Potential Field Methods

- Gravity method
- **Magnetic method**

Magnetic Survey

- เป็นการวัดสนามแม่เหล็กโลกรวม (Earth's total magnetic field) หรือสนามแม่เหล็กโลกแนวดิ่ง (vertical Earth's magnetic field) หรือสนามแม่เหล็กโลกแนวนอน (horizontal Earth's magnetic field) แนวใดแนวหนึ่ง อันเป็นส่วนประกอบของสนามแม่เหล็กโลกในพื้นที่ที่สนใจ เพื่อแปลความหมายหาสภาพธรณีวิทยาใต้ผิวดิน โดยการวิเคราะห์จากความผิดปกติของค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่วัดได้ในพื้นที่ที่ทำการสำรวจ

- ความผิดปกติของสนามแม่เหล็ก เกิดเนื่องมาจากการมีวัตถุที่มีคุณสมบัติทางกายภาพด้าน "***ค่าของสภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็ก*** (Magnetic susceptibility)" ของวัตถุสูง แทรกอยู่ในสนามแม่เหล็กโลกรวมปกติ ทำให้พื้นที่บริเวณนั้นมีสนามแม่เหล็กโลกรวมแตกต่างไปจากสนามแม่เหล็กโลกรวมปกติ

Magnetic & Gravity

- **Magnetic susceptibility** ของวัตถุ เทียบได้กับ Density ของวัตถุ และค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเทียบได้กับค่าความเร่งโน้มถ่วงในการสำรวจวัดค่าความเร่งโน้มถ่วง
- ***ความคล้ายคลึง***

  (1) เป็นการวัดความผิดปกติที่เกิดจากสนามธรรมชาติ (natural field) ที่เพียงแต่สร้างเครื่องมือเพื่อตรวจวัดค่าความผิดปกติจากค่าตามธรรมชาติเท่านั้น

  (2) มีทฤษฎีและหลักการพื้นฐาน รวมทั้งการเก็บข้อมูล การปรับแก้ข้อมูล และการแปลความหมายคล้ายคลึงกัน

Magnetic & Gravity

- ***ความแตกต่าง***

(1) การสำรวจวัดสนามแม่เหล็ก อาศัยคุณสมบัติด้าน magnetic susceptibility ของวัตถุ ส่วนการสำรวจวัดค่าความเร่งโน้มถ่วงอาศัยคุณสมบัติด้าน density ของวัตถุ

(2) สนามแม่เหล็กมีทั้งสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแรงดึงและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแรงผลัก สนามทั้งสองเกิดร่วมกัน ทั้งนี้เพราะวัตถุในธรรมชาติมีขั้วแม่เหล็กอยู่สองขั้วร่วมกันเสมอ ส่วนสนามแรงโน้มถ่วงเกิดเฉพาะแนวดิ่งเพียงแนวเดียว ดังนั้นการวิเคราะห์ความผิดปกติ จะมีขั้นตอนและเงื่อนไขมากกว่าการสำรวจวัดค่าความเร่งโน้มถ่วง

Magnetic & Gravity

- ***ความแตกต่าง***

(3) สนามแม่เหล็กในธรรมชาติเกิดได้ 3 กรณี คือ

เกิดจากการเหนี่ยวนำวัตถุให้เป็นแม่เหล็กขึ้นภายหลังเมื่อวางตัวอยู่ในสนามแม่เหล็ก หรือเกิดจากการที่มีกระแสไฟฟ้าที่เกิดตามธรรมชาติไหลผ่านวัตถุตัวนำ หรือเกิดจากการมีวัตถุที่เป็นแม่เหล็กตกค้างโดยธรรมชาติ การที่จะแยกว่าเกิดจากกรณีใดใน 3 กรณี ค่อนข้างเป็นการยาก แต่สนามแรงโน้มถ่วงนั้นขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของวัตถุเพียงกรณีเดียว ดังนั้นการแปลความหมายข้อมูลการสำรวจวัดสนามแม่เหล็ก จึงยุ่งยากมากกว่าการสำรวจวัดความเร่งโน้มถ่วง

(4) สนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลามากกว่าสนามแรงโน้มถ่วง

(5) สนามแม่เหล็กมีสิ่งรบกวน (noise) ในระหว่างการสำรวจมากกว่า

Magnetic & Gravity

- ***ความแตกต่าง***

(6) ปริมาณของสนามแม่เหล็กมีค่ามากกว่าปริมาณของสนามแรงโน้มถ่วง ดังนั้นค่าความแม่นยำของเครื่องมือสำรวจวัดสนามแม่เหล็กต้องการคุณภาพต่ำกว่าเครื่องมือสำรวจวัดค่าความเร่งโน้มถ่วง การสร้างเครื่องมือจึงทำได้ง่ายกว่า

(7) ขั้นตอนทำการสำรวจได้ง่าย รวดเร็ว เสียค่าใช้จ่ายน้อย แปลความหมายเชิงคุณภาพได้ทันที

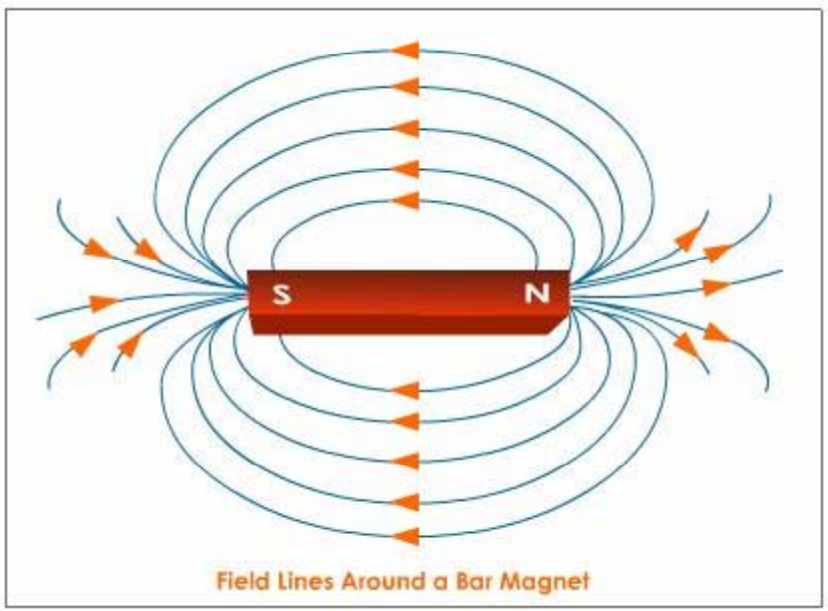
Magnetic Survey

- Applications
  - หาการวางตัวของหินฐาน (basement) ที่เป็นหินอัคนี
  - หารอยเลื่อน
  - หาแหล่งแร่เหล็ก
  - หาวัตถุโบราณที่ทำด้วยเหล็ก หรือวัตถุที่มนุษย์สร้างขึ้นที่ทำด้วยเหล็กหรือมีเหล็กเป็นส่วนประกอบ เช่น ท่อน้ำ อาวุธปืน ลูกระเบิด

Basic Theory & Principles of Magnetic Survey

- **แม่เหล็ก** (Magnet)

สารหรือวัตถุที่มีคุณสมบัติดูดเหล็ก หรือเหนี่ยวนำสารที่เป็นเหล็กให้มีสภาพกลายเป็นสารที่ดูดเหล็กได้หรือมีอำนาจแม่เหล็กว่า *"**แม่เหล็ก** (magnet)"*



Field Lines Around a Bar Magnet

- บริเวณรอบแท่งแม่เหล็ก มีฟลักซ์แม่เหล็กที่ไหลจากปลายด้านหนึ่งของแท่งแม่เหล็กไปยังปลายอีกด้านหนึ่งของแท่งแม่เหล็ก จุดบนแท่งแม่เหล็กที่ฟลักซ์มารวมเข้าด้วยกัน เรียกว่า **ขั้วแม่เหล็ก** (magnetic poles)
- แม่เหล็กจะมีขั้ว 2 ขั้ว คือ ขั้วเหนือ (N) และขั้วใต้ (S) หรือขั้วบวกและขั้วลบ
- **ความเข้มของขั้ว** (pole strength) ใช้เรียกแรงที่เกิดขึ้นจากการกระทำของขั้วแม่เหล็ก ณ ตำแหน่งที่ห่างจากขั้วแม่เหล็กเป็นระยะทางใดๆ
- ขั้วแม่เหล็กทั้ง 2 ขั้วของแม่เหล็กแต่ละแท่งมีความเข้มของขั้วเท่ากัน แต่มีพฤติกรรมที่ตรงข้าม

- **แรงแม่เหล็ก** (Magnetic Force, F_m)

Coulomb's law อธิบายปฏิกิริยาของแม่เหล็กในเชิงของแรงที่กระทำที่ขั้วแม่เหล็ก **แรงแม่เหล็ก** F_m ระหว่างขั้วแม่เหล็ก 2 ขั้ว ที่มีความเข้มของขั้วเท่ากัน เท่ากับ p_1 และ p_2 ที่วางห่างกันเป็นระยะทาง r คือ

$$F_m = \mu \frac{p_1 p_2}{r^2}$$

F_m หน่วยเป็น นิวตัน (N)

μ = magnetic permeability (สภาพให้ซึมได้ทางแม่เหล็ก)

หน่วยเป็น เวเบอร์ต่อแอมแปร์-เมตร (Wb/A-m) หรือ เฮนรีต่อเมตร (H/m)

หรือนิวตันต่อแอมแปร์ยกกำลังสอง (N/A^2)

p_1, p_2 = ความเข้มของขั้ว (pole strength) มีหน่วยเป็นแอมแปร์-เมตร (A-m)

r หน่วยเป็นเมตร (m)

- **โมเมนต์แม่เหล็ก** (Magnetic Moment, m)

  หรือ magnetic dipole moment

$$m = pl$$

เมื่อ m = โมเมนต์แม่เหล็ก

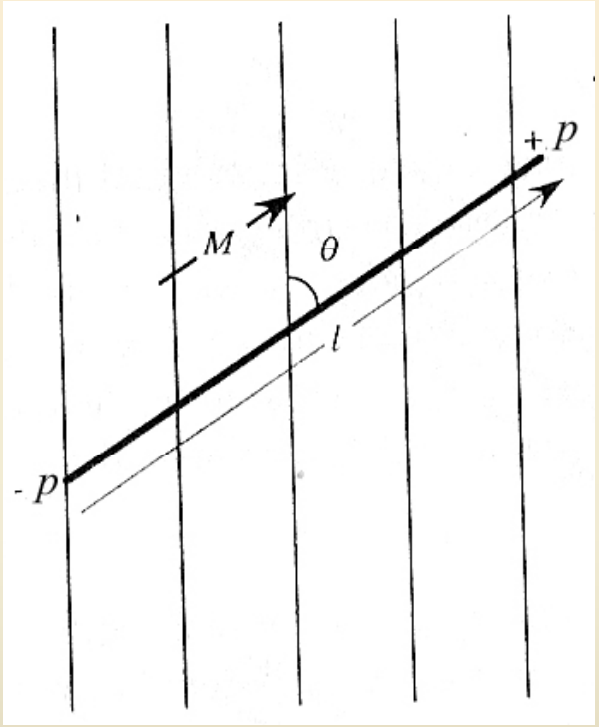
มีหน่วยเป็น A-m^2

p = ความเข้มของขั้วแม่เหล็ก

มีหน่วยเป็น A-m

l = ระยะห่างระหว่างขั้ว +p และ –p

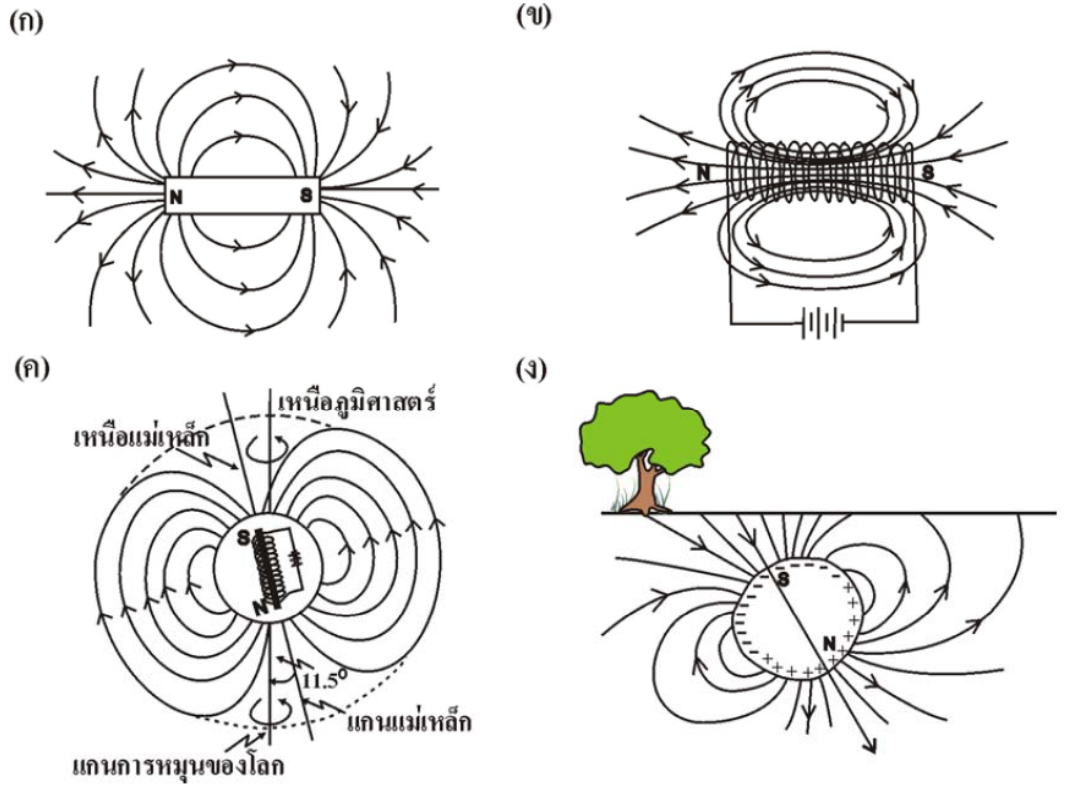
มีหน่วยเป็น m



- **สนามแม่เหล็ก** (Magnetic Field, B)

  คือบริเวณที่แสดงอำนาจความเป็นแม่เหล็ก

เส้นแรงแม่เหล็ก คือเส้นสมมุติแทนทิศทางของแรงที่กระทำออกจากขั้วเหนือของแม่เหล็กไปยังขั้วใต้ของแม่เหล็ก บริเวณใดมีเส้นแรงแม่เหล็กมาก บริเวณนั้นมีค่าของสนามแม่เหล็กมาก



สนามแม่เหล็กในธรรมชาติเกิดจาก

(1) มีวัตถุที่มีธาตแสดงอำนาจแม่เหล็กเป็นองค์ประกอบ ซึ่งมีเพียง 3 ธาตุ ที่สามารถเกิดสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูงได้ในสภาวะอุณหภูมิห้องปกติ คือ เหล็ก โคบอลต์ และนิกเกิล หรือ

(2) มีวัตถุที่มีองค์ประกอบของธาตุที่สามารถเหนี่ยวนำให้มีอำนาจแม่เหล็กได้ หรือ

(3) มีการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านตัวนำทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเกิดขึ้น เรียกว่า “การเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า” ดังเช่น กรณีของสนามแม่เหล็กโลก ที่เชื่อว่าเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในแกนโลกชั้นนอกทำให้เกิดกระแสไหลเวียนตัดกับตัวนำ ของเหล็กและนิกเกิลที่อยู่ในส่วนของแกนโลกชั้นใน จึงทำให้เกิดสนามแม่เหล็กโลกขึ้น

ในกรณีมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำ สนามแม่เหล็กจะเกิดขึ้นรอบๆ ตัวนำ ทิศทางของสนามแม่เหล็กขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า เมื่อทิศทางของกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนไป ทิศทางของสนามแม่เหล็กจะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

magnetic field มีชื่อเรียกอื่นๆ เช่น magnetic field strength, magnetic intensity, magnetic flux density or magnetic induction

เมื่อต้องการเน้นด้านปริมาณของสนามแม่เหล็ก จะเรียกว่า ความเข้มสนามแม่เหล็ก (magnetic intensity) เช่น ค่าความผิดปกติความเข้มสนามแม่เหล็ก

สมการพื้นฐานสำหรับคำนวณหาความเข้มสนามแม่เหล็ก คือ

$$B = \frac{F_m}{p_1} = \mu \frac{p_1 p_2}{p_1 r^2} = \mu \frac{p_2}{r^2}$$

หน่วยของระบบ SI และระบบ cgs ของเทอมต่างๆ ที่ใช้ใน Magnetic Survey

เทอม	สัญลักษณ์	ระบบเอสไอ	ระบบซีจีเอส
สนามแม่เหล็ก, ความเข้มสนามแม่เหล็ก หรือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic field, magnetic intensity or magnetic flux density)	B	1 tesla $= 1\ Wb/m^2$ $= 1\ N/A\text{-}m$	$= 10^4$ gauss $= 10^9$ gamma $= 10^4\ maxwell/cm^2$
ขั้วแม่เหล็ก (magnetic pole)	p	A-m	$= 10^8$ unit poles
โมเมนต์ขั้วคู่ (dipole moment)	m	$A\text{-}m^2$	$=10^{10}$ cm
ฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux)	ϕ	1 Wb = volt-second	$= 10^8$ maxwell
ความแรงสนามแม่เหล็ก (magnetizing force)	H	A/m	$= 4\pi 10^{-3}$ oersted $= 4\pi 10^{-3}\ gilbert/cm^2$
การเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก หรือความเข้มของการเป็นแม่เหล็ก (magnetization, magnetic polarization or magnetization intensity)	M	A/m	$= 4\pi 10^{-3}$ oersted $= 4\pi 10^{-3}\ gilbert/cm^2$
สภาพยอมให้ซึมได้ (permeability)	μ	Wb/A-m หรือ henry/m	gauss/oersted
สภาพยอมให้ซึมได้สัมพันธ์ (relative permeability)	μ_r	ไม่มีหน่วย	ไม่มีหน่วย
สภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็ก (volume susceptibility) สภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็ก (mass susceptibility)	κ χ	ไม่มีหน่วย m^3/kg	ไม่มีหน่วย $= 4\pi\kappa'$ cm^3/g

- Magnetic properties of materials

การเกิดสนามแม่เหล็กในวัตถุอธิบายได้ตามทฤษีอะตอม คือภายในโครงสร้างอะตอมของวัตถุ จะมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในแต่ละอะตอมมีการเคลื่อนที่เป็นวงโคจรอบนิวเคลียส

การเคลื่อนของอิเล็กตรอนก่อให้เกิดโมเมนต์แม่เหล็กจากการเคลื่อนรอบวงโคจรสัมพันธ์กับโมเมนตัมเชิงมุม และในขณะเดียวกันอิเล็กตรอนจะหมุนรอบแกนของอิเล็กตรอน (ทำนองเดียวกับกรณีของโลกโคจรรอบดวงอาทิตย์และในขณะเดียวกันโลกหมุนรอบแกนของโลกเอง) เป็นผลให้เกิดโมเมนตัมเชิงมุมของการหมุน

ส่วนโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมเป็นผลจากการรวมเวคเตอร์โมเมนต์ของการเคลื่อนที่รอบวงโคจรและโมเมนต์ของการหมุนรอบแกนของตนเองของอิเล็กตรอน

หากผลรวมของโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมไม่เป็นศูนย์ นั่นคือ วัตถุนั้นมีสภาพโมเมนต์แม่เหล็กถาวร

แต่ถ้าผลรวมเป็นศูนย์ นั่นคือ วัตถุนั้นไม่มีโมเมนต์แม่เหล็กถาวร

ดังนั้นวัตถุใดๆ จึงอาจมีโมเมนต์แม่เหล็กถาวรหรือไม่มีก็ได้ และถึงแม้วัตถุบางตัวมีโมเมนต์แม่เหล็กถาวรประกอบอยู่ อาจจะไม่สามารถแสดงสภาพแม่เหล็ก เพราะการเรียงตัวของทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็กในแต่ละอะตอมหรือโมเลกุลไม่เป็นระเบียบ จึงเกิดการหักล้างกัน มีเฉพาะวัตถุบางจำพวกเท่านั้นที่แสดงโมเมนต์แม่เหล็ก เพราะมีการเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กอย่างเป็นระเบียบ

- Magnetic properties of materials

(1) Diamagnetic Material เป็นวัตถุที่แสดงคุณสมบัติแม่เหล็กในเชิงต้านกับสนามแม่เหล็กภายนอก ไม่มีโมเมนต์แม่เหล็กถาวรในโครงสร้างอะตอม โดยที่เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำต่ออะตอมของวัตถุ จะทำให้อิเล็กตรอนที่เคลื่อนเป็นวงโคจรรอบนิวเคลียสของอะตอมเสียสมดุล เกิดขั้วแม่เหล็กขนาดเล็กขึ้นในอะตอม ขั้วแม่เหล็กจะต้านกับสนามแม่เหล็กภายนอก ทำให้เกิดผลในเชิงลบ วัตถุจำพวกนี้มีคุณสมบัติค่าสภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็ก (magnetic susceptibility) ของวัตถุมีค่าเป็นลบ ตัวอย่างแร่ที่มีคุณสมบัติแม่เหล็กประเภทนี้ ได้แก่ ควอตซ์ เกลือหิน แคลไซต์ เป็นต้น

(2) Paramagnetic Material เป็นวัตถุที่เมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กภายนอก วัตถุจะถูกเหนี่ยวนำให้มีสภาพเป็นแม่เหล็ก นั่นคือ ในโครงสร้างอะตอมของวัตถุจำพวกนี้มีโมเมนต์แม่เหล็กถาวรประกอบอยู่ แต่การเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ ดังนั้นเมื่อถูกเหนี่ยวนำจึงมีการเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กไปตามสนามแม่เหล็กที่เหนียวนำ การเรียงตัวจะไม่เป็นระเบียบอย่างสมบูรณ์ และเมื่อนำสนามแม่เหล็กออกไป วัตถุนั้นก็จะไม่มีความเป็นแม่เหล็กอีกต่อไป วัตถุจำพวกนี้มี magnetic susceptibility ของวัตถุเป็นค่าบวกและมีค่าอยู่ระหว่าง 10^{-6}–10^{-2} วัตถุที่มีคุณสมบัติแม่เหล็กจำพวกนี้ได้แก่วัตถุทุกชนิดที่ไม่ใช่วัตถุจำพวกdiamagnetic

- Magnetic properties of materials

(3) **Ferromagnetic Material** เป็นวัตถุที่เมื่อถูกเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กภายนอก จะมีสภาพแม่เหล็กและเมื่อนำสนามแม่เหล็กภายนอกออกไป จะยังคงมีสภาพความเป็นแม่เหล็กอยู่ นั่นคือ วัตถุมีโมเมนต์แม่เหล็กถาวรในโครงสร้างอะตอม วัตถุจำพวกนี้มีสภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็กเป็นค่าบวกและมีค่ามากกว่า 100 ขึ้นไป หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือเป็นวัตถุจำพวกพาราแมกเนติที่มีค่า magnetic susceptibility มากกว่า 100 ขึ้นไป แร่ที่จัดว่าเป็นจำพวกเฟร์โรแมกเนติก คือแร่ที่ประกอบด้วยธาตุ Fe, Co, Ni, Gadolinium (Gd) และ Dysprosium (Dy) วัตถุจำพวกเฟร์โรแมกเนติกแบ่งย่อยได้ 3 ประเภท คือ

- 3.1 *Pure Ferromagnetism* วัตถุที่จัดในประเภทนี้จะมีทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็กถาวรที่เรียงในโดเมนทุกๆ โดเมน เรียงเป็นแนวขนานตามทิศทางของสนามแม่เหล็ก ทำให้มีค่าสภาพรับได้เชิงแม่เหล็กสูงและมีค่าบวก ในธรรมชาติส่วนใหญ่พบได้เฉพาะในธาตุ Fe, Co และ Ni (Gd และ Dy พบน้อยมาก Dy อยู่ในสภาวะก๊าซ Gd สภาพความเป็นแม่เหล็กถูกทำลายได้ที่อุณหภูมิห้อง เราจึงไม่นำมาพิจารณา) ถ้าหินมีเพียงส่วนประกอบของธาตุ Fe, Co และ Ni จะไม่จัดเป็นประเภทเฟร์โรแมกเนติกบริสุทธิ

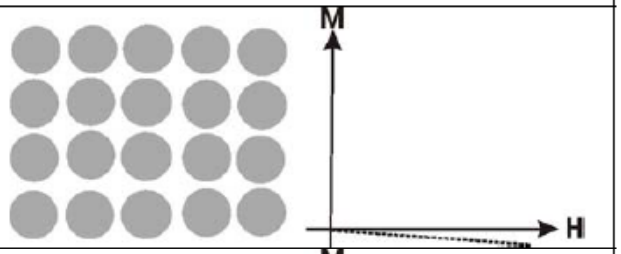
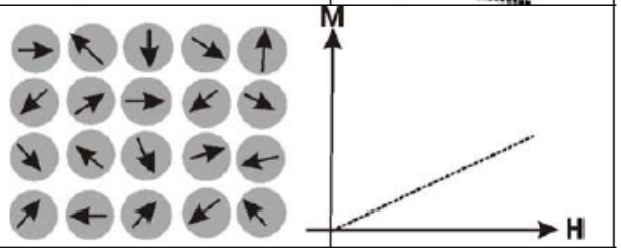
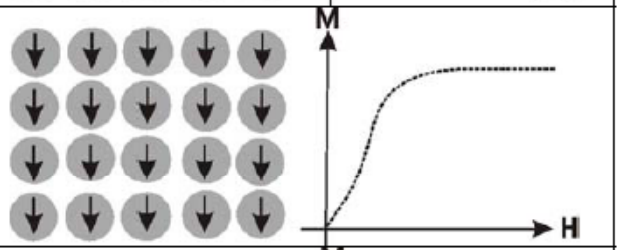
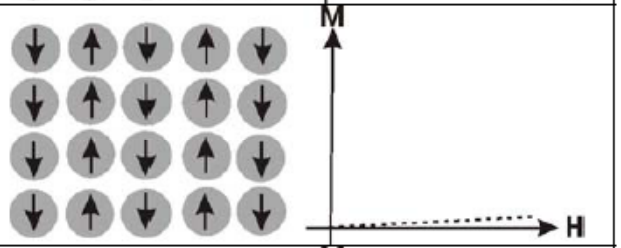
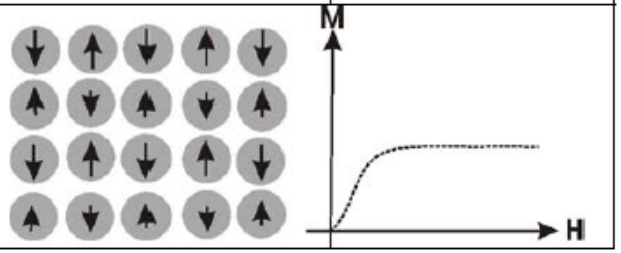
- Magnetic properties of materials

(3) Ferromagnetic Material

3.1 *Pure Ferromagnetism*

3.2 *Anti-ferromagnetism* เป็นวัตถุที่ถึงแม้ว่าจะมีโมเมนต์แม่เหล็กถาวรประกอบอยู่ในวัตถุ แต่ทิศทางการเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กถาวรภายในโดเมนแต่ละโดเมน มีการเรียงในทิศทางตรงกันข้าม และมีขนาดเท่ากัน จึงหักล้างกันหมดไป ทำให้มีค่า magnetic susceptibility เป็นศูนย์ แร่ที่มีคุณสมบัติประเภทนี้ คือ ฮีมาไทต์

3.3 *Ferrimagnetisms* เป็นวัตถุที่มีโมเมนต์แม่เหล็กถาวรประกอบอยู่ในวัตถุ และทิศทางการเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กถาวรภายในโดเมน มีการเรียงในทิศทางตรงกันข้าม แต่มีขนาดไม่เท่ากัน จึงทำให้มีอำนาจแม่เหล็ก และมีค่า magnetic susceptibility เป็นบวก วัตถุที่มีคุณสมบัติประเภทนี้ คือ จำพวกเฟร์ไรต์ มีสูตรทางเคมีคือ $XOFe_2O_3$ เมื่อ X คือ Mn, Co, Ni, Cu, Mg, Zn เป็นต้น

วัตถุจำพวก	สภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็ก	โมเมนต์แม่เหล็กภายในอะตอม	อะตอม/กราฟลักษณะการเหนี่ยวนำเชิงแม่เหล็ก
ไดอะแมกเนติก (Diamagnetic)	มีค่าต่ำและเป็นค่าลบ	ไม่มี	
พาราแมกเนติก (Paramagnetic)	มีค่าต่ำและเป็นค่าบวก	มีและมีการเรียงตัวระเกะระกะ	
เฟร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic)	มีค่าสูงมากและเป็นค่าบวก	มีและมีการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบในทิศทางเดียวกัน	
แอนติเฟร์โรแมกเนติก (Anti-ferromagnetic)	มีค่าต่ำและเป็นค่าบวก	มีและมีการเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้ามกัน มีขนาดเท่ากัน	
เฟร์ริแมกเนติก (Ferrimagnetic)	มีค่าสูงและเป็นค่าบวก	มีและมีทิศทางการเรียงตัวตรงกันข้ามกัน มีขนาดแตกต่างกัน	

- **ฟลักซ์แม่เหล็ก** (Magnetic Flux,ϕ)

คือจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านเข้าไปในบริเวณใดๆ

ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux density) คือ จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านเข้าไปในหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่เส้นแรงแม่เหล็กนั้นตั้งฉาก

วัตถุใดมีจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กพุ่งออกหรือพุ่งเข้ามาก ย่อมมีค่าของสนามแม่เหล็กสูง

เขียนสมการได้ คือ

$$\phi = \frac{B}{A}$$

ϕ = ฟลักซ์แม่เหล็ก หน่วยเป็น เวเบอร์

B = ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กหรือสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเวเบอร์ต่อตารางเมตร หรือ เทสลา

A = พื้นที่หน้าตัด มีหน่วยเป็นตารางเมตร

- **ความแรงสนามแม่เหล็ก** (Magnetizing Force/, H)

สนามแม่เหล็กมีความสัมพันธ์กับความแรงสนามแม่เหล็กด้วยค่าคงตัวของคุณสมบัติของตัวกลาง คือค่า magnetic permeability, μ หรือเรียกอีกชื่อหนึ่ง คือค่าคงตัวของการที่จะทำให้เป็นแม่เหล็ก ดังสมการ

$$B=\mu H$$

$$\mu=\mu_0\mu_r$$

เมื่อ H = ความแรงสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น แอมแปร์ต่อเมตร (A/m)

