถึง เชือกที่แขน)  
 $\times$  ค่าคงตัวของเชือกที่แขน

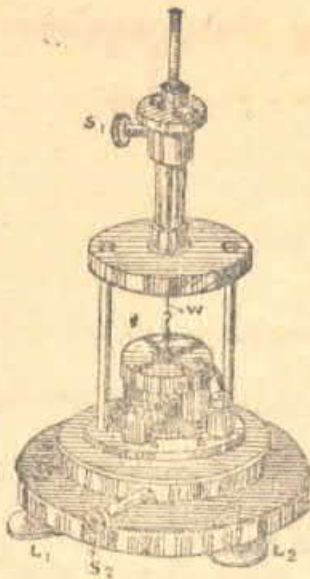
$a$  = มุมระหว่างตุลกลึงทั้งสอง

$b$  = มุมระหว่าง ที่อยู่เดิม ของตุลกลึงที่แขน และ  
ตุลกลึงที่อยู่กับที่

$a + b$  = มุมที่วัดถูกบิด (หรือมุมที่ Torsion  
Head หมุนไป)

ข. อิเล็กโตรมิเตอร์ ควอดรนต์ หรือ “จัตุรัสกอล” Quadrant  
Electrometer

เคลวินและโกลเดชาเดค สร้างเครื่องมือชนิดนี้ขึ้นมีแผ่นโลหะทองสี่อัน อัน  
หนึ่ง ๆ เป็น  $1/4$  ของวงกลม แล้วประกอบกันเข้าเป็น “วงกลม” ดังในภาพ  
เขาหล่อแผ่นโลหะตรงกันข้ามเข้าหากันเพื่อให้หักงอเท่ากัน ตรงกลางแผ่นโลหะเหล่านี้  
มีเส้นทำด้วยโลหะบาง ๆ ซึ่งแขวนอยู่โดยเส้นดอตเล็ก ๆ หรือ ไยควอร์ตซ์ (quartz fibre)  
บนเส้นดอตนี้มีกระจกแว่นเล็ก ๆ ติดอยู่ และมีสำหรับสอดเข็มนิยังหม้อแบบเคอร์ ซึ่ง  
อาจทำให้เกิดหักงอได้ราว 100 องศา เวลาใช้เราต้องคู้ทั้งสองของโลหะเข้ากับดิ่งที่เรา



Quadrant Electrometer

L<sub>1</sub> และ L<sub>2</sub> สำหรับจลัระดับS<sub>2</sub> เครื่องตรระดับ

A และ B คือที่ต่อ

รูปที่ 97

ต้องการวัดหรือเปรียบเทียบศักดา ถ้าศักดาบน  
ควอดรันต์เท่ากันหมด เข็มก็จะไม่เหวี่ยง แต่  
ถ้าศักดาต่างกัน เข็มก็จะเหวี่ยง ศักดาต่างกัน

มาก เข็มก็จะเหวี่ยงมาก เราจะดูว่าเข็มเหวี่ยง  
หรือน้อย ได้จากกระแสเข็มเล็ก ๆ ซึ่งได้

กล่าวถึงแล้วคือ เมื่อตั้งแสงขนานเข้าไปบนกระแส  
นี้ มันก็จะสะท้อนแสงไปบนสเกล บอกว่า

เข็มเหวี่ยงมากหรือน้อย เครื่องมือแบบนี้ไว้มาก  
และใช้วัดศักดาไฟฟ้าได้แม่นยำมาก และบางที

เหมาะกว่าใช้เครื่องโครสโกปแผ่นทอง และเครื่อง  
มือที่เราทำขึ้นสำหรับวัดศักดาต่าง หรือแรงเคลื่อน

ไฟฟ้ามาก ๆ เขาก็ใช้หลักเดียวกันกับเครื่องมืออื่น  
แต่แทนที่ ๆ เราจะแฉกเข็มด้วยดวง เขาให้เข็ม

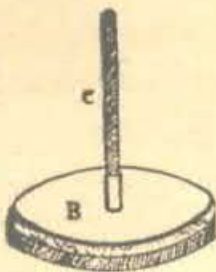
หมุนรอบศูนย์กลางของมัน และใช้นาฬิกเป็น  
เครื่องวัดกับแรงดึงดูดหรือผลักของไฟฟ้า

## 6. เครื่องทำไฟฟ้าสถิตชนิดต่าง ๆ

ในที่นี้จะอธิบายอย่างละเอียดแต่เพียงสองชนิด คือเครื่องโครฟอรัสกับเครื่อง  
เหนี่ยวนำแบบวินเชสต์

