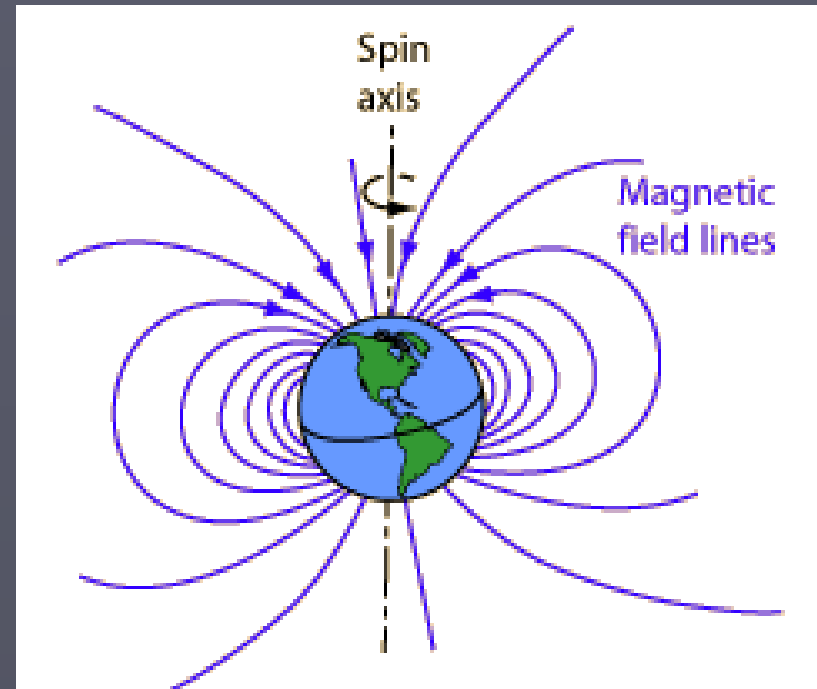
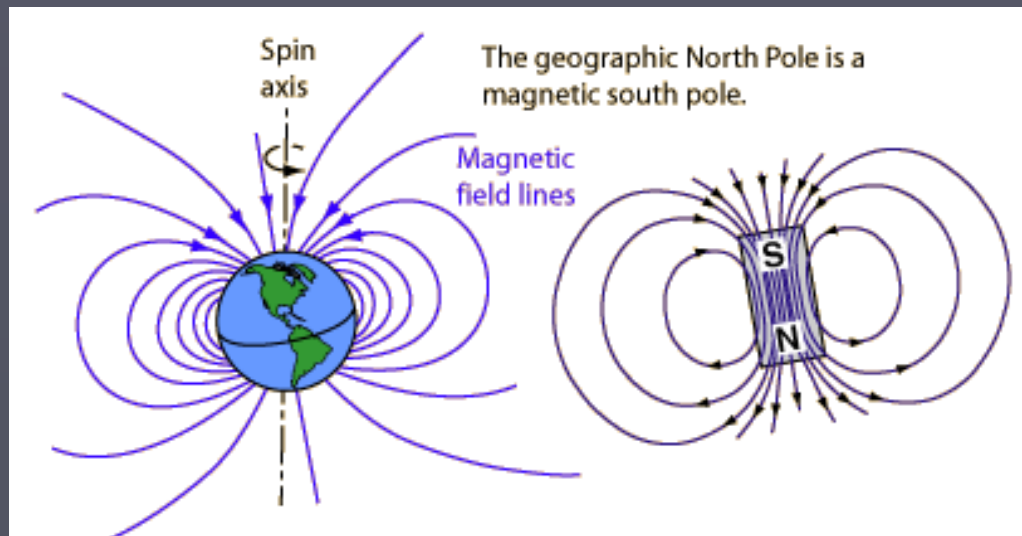
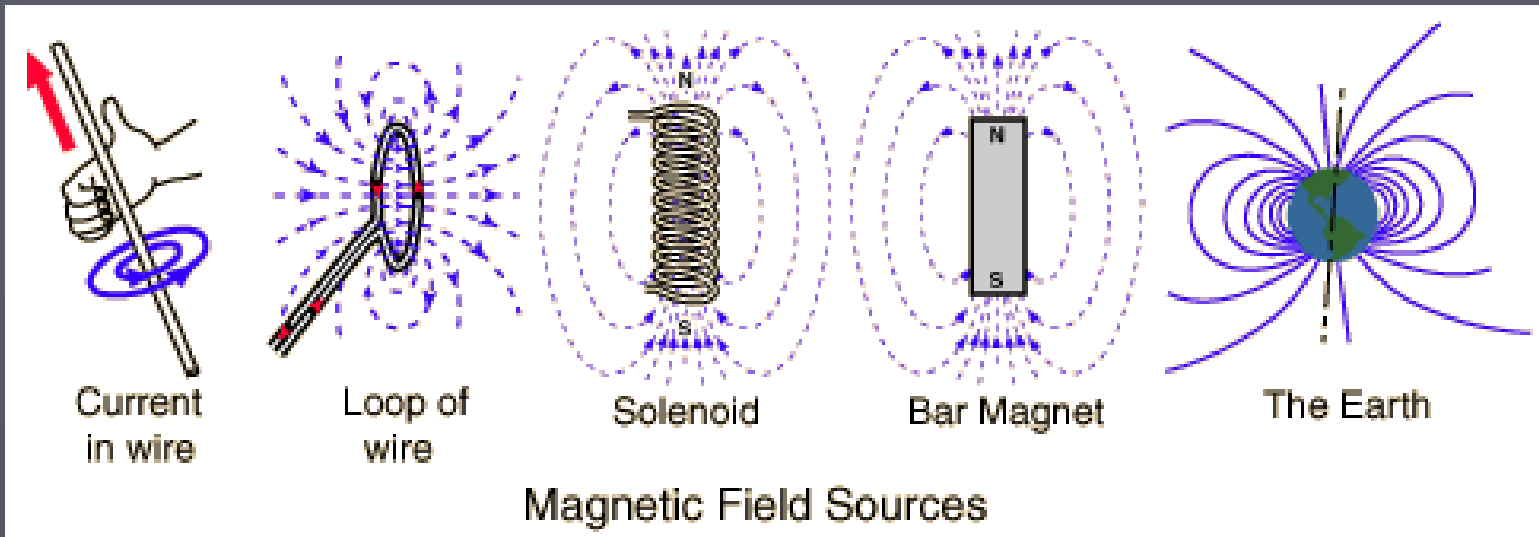