μ = magnetic permeability ของวัตถุ มีหน่วยเป็น Wb/A-m หรือ H/m หรือ N/A^2

μ_r = ค่าคงตัวของสภาพยอมให้ซึมได้เชิงแม่เหล็กสัมพันธ์ (relative permeability) ไม่มีหน่วย

μ_0 = magnetic permeability of free space = $4\pi\times10^{-7}$ Wb/A-m หรือ H/m หรือ N/A^2

- **การเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก** (Magnetization, M)

เมื่อเราเอาแท่งเหล็กธรรมดาสอดเข้าไปตรงกลางของขดลวด ที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน เราจะพบว่า แท่งเหล็กสามารถถูกเหนี่ยวนำให้เป็นแม่เหล็ก และเมื่อวัดค่าของสนามแม่เหล็กก่อนและหลังจากที่มีการสอดแท่งเหล็กเข้าไปในขดลวด ค่าที่วัดได้จะแตกต่างกัน โดยที่สนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดและแท่งเหล็ก จะมีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้เพราะเป็นผลรวมระหว่างสนามแม่เหล็กจากขดลวดและสนามแม่เหล็กจากแท่งเหล็กที่ถูกเหนี่ยวนำ เมื่อมีกระแสไหลผ่านขดลวด ปรากฏการณ์นี้เรียกกว่า **การเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก** (magnetization) or magnetic polarization or intensity of magnetization (**ความเข้มของการเป็นแม่เหล็ก**) มีหน่วย A/m

มีความสัมพันธ์กับสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field, B)และความแรงสนามแม่เหล็ก (Magnetizing Force, M) ดังสมการ

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M = \mu_0 (H + M)$$

สำหรับวัตถุจำพวกเฟร์โรแมกเนติก ค่าของ $\mu_0 M >> \mu_0 H$ *มาก* ---> $B = \mu_0 M$

- **การเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก** (Magnetization, M)

การเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก หรือความเข้มของการเป็นแม่เหล็ก มีความสัมพันธ์กับโมเมนต์แม่เหล็ก ดังสมการ

$$M = m/v$$

เมื่อ m = โมเมนต์แม่เหล็ก มีหน่วยเป็น แอมแปร์-เมตรยกกำลังสอง

v = ปริมาตร มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร

- **สภาพยอมให้ซึมได้เชิงแม่เหล็ก** (Magnetic Permeability, μ)

เมื่อเราเอาวัตถุจำพวกเฟร์โรแมกเนติกและเฟร์ริแมกเนติกไปวางไว้ในสนามแม่เหล็ก และทำให้สนามแม่เหล็กนั้นมีค่าเพิ่มขึ้น นั่นแสดงว่าเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก ปริมาณที่เพิ่มขึ้นอาจบอกได้ด้วยค่าคงตัวของสภาพยอมให้ซึมได้เชิงแม่เหล็ก (magnetic permeability, μ) --> $\mu = \frac{B}{H}$

ค่าของสภาพยอมให้ซึมได้เชิงแม่เหล็ก มีค่าไม่คงตัวโดยส่วนใหญ่จะกำหนดค่าคงตัวเป็นค่าของสภาพยอมให้ซึมได้เชิงแม่เหล็กเริ่มต้น และค่าคงตัวของสภาพยอมให้ซึมได้เชิงแม่เหล็กสูงสุด หากวัตถุถูกเหนี่ยวนำได้ง่าย แสดงว่ามีค่าคงตัวของสภาพ ยอมให้ซึมได้เชิงแม่เหล็กซึมสูง

- **สภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็ก** (Magnetic Susceptibility, **κ, χ**)

Magnetic Susceptibility เป็นค่าคงตัวของวัตถุที่เกิดจากอัตราส่วนระหว่างค่าความแรงสนามแม่เหล็ก (magnetizing force, H) ต่อค่าการเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก (magnetization, M)

สำหรับการวัดหาค่าของสภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็กมี 2 ลักษณะ คือ

(1) วัดเทียบกับค่าการเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรและค่าความแรงสนามแม่เหล็กหน่วยปริมาตรเช่นเดียวกัน ใช้สัญลักษณ์ **κ** (volume susceptibility) ------> **M = κH**

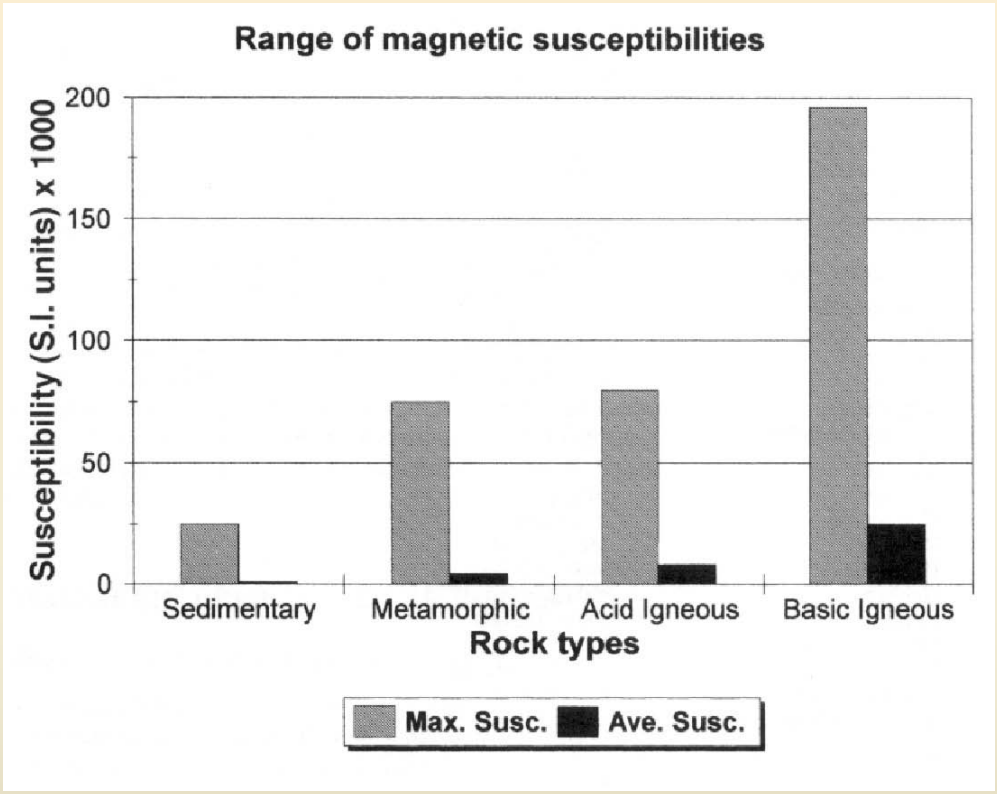
ในกรณีนี้ สภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็กไม่มีหน่วย และใน Magnetic Survey เราจะหมายถึงสภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็กในลักษณะนี้

(2) วัดเทียบกับค่าการเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยมวลและค่าความแรงสนามแม่เหล็ก ใช้สัญลักษณ์ **χ** (specific or mass susceptibility) ในกรณีนี้ สภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็กมีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัม (m^3/kg)

-------> **M = χ H**

κ= μ_r-1

Material	Susceptibility x 10^3 (SI)*
Air	~0
Quartz	-0.01
Rock Salt	-0.01
Calcite	-0.001 - 0.01
Sphalerite	0.4
Pyrite	0.05 - 5
Hematite	0.5 - 35
Illmenite	300 - 3500
Magnetite	1200 - 19,200
Limestones	0 - 3
Sandstones	0 - 20
Shales	0.01 - 15
Schist	0.3 - 3
Gneiss	0.1 - 25
Slate	0 - 35
Granite	0 - 50
Gabbro	1 - 90
Basalt	0.2 - 175
Peridotite	90 - 200



- **ผลของอุณหภูมิที่มีต่อสภาวะความเป็นแม่เหล็กของวัตถุ**

อุณหภูมิที่สูงขึ้นจนทำให้วัตถุจำพวกเฟร์โรแมกเนติกที่มีสภาพเป็นแม่เหล็ก หมดสภาพความเป็นแม่เหล็ก เรียกว่า “**อุณหภูมิกูรี** (Curie temperature)”

วัตถุแต่ละชนิดจะมีอุณหภูมิกูรแตกต่างกัน อุณหภูมิกูรี ของ Co Fe Ni Gadolinium (Gd) และ Dysprosium (Dy) มีค่าประมาณ 1115-1131 ^{o}C, 770 ^{o}C, 354-358 ^{o}C, 17-19 ^{o}C และ -185 ^{o}C ตามลำดับ

ดังนั้นจะเห็นว่าโดยทฤษฎีและหลักการ อุณหภูมิกูรีเป็นขีดจำกัดของการสำรวจในด้านความลึกมากสุดที่จะสำรวจ นั่นคือ เราจะไม่สามารถประยุกต์สำรวจธรณีวิทยาใต้ผิวดินด้วยวิธีวัดสนามแม่เหล็ก เพื่อหาสภาพธรณีวิทยาที่ความลึกเกินกว่าอุณหภูมิกูรีของแร่ประกอบหิน จึงสำรวจได้เฉพาะในส่วนของ เปลือกโลกและเนื้อโลกส่วนบนบางส่วนเท่านั้น เพราะลึกไปกว่านั้นวัตถุจำพวกเฟร์โรแมกเนติกจะไม่มีสภาพความเป็นแม่เหล็กถาวร

สำหรับวัตถุจำพวกเฟร์ริแมกเนติกและแอนติเฟร์ริแมกเนติก อุณหภูมิที่สูงขึ้นจนทำให้วัตถุจำพวกนี้ หมดสภาพความเป็นแม่เหล็ก เรียกว่า “อุณหภูมินีล (Neel temperature)” เช่น พิร์โรไทต์ จาคอบไซต์ เป็นแร่จำพวกเฟร์ริแมกเนติก มีอุณหภูมินีลที่ 320 และ 300 ^{o}C ตามลำดับ

- **การเป็นแม่เหล็กตกค้าง** (Remnant Magnetization, RM)

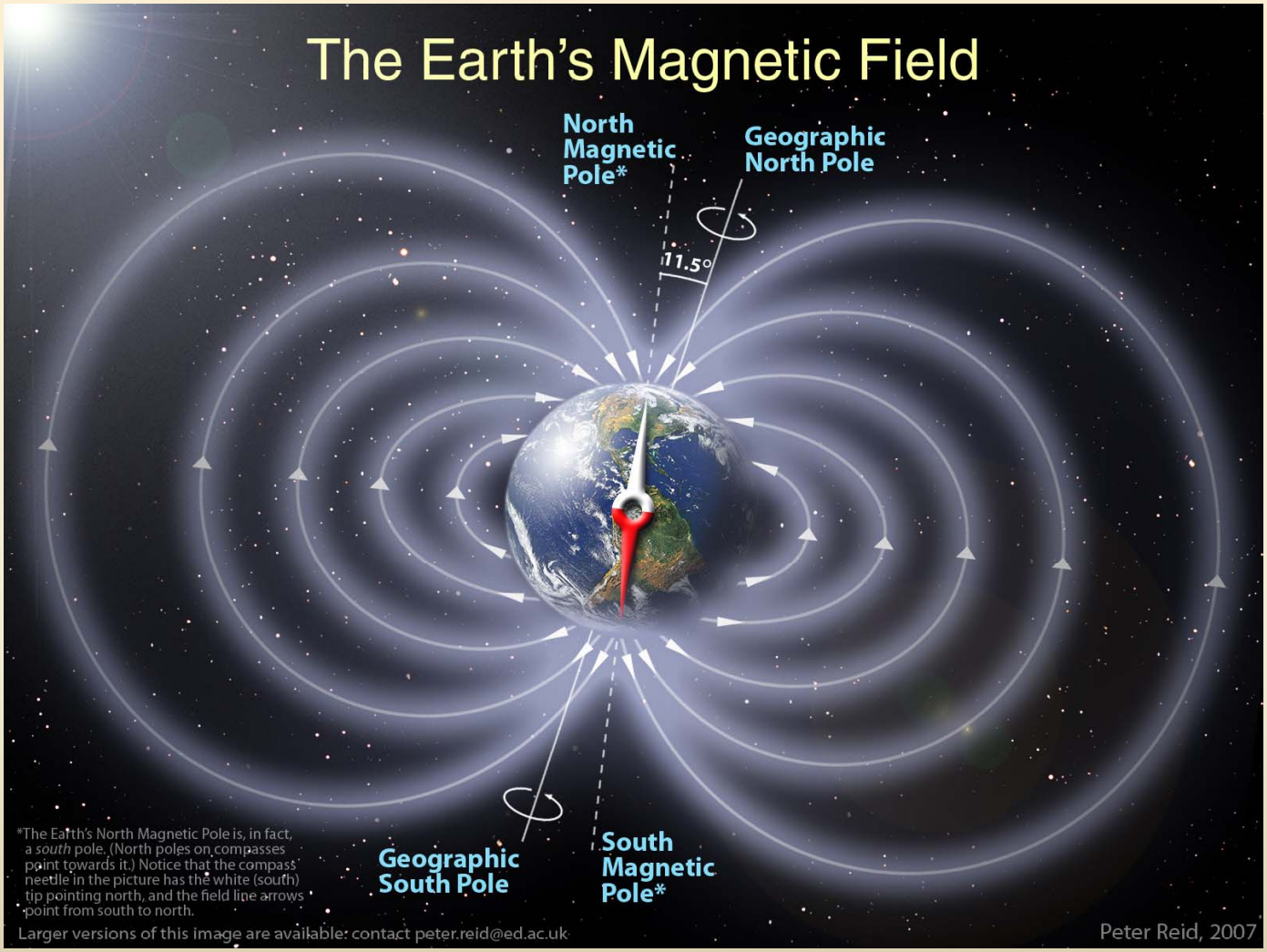
การเป็นแม่เหล็กตกค้างเกิดขึ้นได้เฉพาะกับวัตถุจำพวกเฟร์โรแมกเนติกและเฟร์ริแมกเนติก ซึ่งวัตถุจำพวกนี้เมื่อถูกเหนี่ยวนำให้มีอำนาจแม่เหล็กเกิดขึ้นแล้ว แม้ในเวลาต่อมา สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำนั้นหายไป วัตถุจะยังคงแสดงอำนาจแม่เหล็กอยู่ต่อไป ปรากฏการณ์ในลักษณะนี้เรียกว่า ***"การเป็นแม่เหล็กตกค้าง** (remnant magnetization, RM).*

หินที่มีแร่จำพวกเฟร์โรแมกเนติกและเฟร์ริแมกเนติก อาจมีลักษณะของการเป็นแม่เหล็กตกค้าง เราอาศัยคุณสมบัติของการเป็นแม่เหล็กตกค้างของแร่ประกอบหินในการศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่ของแผ่นโลก และการกลับขั้วของสนามแม่เหล็กโลกในอดีต ตัวอย่างของหินที่นำมาวิเคราะห์การเป็นแม่เหล็กตกค้าง เช่น หินอัคนีเมื่อมีการเย็นตัวของลาวาหรือหินหนืดในสภาวะที่มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิกูรีของแร่ประกอบหินที่เป็นแร่จำพวกเฟร์โรแมกเนติกและเฟร์ริแมกเนติก โมเมนต์แม่เหล็กของแร่เหล่านี้จะถูกเหนี่ยวนำให้อยู่ในทิศทางเดียวกับสนามของแม่เหล็กโลกขณะจับผลึกในสภาวะอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิกูรีหรืออุณหภูมินีล แม้ต่อมาสนามแม่เหล็กโลกเกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทาง แต่ทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการเหนี่ยวนำในขณะเย็นตัวจะคงอยู่ในทิศทางเดิม