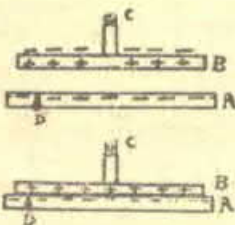
ก. อีเล็กโตรฟอรัส Electrophorus เครื่องมือประกอบด้วยฉนวน A ซึ่ง  
วางอยู่ข้างล่าง และแผ่นโลหะ B ซึ่งมีด้าม C เป็นฉนวนสำหรับจับ

แผ่นฉนวนทำด้วยยางแข็ง (ebonite), ครั่ง หรือกำมะถันก็ได้ เราทำให้  
เกิดประจุบนแผ่นฉนวนนี้ โดยถูมันด้วยขนสัตว์หรือแพะ ประจุบนฉนวนนี้จะเหนี่ยวนำ



อเล็กโตรฟอรัส

รูปที่ 98



ก. เมื่อนำ B เข้ามาใกล้ ๆ A

เกิดการเหนี่ยวนำขึ้น

ข. เมื่อวางทับกันและต่อ B

ลงดิน เราได้ประจุเหนี่ยวนำ

รูปที่ 99

แต่นำเอาแผ่นโลหะ B เข้ามา ก็เกิดการเหนี่ยวนำขึ้น พลังงานของแผ่นโลหะจะเป็นบวก ช่างบนจะเป็นลบ ถึงแม้ว่าเราวางตัวนำบนฉนวน A การเหนี่ยวนำก็ยังจะมีอยู่ เพราะประจุดึงออกจาก A ไปยัง B ได้น้อยมาก (เหตุผล ผิวนอกของ A ชรุวระ และประจุออกจาก A มายัง B ได้น้อย และเนื่องจากจุดที่ผิวของ A และ B แตะกันเท่านั้น เพราะ A เป็นฉนวนไฟฟ้าไหลจากที่ไม่ได้) ถ้าเราต้องการประจุบวกบนตัวนำ B เราก็เอามือไปแตะ B หรือต่อมันลงดิน (เหตุผล เกี่ยวกับการเหนี่ยวนำ) เราอาจแสดงโดยใช้อเล็กโตรสโคปได้ว่า เราได้ประจุมาก โดยวิธีนี้ แต่ถ้าหากว่าเอาแผ่นโลหะไปวาง แต่ว่านำขึ้นโดยไม่ได้แตะด้วยมือ หรือ ต่อลงดิน จะได้ประจุบนตัวนำ B น้อยมากหรือแทบไม่ได้เลย

เมื่อแผ่นโลหะมีประจุโดยการเหนี่ยวนำเช่นนี้

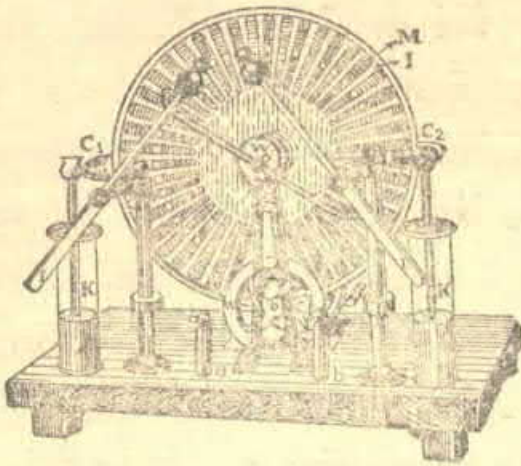
เมื่อ ยกมัน ออกจาก ฉนวน A แผ่นโลหะนั้น ก็จะมีพลังงานศักยะ

เพราะมันยังทำงานยังไม่ได้ นอกจาก

จะปล่อยให้มันไหล พลังงานศักยะบนตัวนำนี้ได้มาจากงานที่เราทำในการยก B ขึ้น และในการนำออกแรงต้านแรงดึงดูดระหว่างประจุบนตัวนำและฉนวน ฉะนั้นพลังงานศักยะนี้จะค่อยเพิ่มจนจนถึงค่าสูงสุด เมื่อมันค่อยออกห่างจากแผ่นฉนวน