Magnetometrie

- ▶ studuje magnetické pole Země
- ▶ studuje magnetické vlastnosti hornin
- ▶ sestavuje magnetické mapy a umožňuje vyhledávat nerosty obsahující magnetické minerály



Zdroje magnetického pole



Magnetické vlastnosti látek

Látky dělíme podle magnetické susceptibility na:

diamagnetické $\chi < 0$

paramagnetické $\chi > 0$

feromagnetické $\chi \gg 0$

Diamagnetické látky ($\chi < 0$)

Např.: grafit, sádrovec, křemen, živec, diamant

Orbitální pohyb elektronů vytváří malé proudové smyčky, které jsou zdrojem magnetického pole. Podle Lenzova zákona je magnetické pole těchto smyček orientované proti vnějšímu magnetickému poli. Diamagnetismus je obecná vlastnost všech látek, nezávisí na teplotě.

Magnetické vlastnosti látek

Paramagnetické látky ($\chi > 0$)

Např.: pyrit, muskovit, amfibol, siderit, pyroxen

Kromě magnetického pole vyvolaného orbitálním pohybem elektronů je zdrojem magnetického pole na atomární úrovni spin elektronů. Ve většině látek se tyto magnetické momenty ruší. V paramagnetických látkách toto rušení není dokonalé, zůstává magnetické pole nepárových elektronů.

Magnetizace těchto látek přímo úměrná intenzitě magnetizujícího pole a nepřímo úměrná teplotě.

Magnetické vlastnosti látek

Feromagnetické látky ($\chi > 0$)

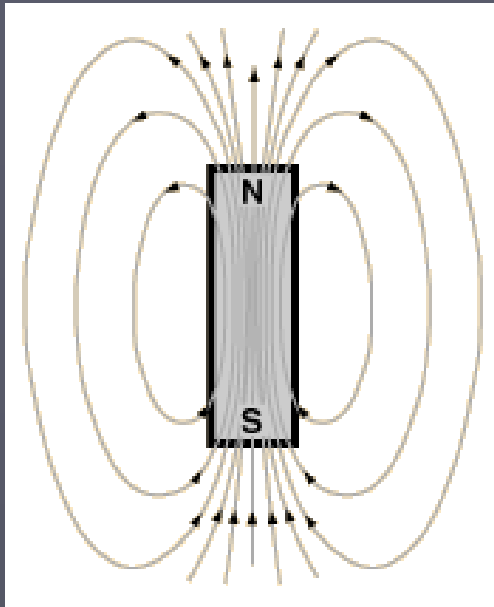
Např.: magnetit Fe_3O_4 , titanomagnetit, chromit, pyrrhotin

Spinové magnetické momenty nepárových elektronů jsou i mimo vnější magnetické pole organizovány do domén spontánní magnetizace.