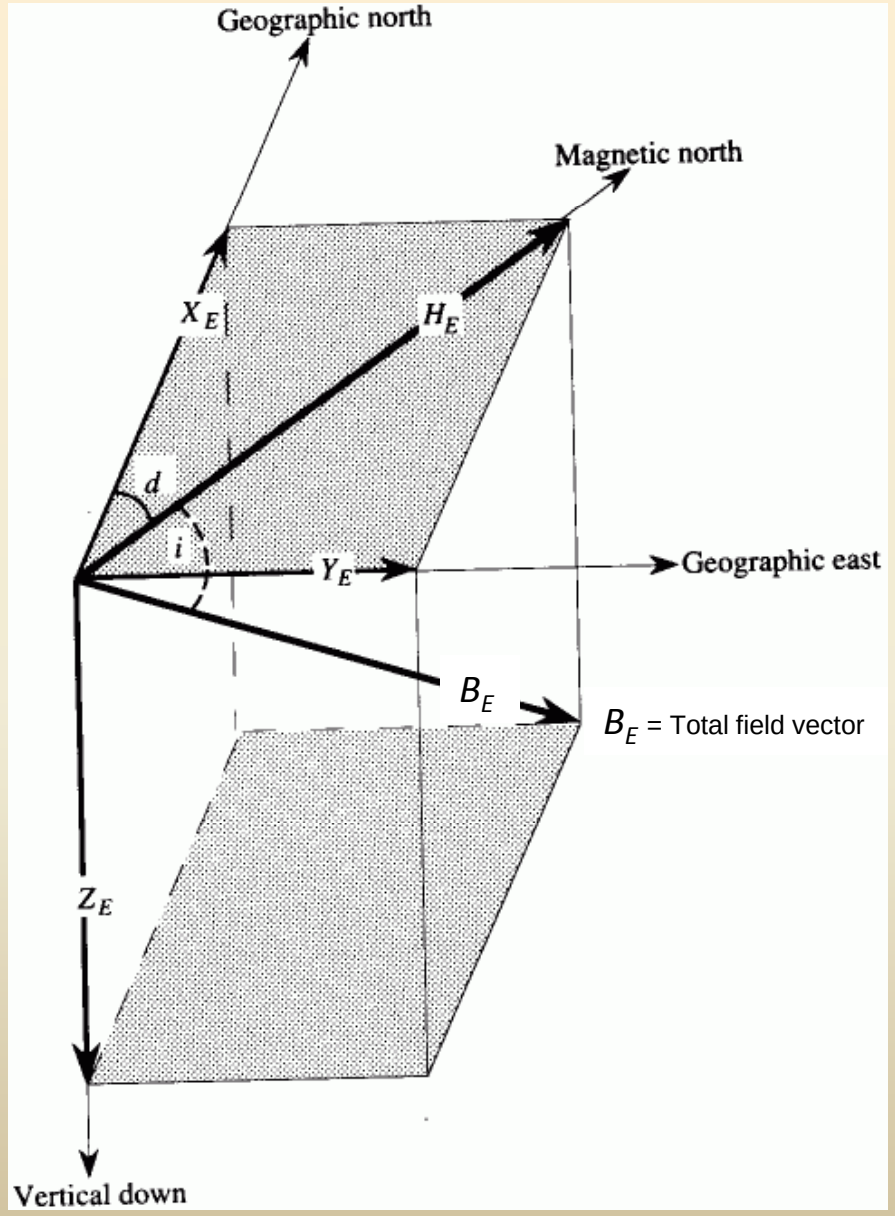
ตารางที่ 3.3 ชนิดของการเป็นแม่เหล็กตกค้าง (RM) ของหินและแร่และกระบวนการเกิดทางธรรมชาติ

ชนิดของการเป็นแม่เหล็กตกค้าง	กระบวนการเกิด
(1) การเป็นแม่เหล็กตกค้างโดยผลของอุณหภูมิ (Thermal RM)	เกิดในขณะที่หินหนืดหรือลาวาเย็นตัวเป็นผลึกของแร่จำพวกเฟร์โรแมกเนติกหรือเฟร์ริแมกเนติก ในขณะที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่ทำให้หมดอำนาจแม่เหล็ก (Curie or Neel temperature)
(2) การเป็นแม่เหล็กตกค้างทางเคมี (Chemical RM)	เกิดในระหว่างการตกผลึกหรือการเปลี่ยนรูปของแร่ที่สามารถมีอำนาจแม่เหล็กได้โดยผลทางเคมี
(3) การเป็นแม่เหล็กตกค้างโดยการตกตะกอน (Detrital RM)	เกิดในขณะที่ตะกอนของเม็ดแร่ที่มีอำนาจแม่เหล็ก ตกทับถมและเรียงตัวภายในสนามแม่เหล็กภายนอก
(4) การเป็นแม่เหล็กตกค้างทางเคมีและอุณหภูมิ (Thermo-Chemical RM)	เกิดในลักษณะผสมระหว่างทางเคมีและโดยอุณหภูมิ
(5) การเป็นแม่เหล็กตกค้างแบบอุณหภูมิคงที่ (Isothermal RM)	เกิดขึ้นในเสี้ยววินาที เช่น เมื่อเกิดฟ้าผ่าทำให้เกิดความร้อนสูงอย่างทันทีทันใด แร่แม่เหล็กจะเรียงตัวตามสนามแม่เหล็กภายนอกในขณะนั้น
(6) การเป็นแม่เหล็กตกค้างแบบแทรกซึม (Viscous RM)	เกิดขึ้นในขณะที่แร่ที่มีอำนาจแม่เหล็กวางตัวอยู่ในสนามแม่เหล็กเป็นเวลานาน สนามแม่เหล็กจะถูกเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ
(7) การเป็นแม่เหล็กตกค้างแบบแอนฮีสเทอรีซีส (Anhysteretic RM)	เกิดเมื่อค่าความแรงสนามแม่เหล็กค่ามาก เกิดการปรับลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ ในขณะที่ยังมีสนามแม่เหล็กค่าน้อยคงอยู่ และมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง

ที่มา: Telford et al. (1990); ReyNolds, (1997)


The Earth's Magnetic Field
North Magnetic Pole*
Geographic North Pole
11.5°
Geographic South Pole
South Magnetic Pole*
*The Earth's North Magnetic Pole is, in fact, a *south* pole. (North poles on compasses point towards it.) Notice that the compass needle in the picture has the white (south) tip pointing north, and the field line arrows point from south to north.
Larger versions of this image are available: contact peter.reid@ed.ac.uk
Peter Reid, 2007

Component of the Earth's Magnetic Field



B_E = สนามแม่เหล็กโลกรวม

H_E = สนามแม่เหล็กโลกในแนวนอน

Z_E = สนามแม่เหล็กโลกในแนวดิ่ง

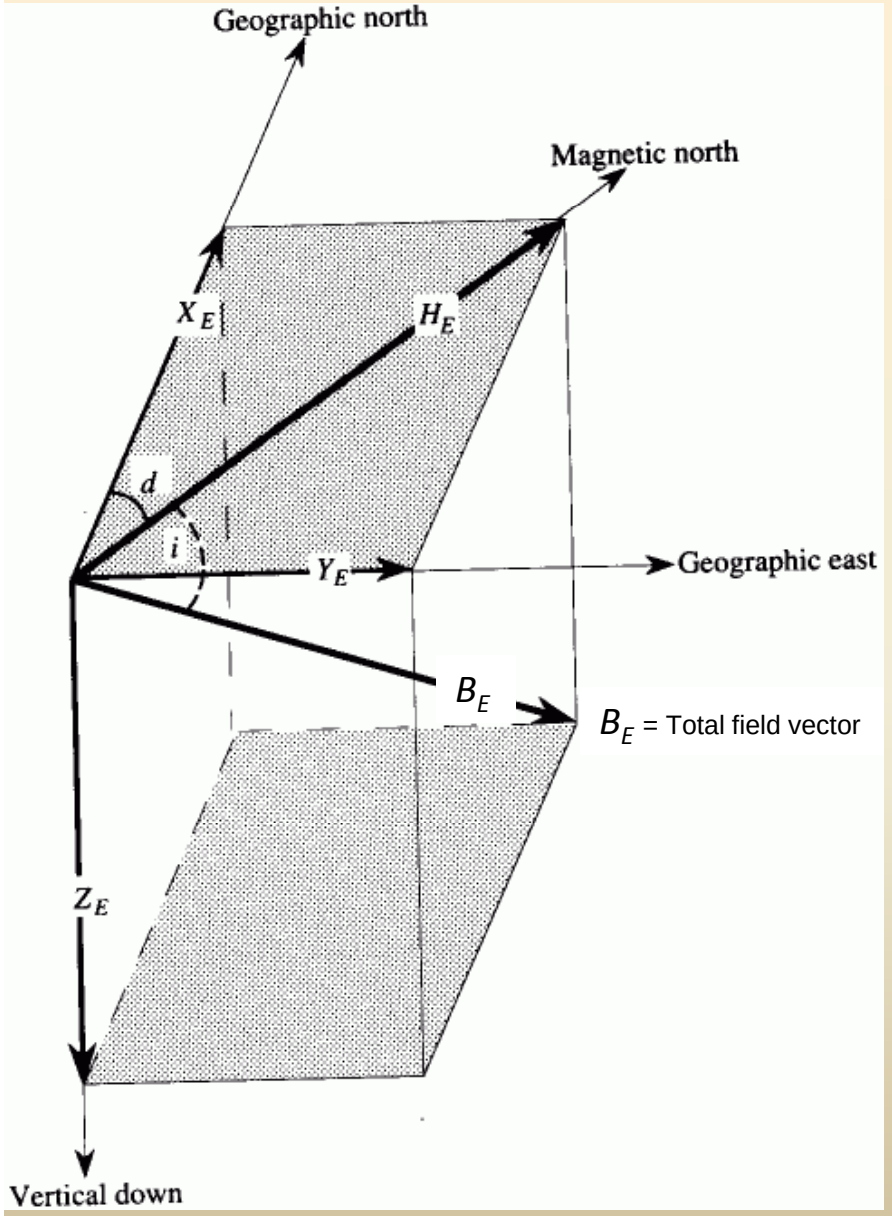
d = มุมบ่ายเบน

(Declination angle)

i = มุมเท

(Inclination angle)