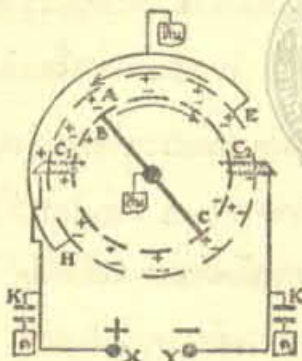
ในเครื่องบางชนิด มีจานโลหะรองฉนวน และมีแท่งโลหะแตะแผ่นฉนวนขนาดสัมผัสกับโลหะ B เมื่อวาง B ลงบน A B ก็ถูกต่อลงดินทันทีโดยไม่ต้องใช้มือ

# 7. เครื่องกลวิมเซสต์ Wimsburt's Machine



ก. เครื่องเหนี่ยวนำวิมเซสต์  
M คือปุ่มโลหะอยู่บนฉนวน I  
W เครื่องหนีจากฉนวน

รูปที่ 100



ข. เครื่องเหนี่ยวนำของวิมเซสต์  
แสดงการเกิดประจุ  
รูปที่ 101

เครื่องมือของวิมเซสต์นี้ ประกอบ  
ด้วยแผ่นฉนวนกลมๆ สองแผ่น มีปุ่ม  
โลหะวางระยะห่างกันเท่าๆ กันอยู่ใกล้  
ขอบ ปุ่มโลหะเหล่านี้ไม่ติดต่อกันและ  
มีจำนวนเป็นคู่ แผ่นฉนวนทั้งสองมี  
จำนวนปุ่มเท่ากัน

เพื่อจะเขียนภาพให้เห็นชัด เราจะ  
เขียน วงกลม สอง วงแทน แผ่น ฉนวน  
และปุ่มเป็นเส้นตำรายรอบวงกลม และ  
เขียนให้วงกลมไม่เท่ากัน (ความจริง  
แผ่นฉนวนมีขนาดเท่ากัน) ดูภาพ ก.  
สำหรับดูประกอบคำอธิบาย ดูภาพ ข.  
แผ่นฉนวน ทั้งสองจะ หมุนรอบ แกน  
ผ่านศูนย์กลางอันเดียวกัน แต่ หมุนไป  
คนละข้าง

ปุ่มโลหะสองปุ่มซึ่งอยู่ตรงกันข้าม  
ติดต่อกันโดย แปรง ที่ปลาย Neutral  
rod ที่ B และ C (เรียกว่า Neutral rod  
เพราะเรา ตีมันลงดิน ที่จุดกึ่งกลาง  
เพื่อให้มันกลายเป็นศูนย์ neutral) และ  
สำหรับ อีกแผ่น หนึ่ง ก็มี Neutral rod  
และแปรง สอง ปลาย คือที่ปุ่ม E และ  
H Neutral rod ทั้งสองอันวางไว้  
กันดังในภาพ และต่างทำมุมราวๆ

$45^\circ$  กับแนวขนาน ข้างๆ ตามแนวขนาน มี ที่เก็บประจุ (Combs) รูป คล้าย  
หัวของเข็ม  $C_1$  และ  $C_2$  หัวเก็บประจุนี้ มีที่ติดตรงไปยัง ปุ่มโลหะกลมๆ X และ Y

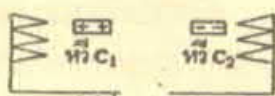
และบางทีมี คอนเดนเซอร์ K ต้องอันดับอยู่ข้างละอัน อีกข้างหนึ่งของคอนเดนเซอร์นี้ ต่อลงดินหรือต่อเข้าหากัน

### เหตุผลที่เกิดประจุและที่เราเก็บประจุได้

เมื่อเราหมุนเครื่องมือนี้น ตามลูกศร (ซึ่งจะเกิดไฟฟ้า ถัดจากการหมุนไปอีก ทางต้องกดัมแปร่งให้ไขว้กันคนละข้าง) เนื่องจากการเสียดสี ก็ย่อมจะเกิดไฟฟ้าขึ้นบ้างเล็กน้อย ซึ่งจะเป็นเหตุให้เกิดการเหนี่ยวนำได้ต่อไป