Magnetizace vykazuje nasycení a hysterezi a silně závisí na teplotě.

Domény spontánní magnetizace

mikroskopické uspořádání spinových momentů nespárovaných elektronů
sousedních atomů feromagnetických látek

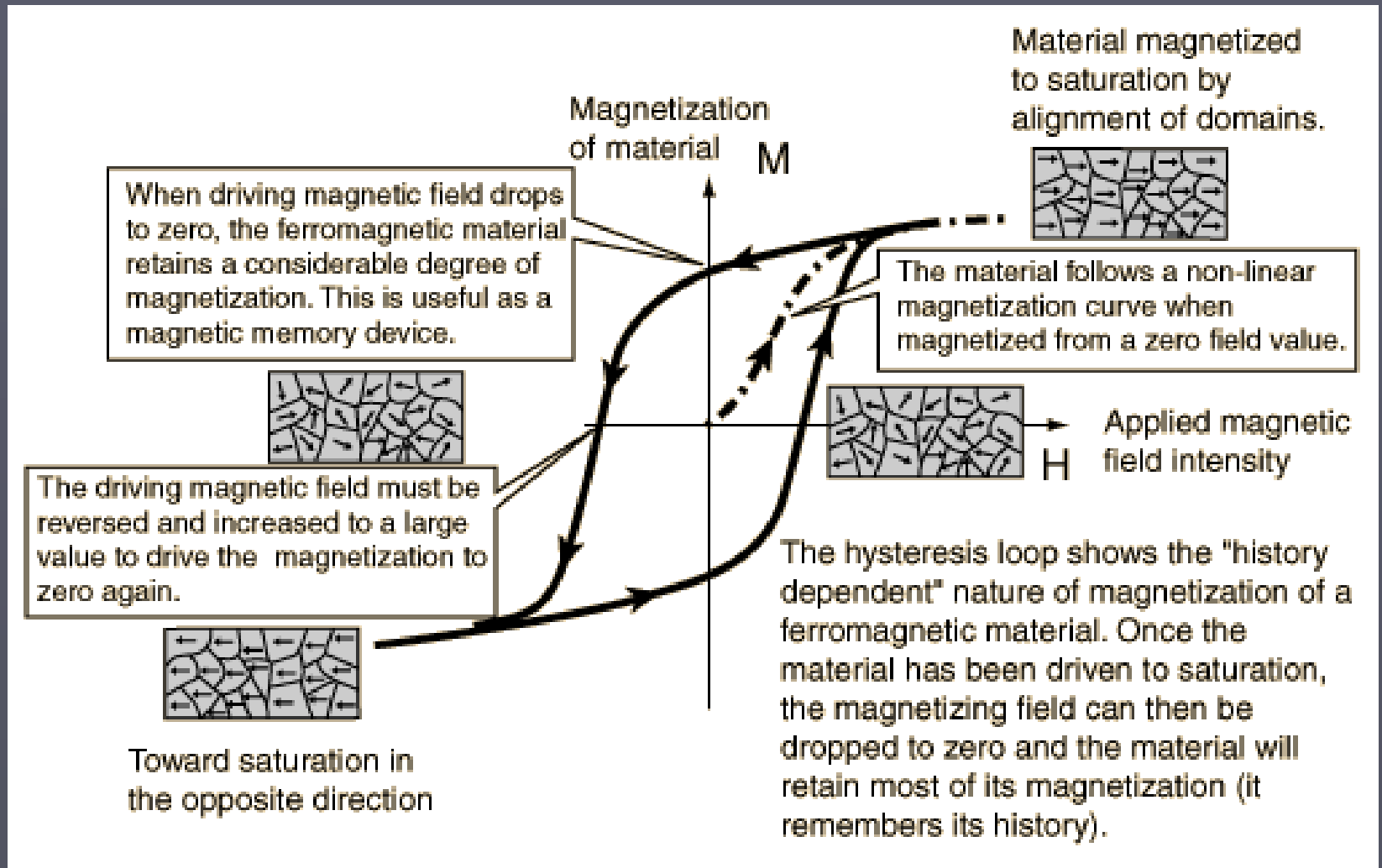


In bulk material the domains usually cancel, leaving the material unmagnetized.