Component of the Earth's Magnetic Field



$$B_E^{\,2} = H_E^{\,2} + Z_E^{\,2} = X_E^{\,2} + Y_E^{\,2} + Z_E^{\,2}$$

$$H_E = B_E \cos i$$

$$Z_e = B_E \sin i$$

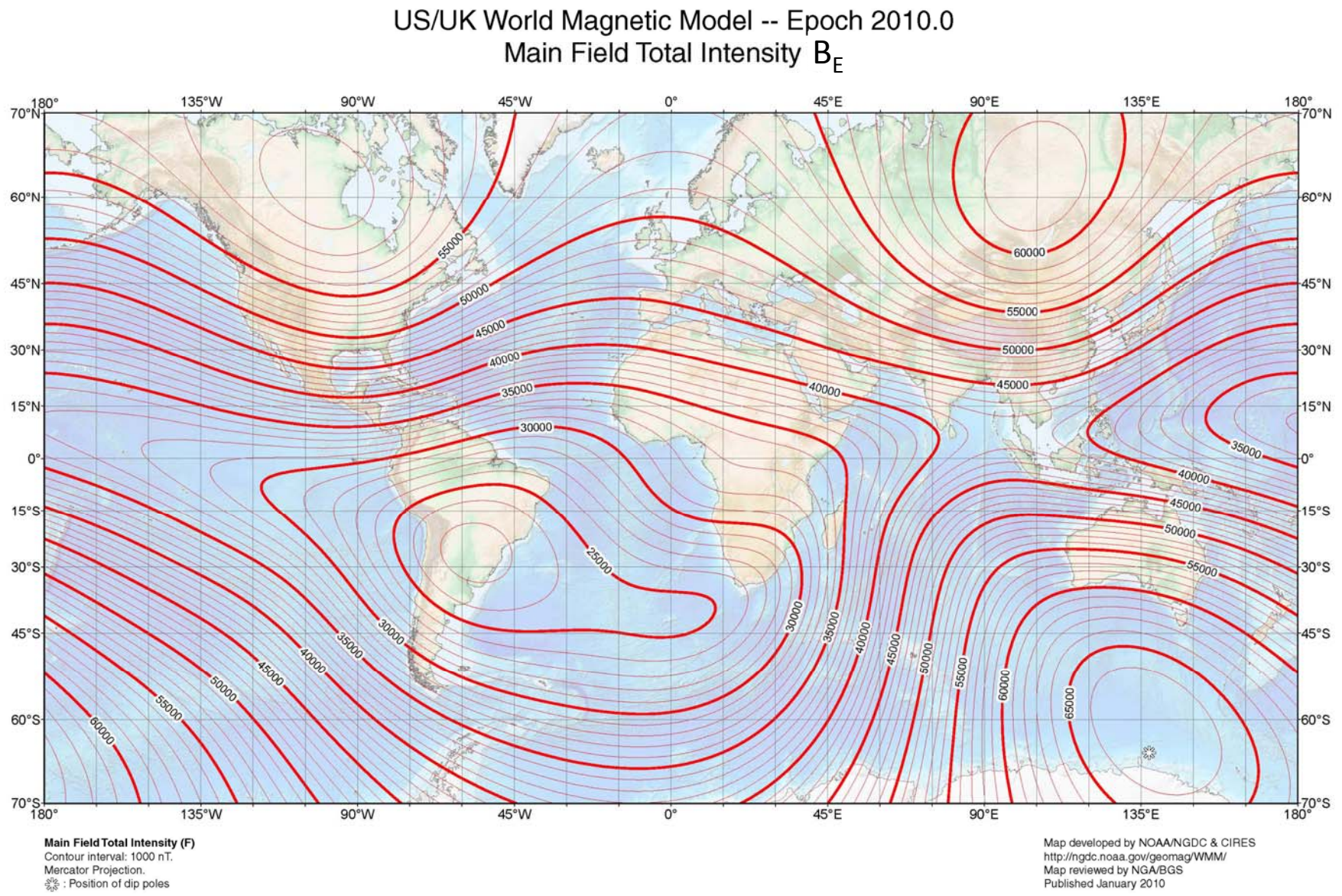
$$\tan i = Z_E / H_E$$

$$X_E = H_E \cos d$$

$$Y_E = H_E \sin d$$

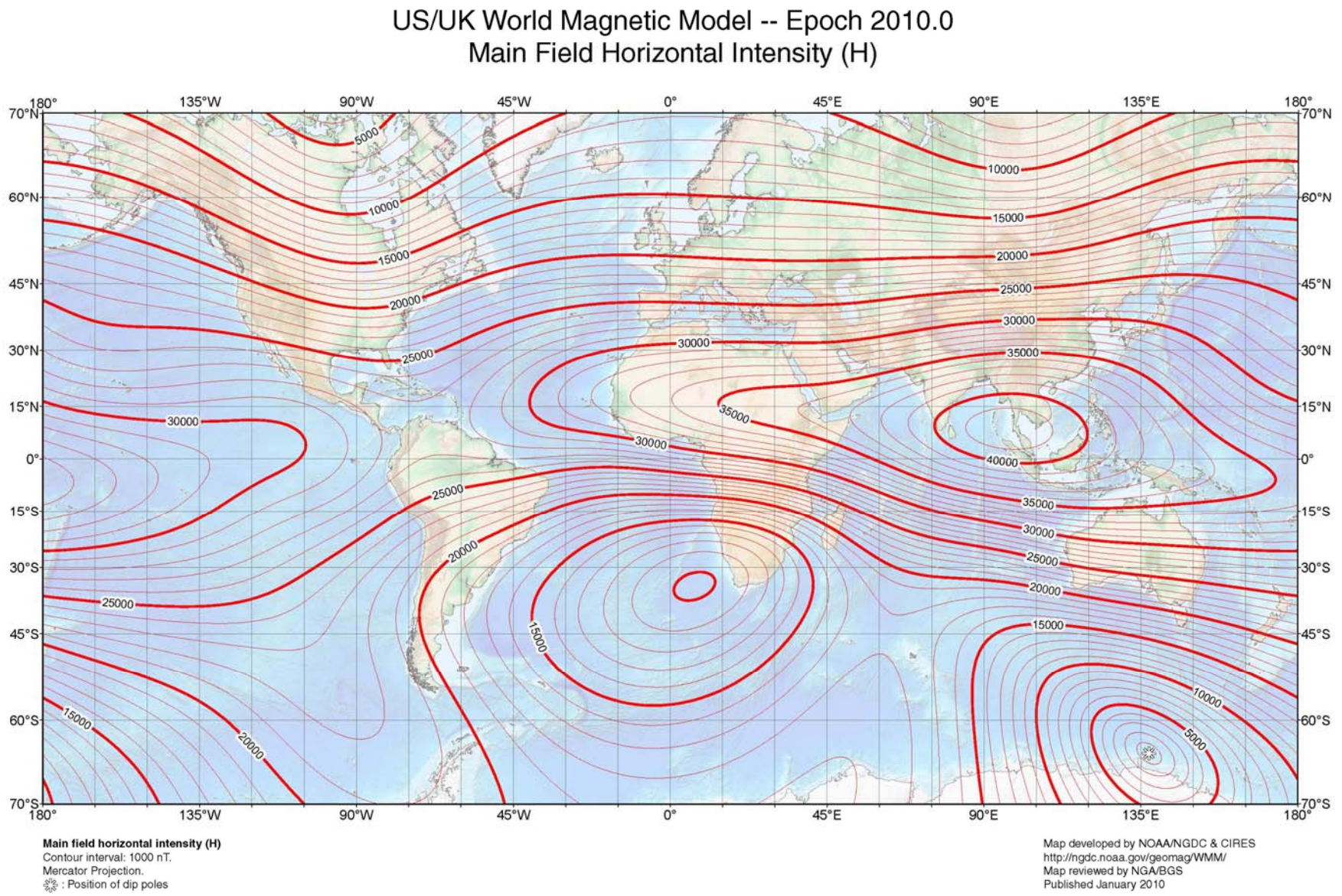
$$\tan d = Y_E / X_E$$

สนามแม่เหล็กอ้างอิงสากล (International Geomagnetic Reference Field, IGRF)



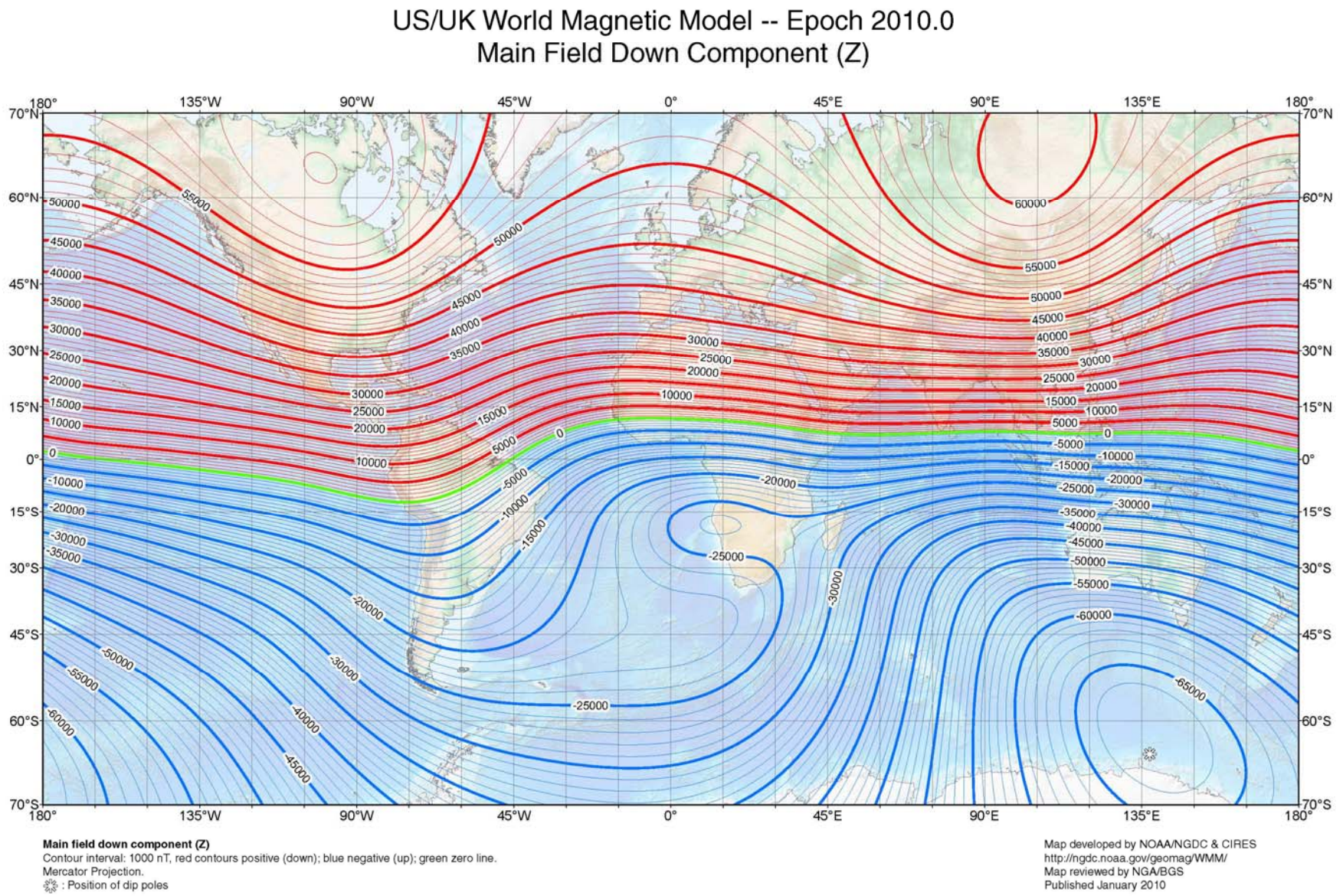
http://ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/image.shtml

สนามแม่เหล็กอ้างอิงสากล (International Geomagnetic Reference Field, IGRF)



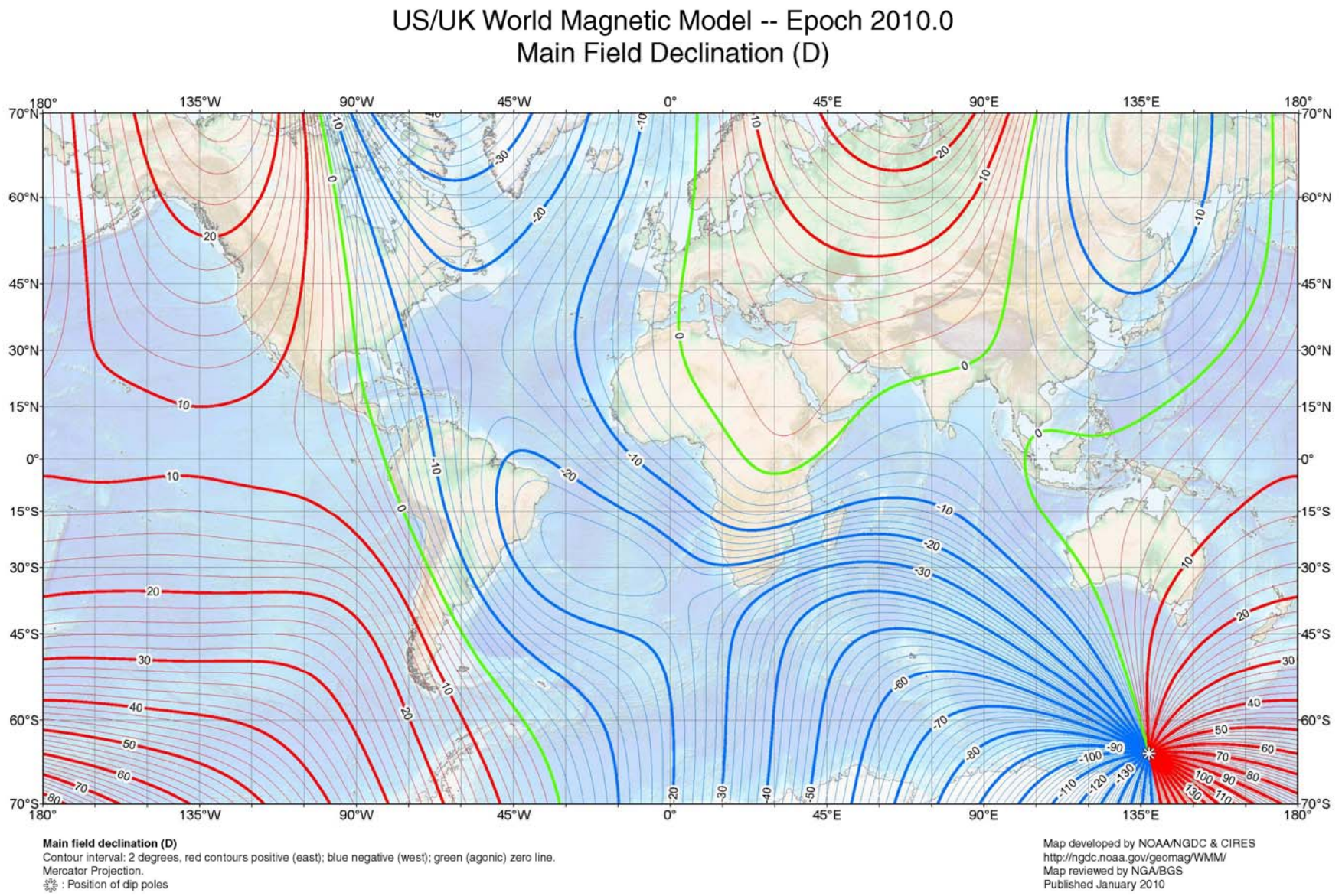
http://ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/image.shtml

สนามแม่เหล็กอ้างอิงสากล (International Geomagnetic Reference Field, IGRF)



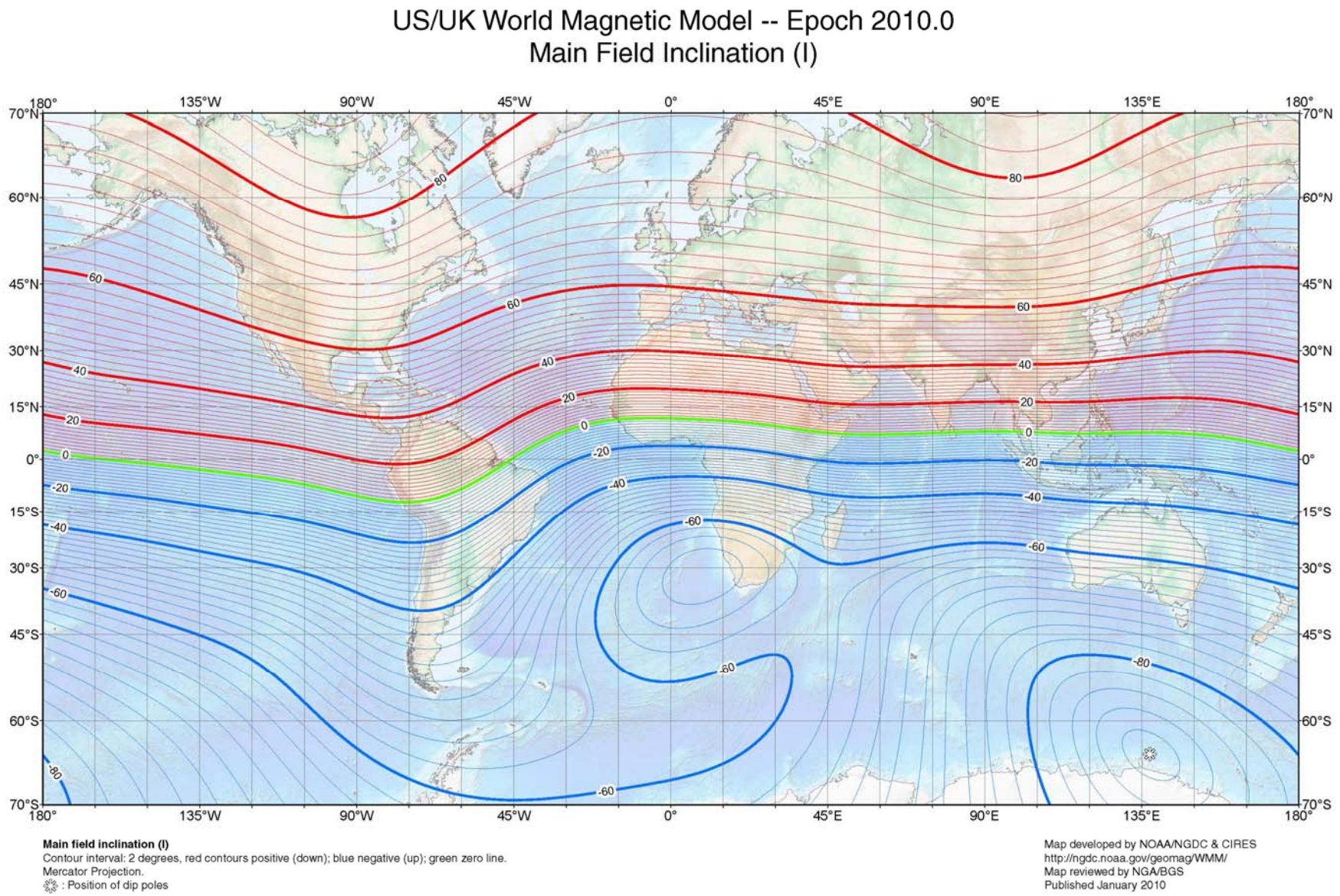
http://ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/image.shtml

สนามแม่เหล็กอ้างอิงสากล (International Geomagnetic Reference Field, IGRF)



http://ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/image.shtml

สนามแม่เหล็กอ้างอิงสากล (International Geomagnetic Reference Field, IGRF)



http://ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/image.shtml

Note จาก**สนามแม่เหล็กอ้างอิงสากล**

- ที่ตำแหน่งขั้วแม่เหล็กโลกพอดี มุมเทเท่ากับ 90^0 จะได้ $Z_E=B_E$
  มีค่าความเข้ม สนามแม่เหล็กโลกประมาณ 70,000 นาโนเทสลา
- ที่ตำแหน่งเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกพอดี มุมเทเท่ากับ 0^0 จะได้ $H_E=B_E$
  มีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโลกประมาณ 40,000 นาโนเทสลา
- THAILAND ไม่ได้อยู่ที่ตำแหน่งขั้วแม่เหล็ก แต่มีบางส่วนของภาคใต้อยู่ที่เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กพอดี ดังนั้นองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กโลกในประเทศไทยส่วนใหญ่จึงมีทั้งสนามแม่เหล็กโลกในแนวนอน และแนวดิ่ง และสนามแม่เหล็กโลกรวม เมื่อทำการสำรวจเราสามารถที่จะเลือกวัดเวคเตอร์องค์ประกอบใดองค์ประกอบหนึ่ง หรือเวคเตอร์สนามแม่เหล็กโลกรวม หากวัดเวคเตอร์องค์ประกอบใดองค์ประกอบหนึ่งโดยเฉพาะองค์ประกอบในแนวดิ่ง การแปลความหมายจะง่ายกว่าการวัดเวคเตอร์สนามแม่เหล็กโลกรวม

ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโลก

- จำนวนร้อยละ99 ของสนามแม่เหล็กโลก วางตัวอยู่แนวเหนือ-ใต้
- ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกตามทฤษฎีที่ผิวโลกโดยไม่มีการรบกวนจากสิ่งผิดปกติ (theoretical undisturbed magnetic field) หรือเรียกสั้นๆ ว่า "**สนามแม่เหล็กโลกหลัก (main magnetic field)**" มีค่าอยู่ระหว่าง 70,000-24,000 นาโนเทสลา โดยมีค่าสูงอยู่บริเวณขั้วโลก และค่าต่ำอยู่บริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตร
- จำนวนร้อยละ 1 ของสนามแม่เหล็กโลกที่เหลือ ยังไม่สามารถอธิบายได้อย่างชัดเจน
- ค่าความเข้มที่บริเวณผิวโลกของ main magnetic field มีสาเหตุมาจาก
    1) *สนามแม่เหล็กภายในโลก* เกิดเนื่องจากมีการไหลของกระแสไฟฟ้าภายในแกนโลกชั้นนอกที่เป็นของเหลว ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำเหล็กและนิกเกิลที่อยู่ในแกนโลกชั้นใน เป็นผลให้เกิดเป็นสนามแม่เหล็ก (ไฟฟ้า) ผลจากสนามแม่เหล็กในกรณีนี้ เชื่อว่ามีปริมาณมากที่สุด

- ค่าความเข้มที่บริเวณผิวโลกของสนามแม่เหล็กโลกหลัก มีสาเหตุมาจาก
  1) *สนามแม่เหล็กภายในโลก*
  2) *สนามแม่เหล็กจากภายนอกโลก* เชื่อว่าเกิดในชั้นบรรยากาศ จากผลของดวงจันทร์ และดวงอาทิตย์ สนามแม่เหล็กในกรณีนี้จะเกิดแบบประจำวันและชั่วครั้งชั่วคราว = การแปรผันตามเวลา
  3) *สนามแม่เหล็กที่เกิดร่วมกับแร่ที่มีสภาพเป็นแม่เหล็กถาวรหรือแม่เหล็กตกค้าง* บริเวณเปลือกโลกและเนื้อโลก ในส่วนที่มีอุณหภูมิน้อยกว่า อุณหภูมิกูรีและอุณหภูมินีลของแร่ที่มีสภาพเป็นแม่เหล็กถาวรหรือแม่เหล็กตกค้าง (ไม่เกิน ความลึกประมาณ 40-50 กิโลเมตรใต้ผิวดิน คิดเทียบจากอุณหภูมิไม่เกิน 1,200 °C) และสนามแม่เหล็กจากผลของการเหนี่ยวนำ แร่จำพวกที่สามารถเหนี่ยวนำให้มีสภาพเป็นแม่เหล็กได้ เมื่ออยู่ภายใต้ความแรงสนามแม่เหล็ก

การแปรผันของสนามแม่เหล็กโลกกับเวลา

1) **การแปรผันเซกูลาร์** (Secular Variation) เป็นการแปรผันอย่างช้าๆ และต่อเนื่องของสนามแม่เหล็กโลก ใช้เวลา 10 ถึง 100 ปี กลไกที่ทำให้เกิดการแปรผันของสนามแม่เหล็กโลกปัจจุบันยังไม่ทราบสาเหตุที่แน่ชัด และการแปรผันประเภทนี้ไม่มีผลต่อการสำรวจวัดสนามแม่เหล็กเนื่องจากเป็นการแปรผันที่ใช้เวลานานกว่าจะเห็นการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับระยะเวลาที่ใช้ในการสำรวจ

2) **การแปรผันประจำวัน** (Diurnal Variation)

การแปรผันประจำวันโดยดวงจันทร์ (lunar diurnal variation) เกิดขึ้นในคาบ ~25 ชั่วโมง มีขนาด ~20-80 nT เชื่อว่าน่าจะเกิดจากอิทธิพลของดวงจันทร์ กับชั้นบรรยากาศที่มีประจุไฟฟ้าอิสระที่เคลื่อนที่ไปมา ทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก จึงส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กโลกในรอบวัน

การแปรผันประจำวันโดยดวงอาทิตย์ (solar diurnal variation) เกิดขึ้นในคาบ ~24 ชั่วโมง มีค่าระหว่าง ~30-60 nT เชื่อว่าน่าจะเกิดจากการมีกระแสไฟฟ้าไหลในชั้นบรรยากาศของโลก ทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก และส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กโลกในรอบวัน การมีกระแสไฟฟ้าไหลในชั้นบรรยากาศน่าจะเกิดจากผลความสัมพันธ์ระหว่างสเปคตรัมแสงอาทิตย์กับอะตอมของไนโตรเจนและออกซิเจนในบรรยากาศ

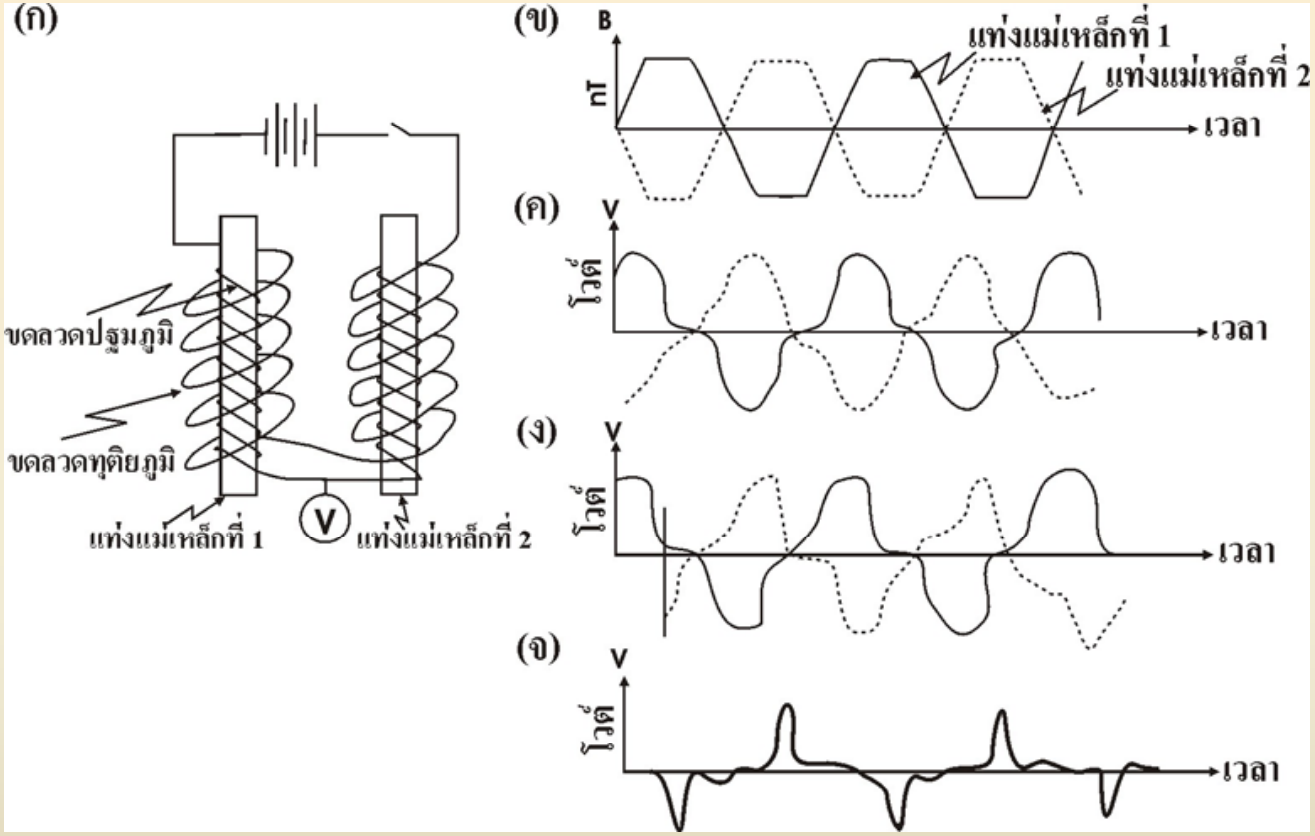
การแปรผันของสนามแม่เหล็กโลกกับเวลา

3) **พายุแม่เหล็ก** (Magnetic Storm) การแปรผันสนามแม่เหล็กพายุแม่เหล็ก เราไม่สามารถปรับแก้ได้ และการเกิดพายุแม่เหล็กเราไม่สามารถทำนายได้อย่างถูกต้องแม่นยำว่าจะเกิดเมื่อไร แต่ส่วนใหญ่พบว่าพายุแม่เหล็กเกิดขึ้นในรอบ ~27 วัน พายุแม่เหล็กอาจมีขนาด 1,000 nT หรือ มากกว่า หรือน้อยกว่า โดยมีการเปลี่ยนแปลงในระยะเวลาสั้นๆ ไม่แน่นอน อาจเกิดเป็นระยะเวลาหลายชั่วโมงหรือหลายวัน การเกิดพายุแม่เหล็กพบว่ามีความสัมพันธ์กับจุดดับ (sun spot) บนดวงอาทิตย์ หากเกิดพายุแม่เหล็กในขณะทำการสำรวจวัดสนามแม่เหล็ก (สังเกตจากค่าสนามแม่เหล็กที่อ่านได้ที่ตำแหน่งเดียว ซ้ำกันแตกต่างกันค่อนข้างมาก) ควรหยุดทำการสำรวจ เพราะเราไม่มีวิธีที่ปรับแก้ค่าจากพายุแม่เหล็ก

4) **การกลับขั้วของสนามแม่เหล็กโลก** (Magnetic Reversal) จากการศึกษาสนามแม่เหล็กโลกในอดีต พบว่าสนามแม่เหล็กโลกมีการกลับขั้วมาอย่างต่อเนื่อง คาบของการกลับขั้วมีค่ามาก จึงไม่มีผลต่อการสำรวจวัดสนามแม่เหล็กโลก เช่นเดียวกับกรณีของการแปรผันเซกูลาร์

เครื่องมือการสำรวจสนามแม่เหล็ก (magnetometer)

- *Fluxgate Magnetometer* ใช้วัดสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวดิ่งหรือแนวนอน



(ก) แท่งแม่เหล็กจำพวกเฟร์ไรต์พันด้วยขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ 2 แท่ง (ข) ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กเมื่อยังไม่มีการเหนี่ยวนำของแท่งแม่เหล็กทั้งสอง (ค) ค่าความต่างศักย์ในขดลวดทุติยภูมิของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในรูป (ข) (ง) ค่าความต่างศักย์ในขดลวดทุติยภูมิของกรณีฟลักซ์แม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงจากสนามแม่เหล็กภายนอก (จ) ผลรวมของ ค่าความต่างศักย์ของขดลวดทุติยภูมิระหว่างแท่งแม่เหล็กทั้งสอง

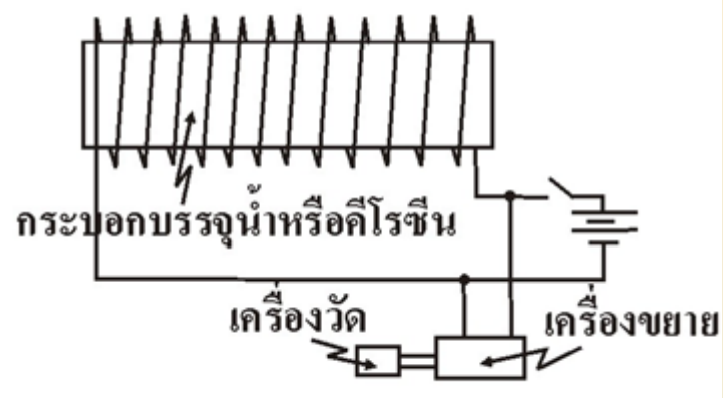
เครื่องมือการสำรวจสนามแม่เหล็ก (magnetometer)

- SQUID (Superconduction Quantum Interference Device) **หรือ** cryogenic magnetometer สามารถวัดสนามแม่เหล็กได้ด้วยความละเอียดสูงกว่าชนิดอื่นๆ ส่วนใหญ่ใช้ในห้องปฏิบัติการ ใช้สำหรับหยั่งหลุมเจาะ และใช้ในการบินสำรวจ เครื่องมือชนิดนี้ไม่เหมาะที่จะนำมาสำรวจภาคสนามด้วยการเดินสำรวจ ทั้งนี้เพราะจะต้องเก็บอยู่ในสภาวะที่เย็นจัดมาก

    ใช้วัดสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวดิ่งหรือแนวนอน

เครื่องมือการสำรวจสนามแม่เหล็ก (magnetometer)

- Proton Precession Magnetometer วัดสนามแม่เหล็กโลกรวม (total earth's magnetic field)



เมื่อเปิดสวิทซ์ กระแสไฟฟ้าตรงไหลออกไปตามสายไฟไปที่ลวดที่พันรอบทรงกระบอกเครื่องรับรู้ ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่บริเวณเครื่องรับรู้ นั่นคือ เราสร้างสนามแม่เหล็กขึ้น โปรตอนของไฮโดรเจนอะตอมในทรงกระบอก จะหมุน (spin) ตามโมเมนต์แม่เหล็กขั้วคู่ โดยแกนการหมุนจะเรียงตัวตามแนวของสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้น

เมื่อปิดสวิทซ์ สนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นด้วยการปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดหมดไป โปรตอนของไฮโดรเจนอะตอมจะเรียงตัวใหม่ตามทิศทางของสนามแม่เหล็กโลก ที่มีอยู่ในขณะนั้นจากการหมุนของโปรตอนเพื่อจัดเรียงตัวใหม่ตามสนามแม่เหล็กโลก ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าสลับในขดลวดที่พันทรงกระบอก และมีค่าความถี่ของกระแสไฟฟ้าสลับเท่ากับการหมุนของโปรตอน ค่าของความถี่การหมุนเป็นสัดส่วนกับค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กโลก เมื่อเราทราบค่าคงตัวของอัตราส่วนโมเมนต์แม่เหล็กต่อโมเมนตัมเชิงมุมของการหมุนของโปรตอน เราสามารถหาค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกได้

เครื่องมือการสำรวจสนามแม่เหล็ก (magnetometer)