สมมติเกิด ประจุบวก ขึ้นที่ปุ่มโลหะข้างบนของอันนอก พอมันมาถึงจุด A มันก็จะเหนี่ยวนำ B C ก็จะได้ ลบที่ B และ บวกที่ C พอปุ่มรอบในอันอื่นมาถึง B ปุ่มรอบนอกมาถึง A ก็เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นเช่นเดิม และพอผ่าน B ไปแล้ว ปุ่มเหล่านี้จะมีประจุติดไปด้วย พอพวกรอบในมาถึง E มันก็จะเหนี่ยวนำแปลง E H (E ไม่มีประจุ เพราะเพิ่งปล่อยให้แก้ หัว  $O_2$ ) ทำให้ E มีประจุบวก และ H เป็นลบ เช่นเดียวกัน พอปุ่ม E มาถึงที่ A มันก็จะเหนี่ยวนำปุ่มที่มาถึง B ดังก็จะเหนี่ยวนำกันไปมาเช่นนี้ โดยเหตุผลอันเดียวกัน ก็เกิดการเหนี่ยวนำระหว่างปุ่มที่ผ่านปลายแปร่งข้างล่าง แต่ประจุที่เกิดขึ้นจะต่างชนิดกับประจุที่เกิดขึ้นข้างบน (ดังเกิดที่ ปลาย B ข้างบนเป็นลบ ปลาย C ข้างล่างเป็นบวก) ฉะนั้นเวลามาถึง หัว  $O_1$  จึงได้ประจุบวกจากปุ่มบนแผ่นฉนวนทั้งสอง และได้ประจุลบบนหัว  $O_2$

หัว ความเป็นจริงไม่จำเป็นต้องสัมพันธ์กับปุ่มโลหะเลย เครื่องมือโดยมาก



รูปที่ 103

- ก. หัว  $O_1$  เก็บประจุบวกจากปุ่มบวก  
ข. หัว  $O_2$  เก็บประจุลบจากปุ่มลบ

เมื่อปุ่มนำเอาประจุบวกหรือลบผ่านมา ก็จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นดังในภาพ แต่ด้วยเหตุที่ว่าประจุ ชอบเข้าหาหรือออกจากปลายแหลมได้ง่าย เพราะประจุที่ปลายแหลมมีพลังงานศักย์มาก ประจุที่ปุ่มที่ถูกทำลายโดยประจุที่ปลายหัวพอดี และเราก็จะ

ได้ประจุไปเก็บไว้ที่ คอนเดนเซอร์ เมื่อเต็มแล้ว มันก็จะปล่อยออกมาเป็นประกายไฟโต ๆ (Sparks)

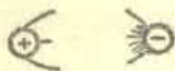
หน้าที่ของคอนเดนเซอร์ มันจะช่วยรวบรวมประจุไว้ให้มากจนเต็ม แล้วจึงปล่อย ด้วยเหตุนี้ เราจึงได้ประกายไฟโต ๆ และไม่เกิดชั้นคลอดเวลา ถ้าเอาคอนเดนเซอร์ออก (ไม่จำเป็นต้องเอาออกเลย เพียงแต่ไม่ต่อลงดิน หรือไม่ต่อขั้วของคอนเดนเซอร์ของอันเข้าหากันก็พอ) จะเห็นได้ทันทีว่า มีไฟผ่านช่องระหว่างปุ่ม X และ Y เรื่อย ๆ (ช่องต้องแคบพอ) แต่ไม่ค่อยสว่างนัก พอสื่อคอนเดนเซอร์เข้าอีก อาจดอย X และ Y ให้ห่างออกไปได้อีก แล้วก็บังเกิดประกายใหญ่ ๆ ประกายเหล่านี้เองทำให้เกิดการขยายตัวของอากาศ และนี่เองเป็นต้นเหตุให้เกิดคลื่นเสียงในอากาศที่เราได้ยินเบรียะ ๆ

ประโยชน์ของเครื่องมือ สำหรับทำประจุให้ได้มาก ๆ และเร็ว ๆ และให้เกิดกักตุนได้สูง ๆ เพื่อเลียนธรรมชาติบางอย่าง เช่น พัดผ่า พัดแถบ ใช้แสดงว่าชอบผ่านเข้าออกจากปลายแหลม ๆ ได้ดีกว่า และใช้ทำให้กระแสผ่านหลอดนีออนหรือสูญญากาศ กักตุนที่ทำงานได้ช้ากว่าค่าหลายหมื่นวอลต์ กักตุนที่ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านช่องอากาศ 1 ซม. มีค่าราว 30000 วอลต์ (จะมากหรือน้อยกว่านี้ แล้วแต่สภาพของอากาศ)