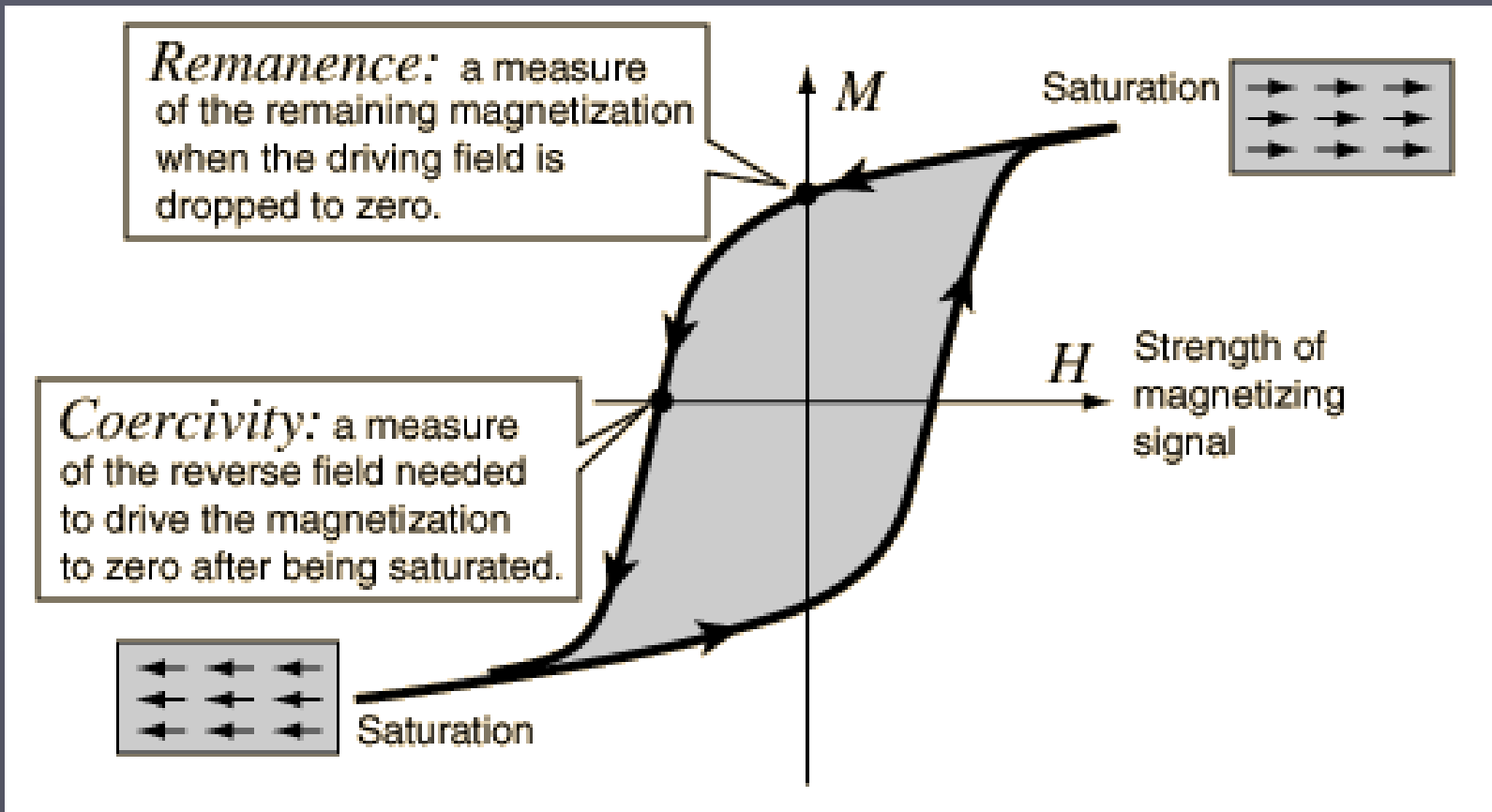
Externally applied magnetic field.

Iron will become magnetized in the direction of any applied magnetic field. This magnetization will produce a magnetic pole in the iron opposite to that pole which is nearest to it, so the iron will be attracted to either pole of a magnet.