- Optically Pumped Magnetometer

วัดสนามแม่เหล็กโลกรวม

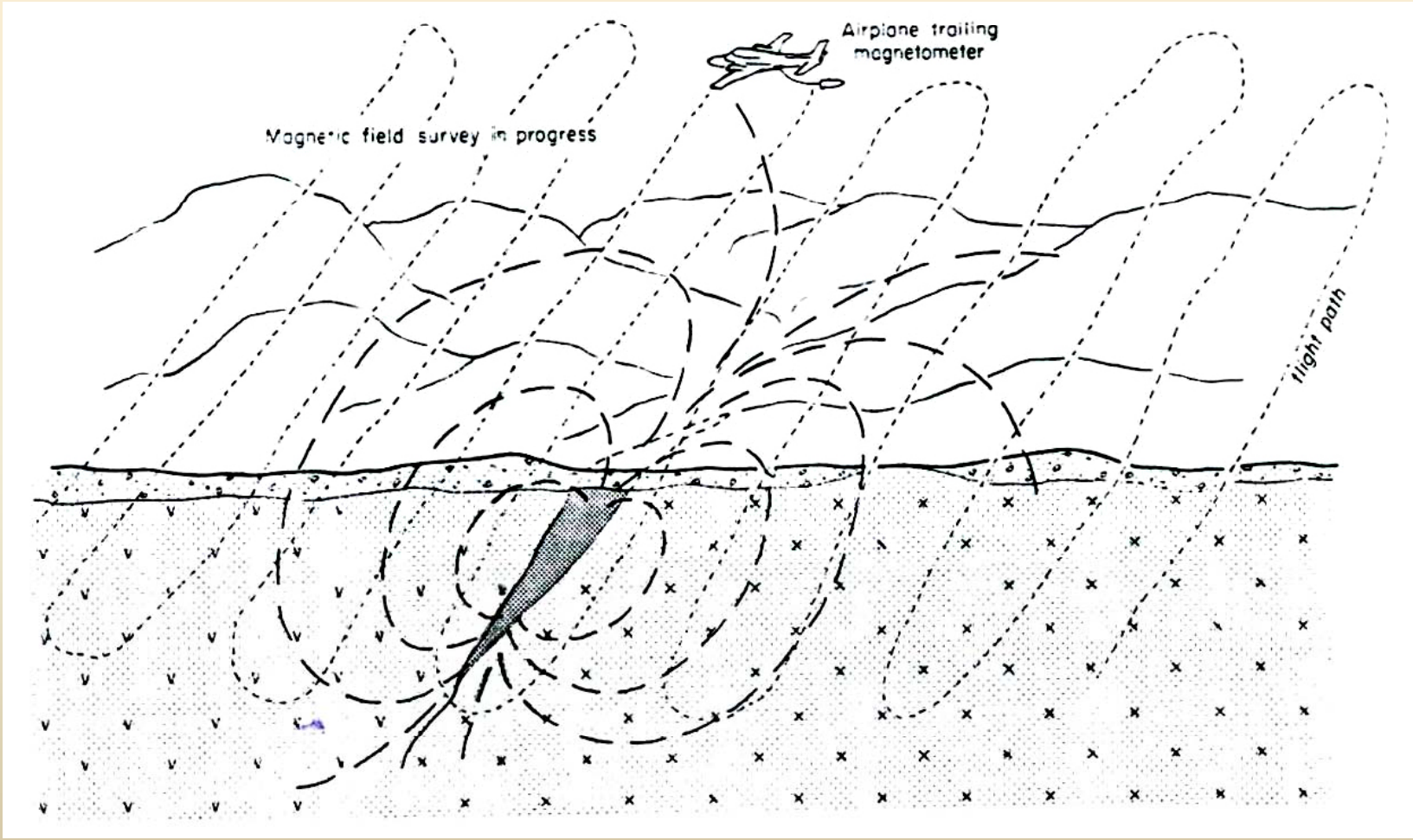
ใช้หลักการรบกวน (irradiating) อิเล็กตรอนให้เกิดการเคลื่อนจากระดับพลังงานปกติสูงขึ้นไปอีกระดับพลังงานหนึ่งในโครงสร้างอะตอม ส่วนใหญ่เลือกใช้ก๊าซ He หรือก๊าซโลหะอัลคาไลต์ ที่มีโมเมนต์แม่เหล็กในโครงสร้างอะตอม เช่น Na, Rb, Cs, K มาเป็นส่วนประกอบ

การรบกวนทำโดยใช้แสงจากคลื่นวิทยุความถี่ต่ำฉายไปในก๊าซฮีเลียม หรือก๊าซโลหะอัลคาไลต์เพื่อกระตุ้นให้อิเล็กตรอนเคลื่อนไปอยู่ที่ระดับพลังงานสูง จากนั้นหยุดการรบกวน อิเล็กตรอนจะเคลื่อนกับมาอยู่ที่ระดับเดิมและจะปล่อยพลังงานออกมา จากนั้นวัดพลังงานที่ปล่อยออกมาและสามารถคำนวณหาความถี่จากพลังงานที่ปล่อยออกมาและหาสนามแม่เหล็กได้

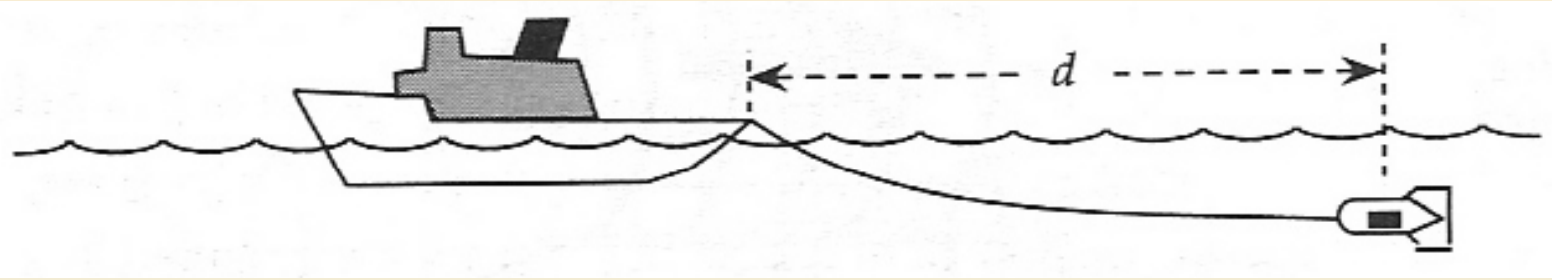
Magnetic Field Surveys

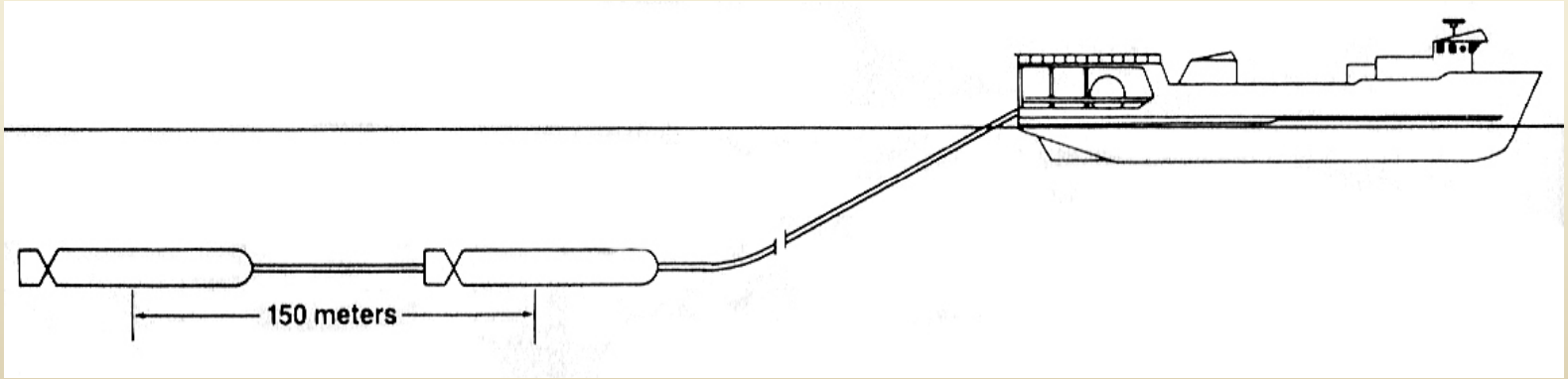
- การสำรวจทางอากาศ (airborne magnetic survey)
- การสำรวจทางเรือ (shipborne magnetic survey)
- การเดินสำรวจ (ground based magnetic survey)
- การหยั่งหลุมเจาะ (borehole logging)

airborne magnetic survey



shipborne magnetic survey





การปรับแก้ค่าสนามแม่เหล็กก่อนแปลความหมาย

- **การปรับแก้การแปรผันประจำวัน** (Diurnal Correction)

ปรับแก้ได้ โดยที่เมื่อทำการสำรวจ จะต้องกำหนดสถานีฐาน เพื่อกลับมาอ่านค่าที่สถานีฐานทุกๆ 2-4 ชั่วโมง คล้ายกับการสำรวจวัดค่าความเร่งโน้มถ่วง ค่าที่อ่านได้ในช่วงเวลาที่ต่างกัน จะนำมาปรับแก้กับค่าอื่นของแต่ละสถานี โดยการเทียบสัดส่วนแบบสมการเส้นตรง

หรืออาจใช้เครื่องมือ 2 เครื่อง โดย 1 เครื่องประจำที่สถานีฐานและทำการอ่านทุกๆ 1-2 ชั่งโมง หากพบว่าค่าสนามแมเหล็กที่อ่านได้ในแต่ละสถานีไม่นิ่ง หรือค่าที่อ่านได้ที่ตำแหน่งเดียวกันแตกต่างกันค่อนข้างมาก (ไม่ควรเกิน **+-** 3 nT) หรือเมื่อตรวจสอบที่สถานีฐานพบค่าการเปลี่ยนแปลงสูงอย่างผิดปกติ ควรหยุดทำการสำรวจ นั่นแสดงว่าเกิดพายุแม่เหล็ก ที่มีผลทำให้สนามแม่เหล็กโลกเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

การปรับแก้ค่าสนามแม่เหล็กก่อนแปลความหมาย

- **การปรับแก้ปกติ** (Normal Correction) **หรือ** Spatial **หรือ** geomagnetic correction

คล้ายกับการปรับแก้ละติจูดของการสำรวจวัดความเร่งโน้มถ่วง

(1) ***ปรับแก้โดยใช้รูปจำลองสนามแม่เหล็กโลก IGRF***

สมการค่อนข้างยุ่งยาก มีตัวแปรที่สำคัญคือ ตำแหน่งของละติจูดและลองติจูด

(2) ***ปรับแก้โดยใช้การหาวิเคราะห์แนวโน้ม*** *(Trend Analysis)*

ง่ายกว่าวิธีข้างตบน เพียงดูแนวโน้มของค่าสนามแม่เหล็กส่วนใหญ่ จากนั้นแยกพิจารณาเฉพาะค่าความผิดปกติที่แตกต่างไปจากแนวโน้มส่วนใหญ่

- **การปรับแก้ความสูง-ต่ำของพื้นที่** (elevation correction)

หากความแม่นยำของเครื่องมืออ่านได้ 1 nT ความต่างระดับของพื้นที่น้อยกว่า 100 เมตร แทบจะไม่มีผลต่อการปรับแก้ค่าความระดับ ดังนั้นหากความต่างระดับไม่มากนัก การปรับแก้ค่าความต่างระดับของสถานี ไม่จำเป็นต้องปรับแก้

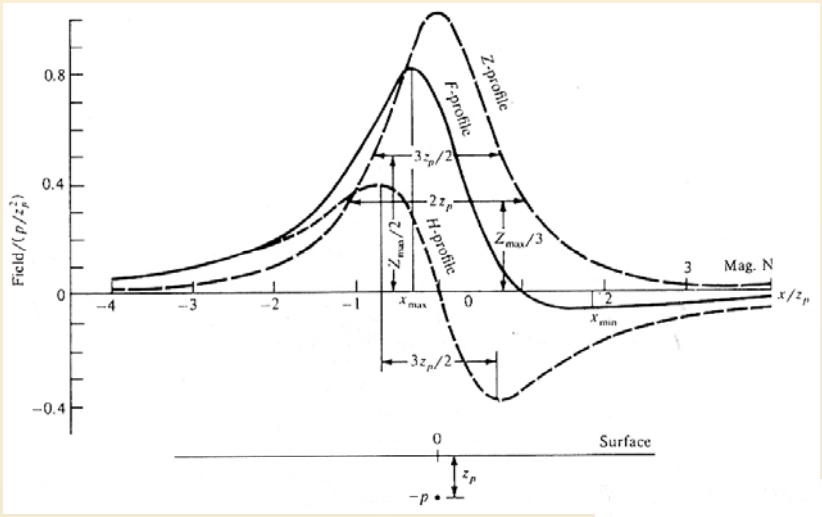
Magnetic Data Interpretation

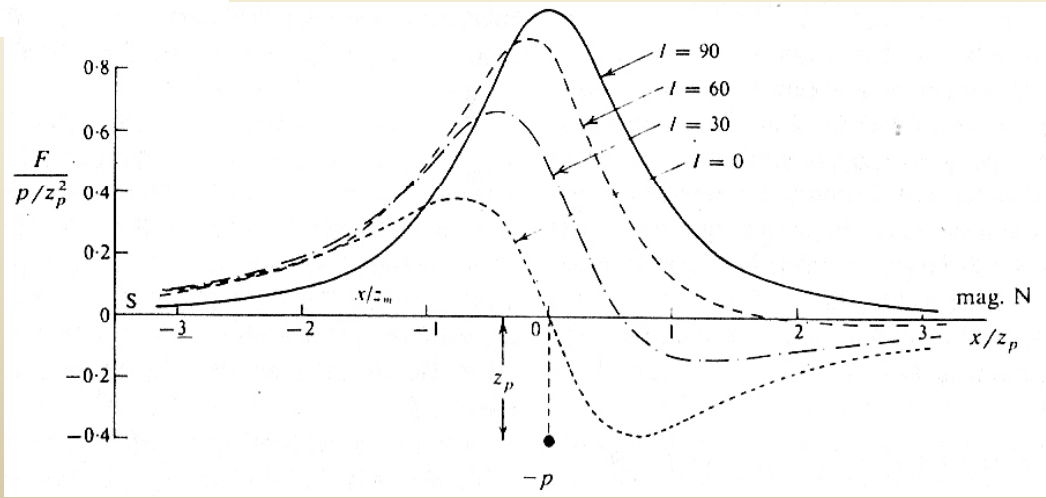
- การแปลความหมายอย่างหยาบ
- การประมาณระดับความลึก
- การแปลความหมายสนามแม่เหล็กรวม
  - forward modeling
  - inverse method
  - distribution of magnetic field
  - depth to magnetic anomaly body
- modeling

indirect interpretation

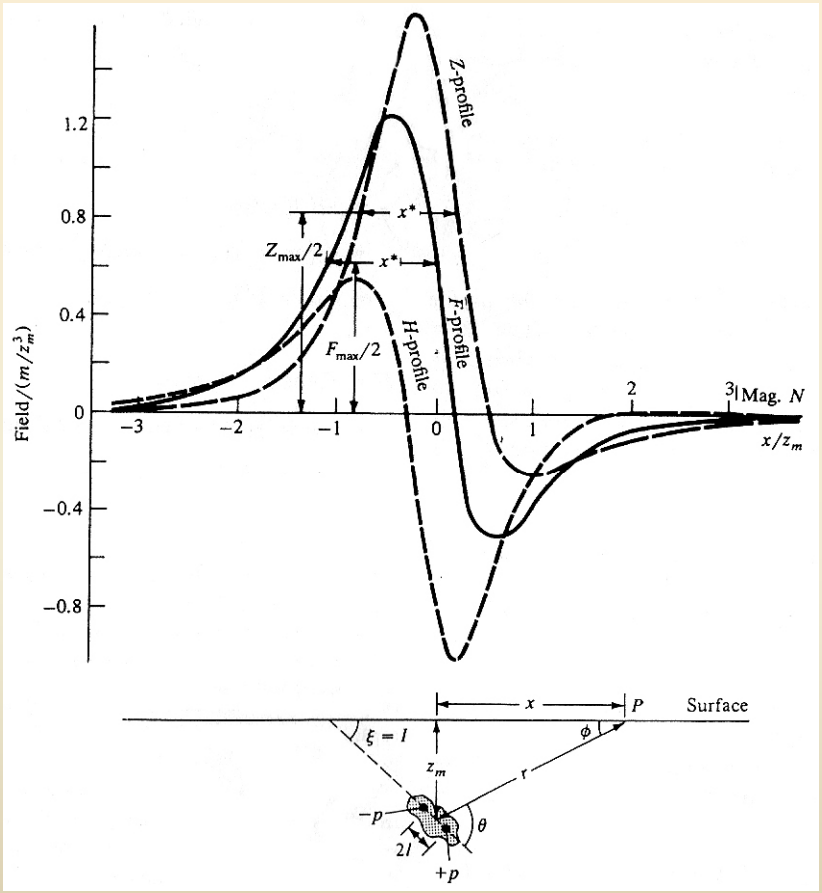
- monopole
- dipole
- dike
- horizontal cylinder