ตามภาษาอังกฤษ ประกายไฟที่เรามองเห็นมีสองชนิด คือ ชนิด Spark



Spark, ระเบิดห่าง



Brush, ระเบิดพอสัมผัส

และ Brush อันแรกคือประกายไฟที่เป็นเส้นตรง และเป็นทางใหญ่ ๆ อันที่สองคือประกายเล็ก ๆ แยกกันออกเป็นหลายทางคล้ายแปรง เมื่อมีประจุผ่านมาก ประกายก็เป็นชนิด Spark และ ถ้าน้อยเป็นชนิด Brush ลักษณะของ Spark หรือ Brush ที่ควบคุมหรือลบไม่เหมือนกัน ดังแสดงในภาพ

## 8. บรรยากาศ

ในอากาศของเรามีไฟฟ้าอยู่เสมอ มากหรือน้อยแล้วแต่สภาพของอากาศ ตามปกติ คักตาไฟฟ้าในอากาศเป็นบวก และเพิ่มขึ้นกับความสูงจากระดับพื้นทะเล ไฟฟ้าเหล่านี้อาจเกิดขึ้นได้หลายวิธี เช่น เนื่องจากแสงอาทิตย์, รัศมีคอสมิก, การหมุนของโลก ละอองน้ำเล็กๆ ในอากาศก็มีไฟฟ้า เมื่อละอองน้ำรวมกันเข้าเป็นเม็ดโต คักตาของมันก็จะเพิ่มขึ้น สำหรับก้อนเมฆใหญ่ๆ อาจมีคักตาบวกหรือลบได้สูงมาก ดังนั้นเมื่อก้อนเมฆเหล่านี้เคลื่อนมาใกล้กัน ไฟฟ้าก็จะวิ่งเข้าทำลายอำนาจกัน จึงเกิดมีเสียงฟ้าร้องหรือครางขึ้น แล้วแต่ปริมาณของไฟฟ้าและคักตาต่างของไฟฟ้าที่ไหลเข้าทำลายอำนาจกัน ( Neutralise )

ฟ้าผ่า ก็อยู่ในจำพวกเดียวกัน ผิดแต่ว่า ปริมาณไฟฟ้าและคักตาต่างมากกว่า มากจนเกิดประกายให้เห็นชัด แฉียงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากฟ้าผ่าหรือฟ้าร้อง แล้วแต่บรรยากาศหรือตัวกลางที่ไฟฟ้าผ่านไป และลักษณะของทางที่มันผ่านด้วย ถ้าทางสั้นและตรง เราจะได้ยินเสียงดังและชัดมาก ถ้าทางคดไปคดมา เสียงก็ออกจะสั้น ๆ แต่ที่เราได้ยินเสียงก้องกังวาลอยู่นาน ๆ นั้น เนื่องจากการสะท้อนไปมารองเสียงที่เกิดขึ้นครั้งแรก นั่นคือ ฟ้าร้อง

เมื่อประกายไฟฟ้าวิ่งผ่านวัตถุใด ๆ เช่น บ้าน, ต้นไม้ สิ่งเหล่านี้อาจเป็นอันตรายได้ เพื่อป้องกันหรือลดอันตรายเหล่านี้ ตามบ้านหรือตึกใหญ่ ๆ เขาจึงใช้ สายล่อฟ้าไว้บนหลังคา สายล่อฟ้าประกอบด้วย เสาโลหะปลายแหลม ๆ บักอยู่บนหลังคามีสาย ลวด ต่อลงมาสู่ดิน สิ่งเหล่านี้ต้องเป็น ตัวนำที่ดี มาก เช่น ทองแดง เมื่อมีประจุไฟฟ้าผ่านมา ก็จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นที่แท่งโลหะ และเกิดประจุคนละชนิดกับที่อยู่บนเมฆขึ้นที่แท่งโลหะ เพราะว่าปลายแท่งโลหะนี้แหลม ไฟฟ้าจึงผ่านเข้าหรือออกจากปลายแท่งโลหะนี้ได้ง่าย ๆ เพื่อจะไปรวมกันเข้า และลดคักตาของไฟฟ้าบนเมฆ แม้ว่าจะมีประกายไฟผ่านบ้าง อันตรายก็จะน้อย เพราะประจุทั้งสองชนิดจะรับ

ทำลายอำนาจกันได้เร็ว หรือไม่ก่ิงลงดินได้สะดวก ถ้าโลหะเป็นก้อนที่เตว ไฟฟ้าลง  
หรือชนจากดินไม่สะดวกพอ ชนคราวก็จะมีแก่งที่มันผ่านได้ ซึ่งเราเรียกว่า พ้าผ่า