Hysterezní křivka



Koercitivní síla



Curieova teplota

- ▶ Spontánní magnetizace feromagnetických látek mizí při dosažení tkz. Curieovy teploty, která pro magnetit činní asi 580°C (pro železo asi 770°C).
- ▶ Nad Curieovou teplotou se látky chovají jako paramagnetika.
- ▶ The Curie temperature gives an idea of the amount of energy takes to break up the long-range ordering in the material. At 770°C the thermal energy is about 0.135 eV compared to about 0.04 eV at room temperature.

Popis magnetického pole

U magnetický potenciál [A]
 \vec{H} intenzita mag. pole [A/m]
 \vec{B} magnetická indukce [T], [1mT = 1γ]

Vztah mezi těmito veličinami je následující:

$$\vec{H} = -\text{grad } U$$

$$\text{kde } \text{grad } U(x, y, z) = \frac{\partial U}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial U}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial U}{\partial z} \vec{k}$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

kde $\mu = \mu_0 \mu_r$ je permeabilita prostředí

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m ... permeabilita vakua

Magnetizace hornin

Stupeň smagnetování látky popisuje magnetizace

$$\vec{M} = \vec{M}_i + \vec{M}_r \quad [\text{Am}^{-1}]$$

(indukovaná) (remanentní)

Pro indukovanou magnetizaci platí :

$$\vec{M}_i = \chi \vec{H}$$

kte χ [1] je magnetická objemová susceptibilita

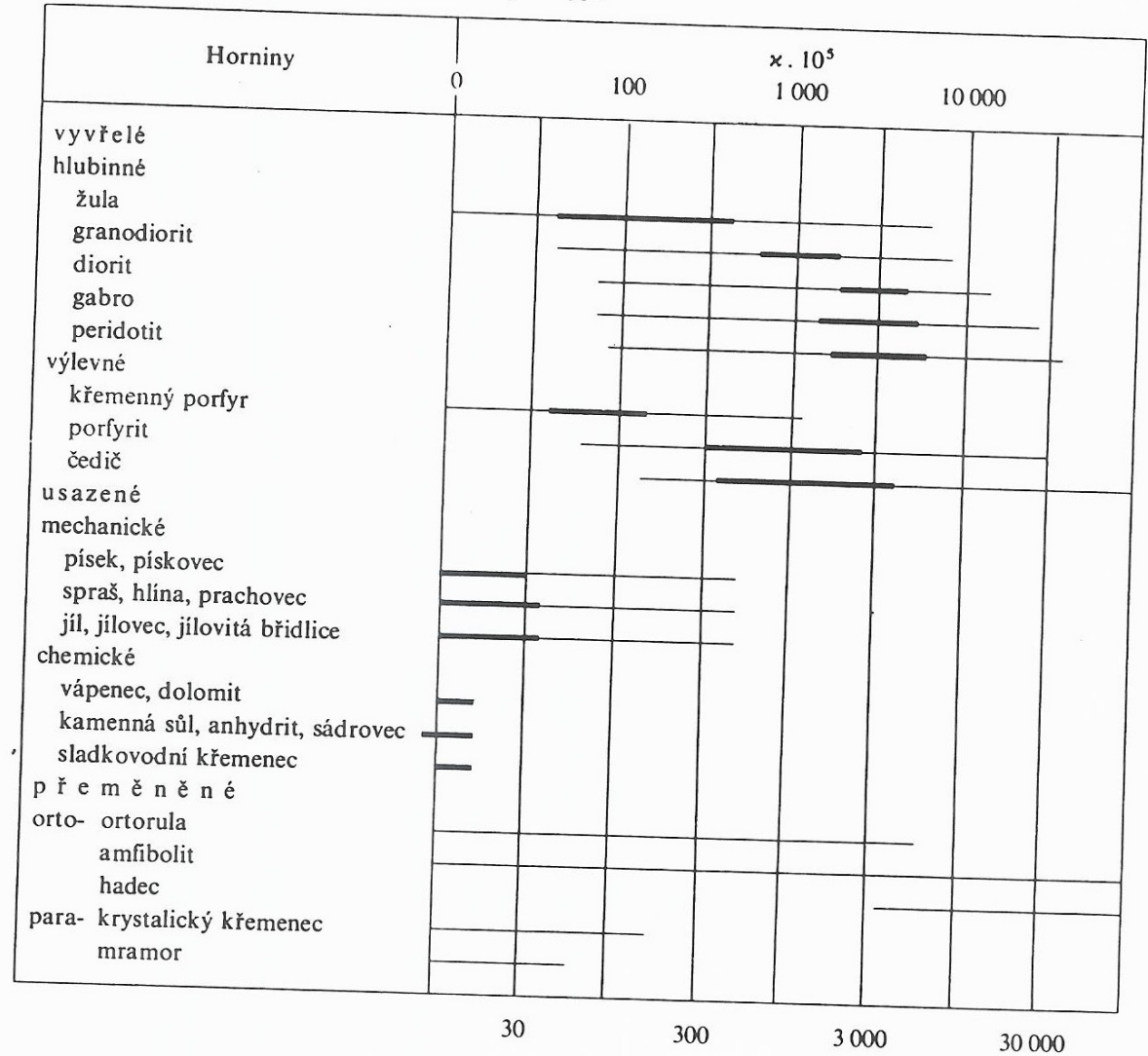
Susceptibilita χ závisí na množství a druhu feromagnetických minerálů.