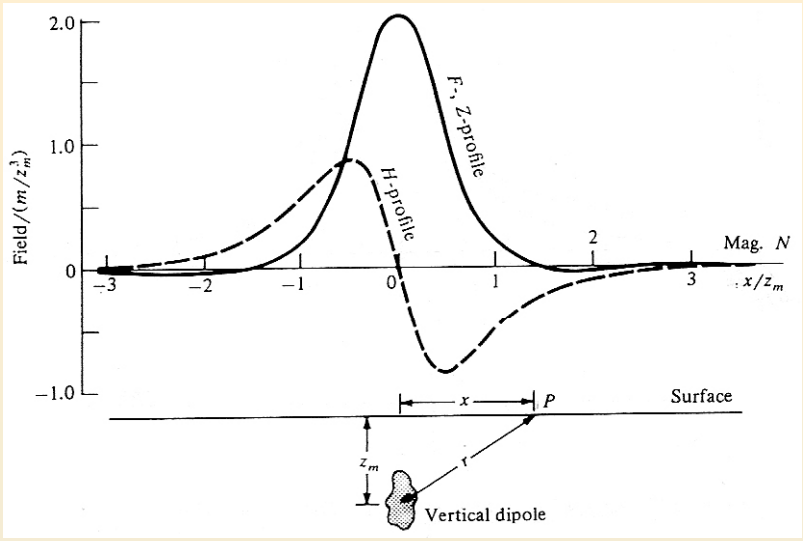
monopole

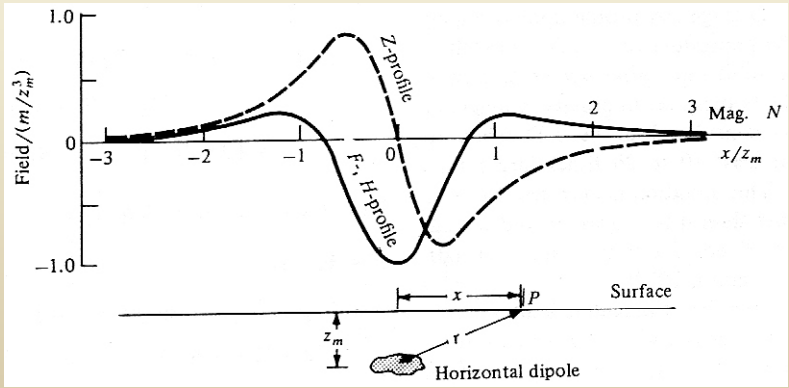

Z-profile
F-profile
H-profile
$3z_p/2$
$2z_p$
$Z_{max}/2$
$Z_{max}/3$
x_{max}
x_{min}
Mag. N
x/z_p
Field/(p/z_p^2)
0.8
0.4
0
−0.4
−4
−3
−2
−1
0
1
2
3
Surface
z_p
$-p$

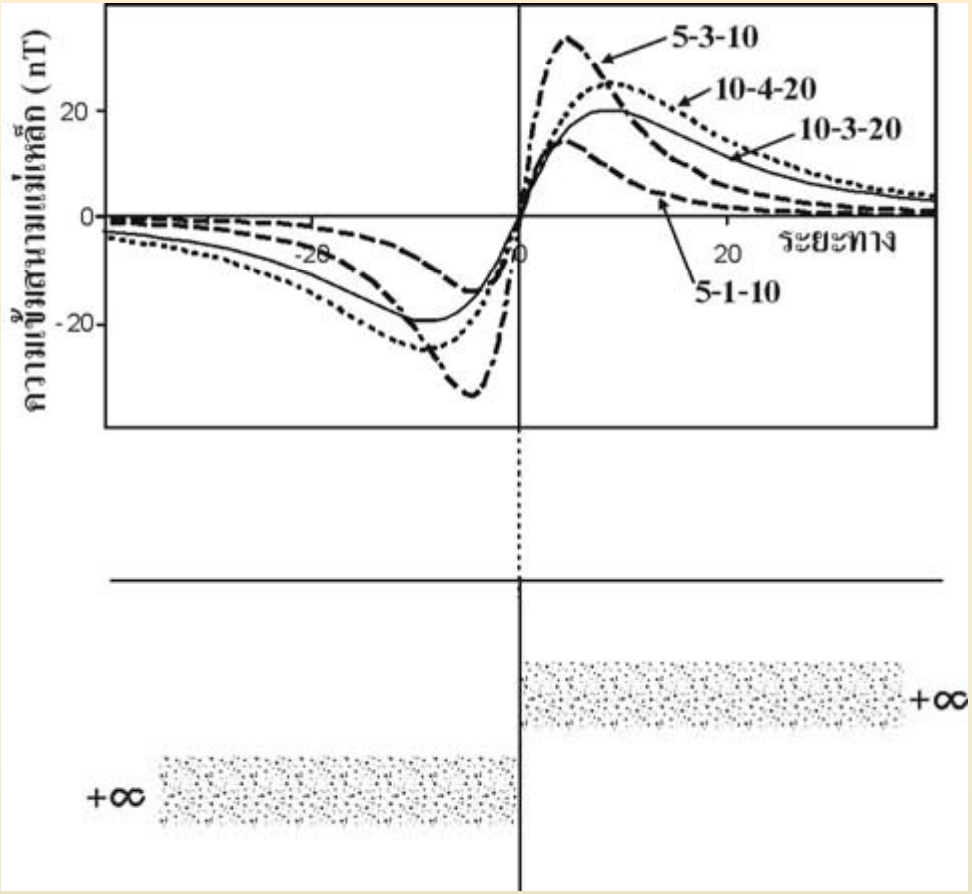

$I = 90$
$I = 60$
$I = 30$
$I = 0$
$\frac{F}{p/z_p^2}$
0·8
0·6
0·4
0·2
0
−0·2
−0·4
S
x/z_m
mag. N
−3
−2
−1
0
1
2
3
x/z_p
z_p
$-p$

dipole

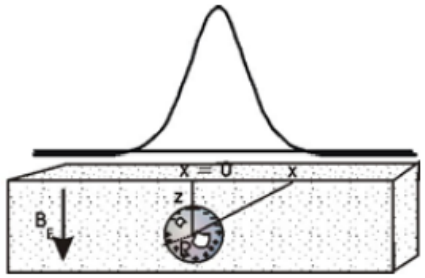
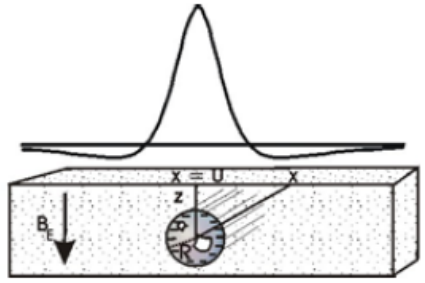

Z-profile
F-profile
H-profile
x^*
$Z_{max}/2$
$F_{max}/2$
Field/(m/z_m^3)
Mag. N
x/z_m
Surface
x
P
$\xi = l$
ϕ
z_m
r
$-p$
θ
$2l$
$+p$


F-, Z-profile
H-profile
Field/(m/z_m^3)
Mag. N
x/z_m
Surface
x
P
z_m
r
Vertical dipole

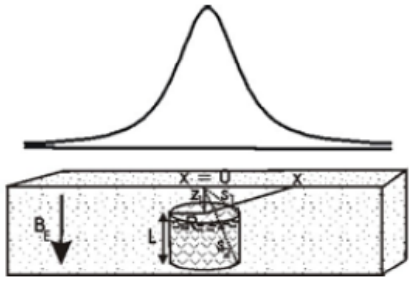
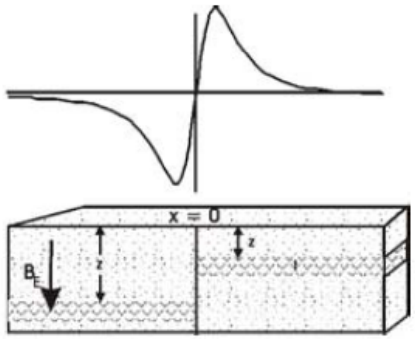

Z-profile
F-, H-profile
Field/(m/z_m^3)
Mag. N
x/z_m
Surface
x
P
z_m
r
Horizontal dipole



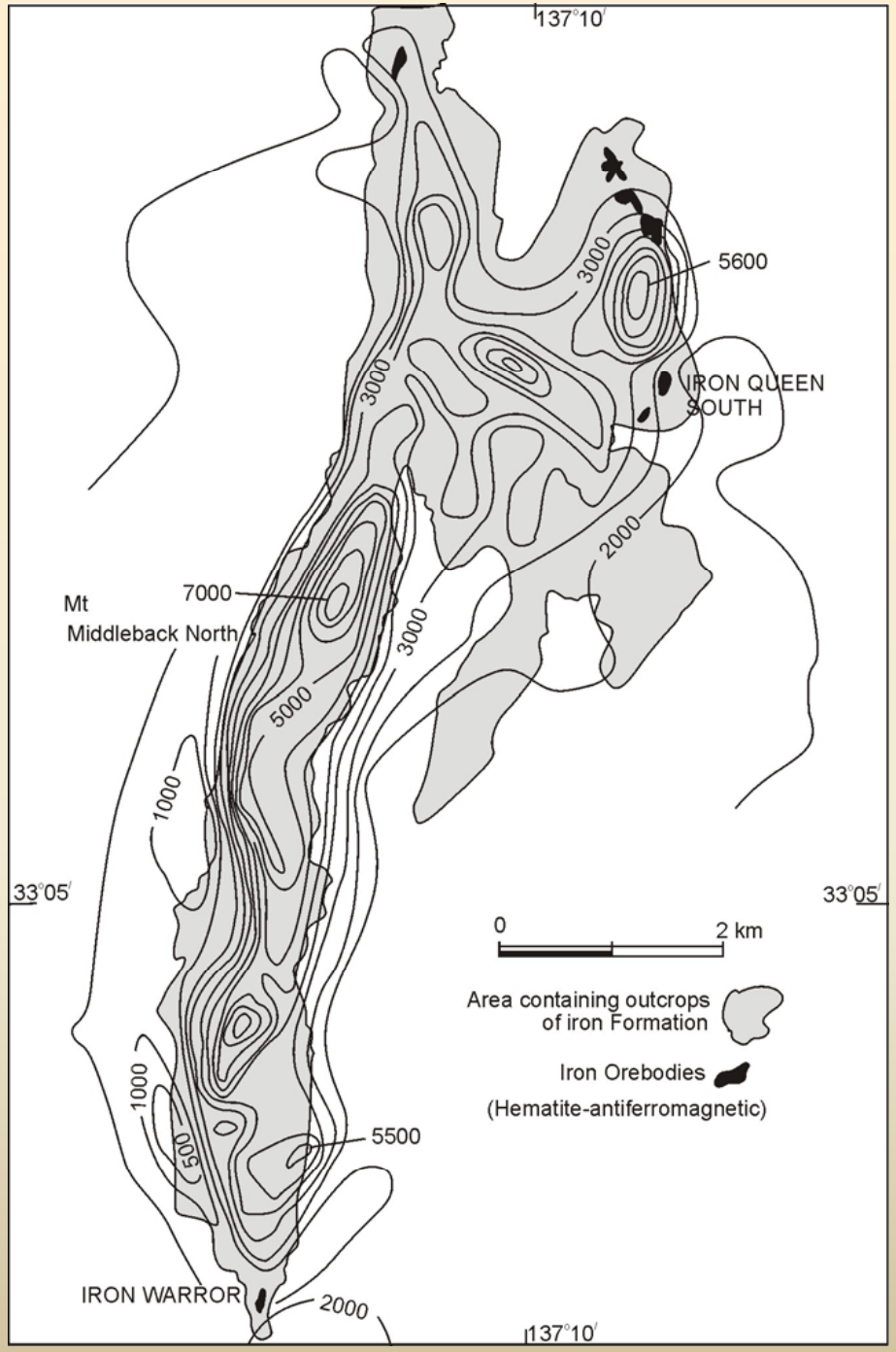
กราฟค่าความผิดปกติสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแผ่นหินเลื่อนระดับ ตัวเลขที่แสดงกำกับเส้นกราฟ เช่น 5-3-10 หมายถึงแผ่นหินบนอยู่ลึก 5 เมตร หนา 3 เมตร แผ่นหินล่างอยู่ลึก 10 เมตร

กราฟและรูปร่างของวัตถุผิดปกติ	สมการคำนวณหาความผิดปกติแนวดิ่ง
ทรงกลม 	$Z_A = \kappa B_E \frac{4}{3}\pi R^3 \frac{\left(2z^2 + x^2\right)}{\left(x^2 + z^2\right)^{5/2}}$ $\Delta g_z = G\frac{4}{3}\pi R^3 \Delta\rho \frac{z}{\left(x^2 + z^2\right)^{3/2}}$
ทรงกระบอกแนวนอน 	$Z_A = \kappa B_E 2\pi R^2 \frac{\left(z^2 - x^2\right)}{\left(x^2 + z^2\right)^2}$ $\Delta g_z = G\Delta\rho 2R^2 \frac{z}{x^2 + z^2}$

กราฟค่าความผิดปกติสนามแม่เหล็กจากวัตถุผิดปกติและสมการคำนวณหาความเข้มสนามแม่เหล็กของวัตถุผิดปกติแนวดิ่ง พร้อมทั้งสมการคำนวณหาสนามความเร่งโน้มถ่วง

ทรงกระบอกแนวดิ่ง  	$Z_A = \kappa B_E \pi R^2 \frac{z}{\left(x^2 + z^2\right)^{3/2}}$ $\Delta g_z = G\Delta\rho 2\pi(s_2 - s_1 + L)$
แผ่นหินเลื่อนระดับ  	$Z_A = kB_E t\left(\frac{z_1}{z_1^{\,2} + x^2} - \frac{z_2}{z_2^{\,2} + x^2}\right)$ $\Delta g_z = G\Delta\rho 2t\left(\pi + a - b\right)$ $a = \tan^{-1}\left(\frac{x}{z_1} + \cot\phi\right)$ $b = \tan^{-1}\left(\frac{x}{z_2} + \cot\phi\right)$

กราฟค่าความผิดปกติสนามแม่เหล็กจากวัตถุผิดปกติและสมการคำนวณหาความเข้มสนามแม่เหล็กของวัตถุผิดปกติแนวดิ่ง พร้อมทั้งสมการคำนวณหาสนามความเร่งโน้มถ่วง



แผนที่เส้นชั้นค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก หน่วยเป็นนาโนเทสลา ช่วงชั้น 500 นาโนเทสลา บริเวณพื้นที่ออสเตรเลียใต้ (Northern Middleback Range, South Australia) เป็นสินแร่เหล็กที่มีทั้งพวกเฟร์โรแมกเนติกและแอนติเฟร์โรแมกเนติก ในกรณีของแอนติเฟร์โรแมกเนติก ค่าความผิดปกติของค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไม่ปรากฏ