## แบบฝึกหัดบทที่ 8

### การต่อคอนเดนเซอร์

1. คอนเดนเซอร์สองอันมีความจุ 80 และ 95 หน่วย จงหาความจุรวมเมื่อ  
ก. มันต่อเป็นขนานกัน ข. เมื่อมันต่อเป็นอนุกรมกัน (175) (47.71)
2. คอนเดนเซอร์อันหนึ่งมีความจุ 15 ฟารัด เวลาต่อเข้ากับแบตเตอรี่ (หม้อ  
ไฟหลายหม้อ) 100 วอลต์ มันจะเก็บประจุได้เท่าใด (1500 คูลอมบ์)
3. มีคอนเดนเซอร์ ห้าอัน ๆ ละ 1 ฟารัด เราจะต้องใช้คอนเดนเซอร์กี่อันและ  
ต่ออย่างไรจึงจะได้ความจุ ก.  $\frac{1}{2}$  ข.  $1\frac{1}{2}$  ค.  $3\frac{1}{2}$  ง.  $\frac{1}{4}$  จ.  $\frac{1}{5}$  ฟารัดตามลำดับ
4. มีคอนเดนเซอร์อยู่สามอัน 10, 20 และ 50 ฟารัดตามลำดับ ถ้าอันที่หนึ่ง  
ต่อเป็นขนานกับอันที่สอง แล้วทั้งที่สองอันนี้ต่อเป็นอนุกรมกับอันที่สาม จงหาความจุรวม  
(18.75)
5. ถ้าเราคอนเดนเซอร์ซึ่งมีความจุ 5, 10 และ 15 ฟารัดมาต่อกันแบบอนุกรม  
แล้วต่อกับแบตเตอรี่ 60 วอลต์ จงหาศักดาต่างระหว่างแผ่นทั้งสี่ของคอนเดนเซอร์ทุกๆอัน  
(30, 20, 10 วอลต์)

### คำถามเบ็ดเตล็ดและทักอย่างข้อสอบได้

1. กฎของแรงระหว่างประจุมีค่าอย่างไร เราจะแสดงความจริงของกฎนี้  
โดยการทดลองได้อย่างไร

2. จงอธิบายวิธีสร้างคอนเดนเซอร์โดยใช้ถ้วยแก้วน้ำ และถ้าเราอยากประจุคอนเดนเซอร์ซึ่งทำเช่นนี้ เราจะต้องทำอย่างไร

3. จงให้นิยามของหน่วยไฟฟ้าสถิต หน่วยประจุ หน่วยศักดา หน่วยความจุของตัวนำ และหน่วยความจุของคอนเดนเซอร์

หน่วยที่ใช้กันอยู่ เดมอ หรือหน่วยปฏิบัติ ของสิ่งเหล่านี้มีว่าอย่างไร และเกี่ยวข้องกับหน่วยไฟฟ้าสถิตอย่างไร

4. ทำอย่างไรจึงจะประจุคอนเดนเซอร์แบบไดเดนให้มันประจุโดยประจุบวกได้

5. ทำอย่างไรจึงจะรู้ว่าแผ่นวัตถุ A มีประจุปฏิฐาน (+) หรือลบ (-) หรือไม่มีเลย และจะทำอย่างไรจึงจะรู้ว่าวัตถุ B เป็นตัวนำหรือฉนวน

6. จงบรรยายข้อได้แก่โครสโกปแผ่นทอง และอธิบายว่าเราจะใช้เครื่องมือนี้อย่างไรจึงจะรู้ว่าประจุจำนวนหนึ่งเป็นชนิดบวกหรือลบ

7. หน่วยของปริมาณไฟฟ้าสถิตคืออะไร

ลูกกลมทองเหลืองสองอันมีขนาดเท่ากัน ได้รับประจุไฟฟ้า 12 หน่วยบวก และ 8 หน่วยลบ ตามลำดับ จงหาแรงระหว่างประจุสองจำนวนนี้ เมื่ออยู่ห่างกัน 12 ซม. (ดู  $\frac{2}{3}$ )

แรงจะเป็นเท่าไร ถ้าเราให้ลูกกลมหนึ่งสัมผัสกันเสียก่อน แล้วจึงแยกออกให้ห่างกันเท่าเดิม (ผล  $\frac{1}{36}$ )

8. ถ้าใช้โครสโกปแผ่นทองเปิดดูถูกประจุด้วยไฟฟ้าลบ จงอธิบายว่าจะมีอะไรเกิดขึ้นบ้าง เมื่อนำสิ่งคล้ายไปเข้าใกล้แผ่นทองเปิด ก. แท่งแก้วด้วยแพร ข. แท่งครึ่งด้วยลวดเหล็ก ทานจะทำให้ประจุในโครสโกปหมดไปได้ได้อย่างไร

9. จงอธิบายวิธีวัดไฟฟ้าให้แก่เครื่องโครสโกปที่ใช้แผ่นทองคำเปิดโดยวิธีเหนี่ยวนำ ด้วยแก้วท่อนหนึ่งซึ่งด้วยผ้าแพร ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในโครสโกปนั้นเป็นไฟฟ้าชนิดใด จงให้เหตุผลโดยแจ่มแจ้ง

10. (ก) จงเขียนสูตรแสดงสัมพันธภาพระหว่างประจุศักดา และความจุของคอนเดนเซอร์ไฟฟ้า ฟารัดคืออะไร

(๖) เมื่อมีประจุอยู่แล้ว แต่เป็นจำนวนน้อย และต้องการจะเพิ่มให้มากขึ้น ควรจะทำอย่างไรแก่คอนเดนเซอร์ ถ้าเครื่องประจุมักคายที่เพิ่มอีกไม่ได้

11. ทำไมทองเหลืองจึงมีประจุชนิดลบเมื่อถูกับยาง แต่มีประจุชนิดบวกเมื่อถูกับขนสัตว์

12. จงอธิบายว่าอเล็กโทรฟอรัสนั้น เป็นเครื่องแต่งอะไร ทำไมในเวลาแต่งความชื้นของประจุในเครื่องนี้จึงลดน้อยลงไปได้ พลังงานของไฟฟ้าที่นำมาแต่งนั้นมาจากไหน

13. ทำไมความจุของไดอิเล็กทริก จึงเปลี่ยนเมื่อคั่นแผ่นโลหะที่กรุพื้นนอกของไดอิเล็กทริกตั้งดิน ผลที่เกิดขึ้นจะเหมือนกันกับเมื่อใช้ฉนวนโยงแผ่นโลหะที่กรุพื้นนอกของขวดไปยังขั้วบวก และโยงแผ่นโลหะที่กรุพื้นในของขวดไปยังขั้วลบของเครื่องทำไฟฟ้า โดยการเหนี่ยวนำหรือไม่

14. จงอธิบายว่าวัตถุที่เป็นตัวนำไฟฟ้า นั้นจะมีสมบัติดึงดูดข้างล่างนี้ได้หรือไม่ ก. มีศักดาลบ และมีประจุบวก ข. มีศักดาบวกและมีประจุลบ

15. จงอธิบายว่าเครื่องหมั่นทำไฟฟ้าสถิตนั้น ทำให้ไฟฟ้าเกิดขึ้นได้อย่างไร

16. (ก) ลูกกลมเล็ก ๆ สองลูกห่างกัน 30 ซม. ลูกหนึ่งถูกประจุไฟฟ้า 27 หน่วย อีกลูก 36 หน่วย แรงระหว่างลูกกลมทั้งสองเท่าไร (1.08)

(ข) ลูกกลมลูกหนึ่งมีรัศมี 5 ซม. ประจุไฟฟ้าไว้ 10 หน่วย เมื่อค้อนลูกกลมทั้งสองเข้า ศักดาของลูกกลมทั้งสองจะเป็นเท่าใด (1 หน่วย)

17. ก. ข. ค. เป็นตัวนำไฟฟ้า ตัวนำ ข. วางอยู่บนฉนวน ส่วน ค. อยู่บนพื้นดิน ถ้านำ ก. ซึ่งมีประจุอยู่แล้วเข้ามาใกล้ ข. ค. จงอธิบายว่าศักดาของ ก. ข. และ ค. จะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรบ้าง จะมีประจุชนิดใดเกิดขึ้นที่ ข. ค.

18. ก. ข. และ ค. ตั้งอยู่บนเส้นเดียวกัน ระยะ  $กข = ขค = 20$  ซม. ที่จุด ก. มีประจุไฟฟ้าสถิต + 90 หน่วย และที่ ค. มีประจุ - 40 หน่วย ถ้านำประจุ + 20 มาวางที่จุด ข. ประจุนั้นจะถูกผลักด้วยแรงเท่าใด (6.5)

19. จงอธิบายว่าอ็เล็กโตรฟอรัล เป็นเครื่อง มีประโยชน์ สำหรับแสดง อะไรบ้าง  
พลังงานไฟฟ้าที่นำมาแสดงนั้นได้มาจากพลังงานชนิดใด

20. ถ้าเราเคลื่อนประจุ  $+100 \text{ e.s.u.}$  ไป  $20 \text{ ซม.}$  ในสนามซึ่งมีศักย์ลาด  
เส้นเคมิตรยะ  $5 \text{ e.s.u.}$  เราจะต้องทำงานหรือได้งานเท่าใด (10000 เซอร์ก)

21. ตัวนำแบน ๆ สองอันมีพื้นที่อันละ  $55 \text{ ตารางซม.}$  วางห่างกัน  $\frac{1}{10} \text{ ซม.}$  และ  
ศูนย์กลางแผ่นตัวนำทั้งสองนั้นไม่คาซึ่งมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก 6. จงหาความจุ (262.5 ซม.)

22. จงหาความจุของดิสไฟฟ้าทรงกลมรัศมี  $15.5 \text{ ซม.}$  (15.5 ซม.)

23. เราจะสร้างคอนเดนเซอร์ให้มีความจุมาก ๆ เราต้องมีหตุกอะไรบ้าง

24. ตัวนำรูปทรงกลม 2 อัน รัศมี 5 และ 2 ซม. ถ้าเราให้ประจุ  $300 \text{ e.s.u.}$   
แก่อันแรก เราจะต้องให้แก่อันที่สองเท่าใด จึงจะไม่มีการไหลของไฟฟ้าเมื่อเราต่อ  
ตัวนำทั้งสองเข้าด้วยลวดคั่น ๆ (120 e.s.u.)

25. จงหารัศมีของตัวนำรูปทรงกลมอันหนึ่ง ซึ่งจะมีศักย์เพิ่ม  $150 \text{ e.s.u.}$   
เมื่อเราให้ประจุแก่มัน  $12 \text{ e.s.u.}$  (.08 ซม.)



พิมพ์ที่ ร.พ. สมัยนิยม (กิมหลี่หงวน) เสาชิงช้า พระนคร  
นายปราโมทย์ สุวรรณสุขโรจน์ ผู้พิมพ์โฆษณา ๒๔๕๐

ไปรตแก่คำผิดที่สำคัญต่อไปนี้

| หน้า                | บันทึก    | คำผิด                              | แก้เป็น                                         |
|---------------------|-----------|------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 8                   | 14        | 5700 ถึง 7800                      | 57000 ถึง 87000                                 |
| 9                   | 12        | ชอนตาง                             | ชอนตา                                           |
| 19                  | 17        | S (เลื่อนไว้ท้ายบันทึก 16)         |                                                 |
| 25                  | 17        | โคตมัต                             | โคมัต                                           |
| 27                  | 9         | โมเดกุก                            | โมเดกุก                                         |
| 42                  | 6         | r 3                                | r <sup>3</sup>                                  |
| 51                  | 19, 20    | (เลื่อนเป็นบันทึก 20, 31)          |                                                 |
| 53, 54              |           | 1 ในสูตร คือ i                     |                                                 |
| 56                  | 15        | tan a                              | H tan a                                         |
| 62                  | 1         | N                                  | n                                               |
| 74                  | 1, 2, 3   | d                                  | p                                               |
| 82                  | 12        | เหตัก                              | แม่เหตัก                                        |
| 84, (85)            | 7, (4, 6) | (d <sup>2</sup> - i <sup>2</sup> ) | (d <sup>2</sup> - i <sup>2</sup> ) <sup>2</sup> |
| 85                  | 4         | d <sup>2</sup>                     | 2 d                                             |
| กระแด้ว เป็น กระแด้ |           | ฮังคัง                             | เป็น ฮังคัง                                     |
| 102                 | 1         | แท่งแม่                            | (เขาชอก)                                        |
|                     | 9         | เวตา                               | (เขาชอก)                                        |
| 118                 | 12        | เขาชาจ                             | เขา                                             |
| 136                 | 17        | A D <sup>2</sup>                   | A B <sup>2</sup>                                |
| 137                 | 12, 13    | ชว                                 | ประจ                                            |
|                     |           | อนันตะ                             | อนันต์ (infinity, ∞)                            |
| 165                 | 8         | กัมชีก                             | กัม                                             |









สำนักงาน N. C. C.



18 ขอยืมหนังสือ 1 เล่มวัน

พระนคร จัตุรัส