Kapameter – měřič magnetické susceptibility



Susceptibilita hornin

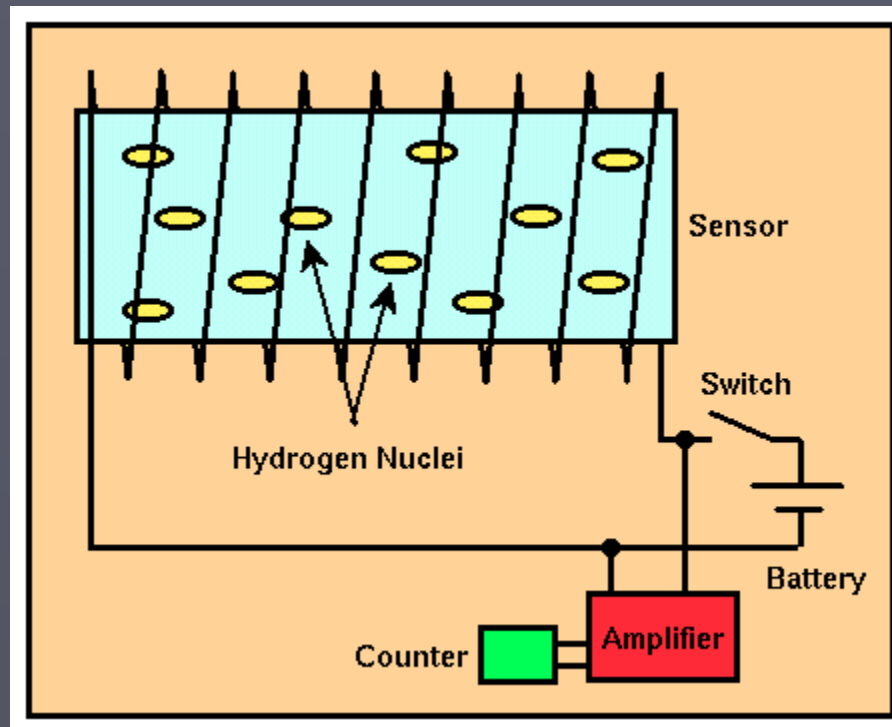
Tabulka 9
Objemová susceptibilita běžných horninových typů



Protonový magnetometr přístroj na měření indukce zemského magnetického pole



Princip protonového magnetometru

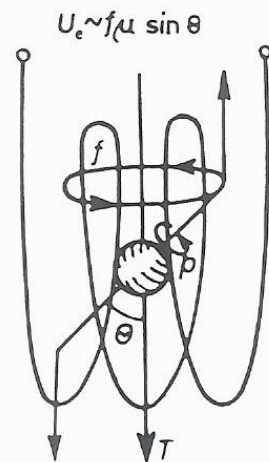


Princip funkce protonového magnetometru

Protonový magnetometr

V důsledku spinu má proton spinový moment hybnosti \mathbf{p} a spinový magnetický moment $\boldsymbol{\mu}$, oba směřující podél téže osy. Zapůsobí-li na proton magnetické pole \mathbf{T} pod úhlem Θ k této ose, vznikne točivý moment o velikosti $\mu T \sin \Theta$, který se snaží stočit ji do směru \mathbf{T} (obr. 86). Protože však je tu ještě moment \mathbf{p} , bude výsledkem *precesní pohyb protonu* kolem směru \mathbf{T} s frekvencí, která nezávisí na úhlu Θ a je přímo úměrná poli T

$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{\mu}{p} T. \quad (2.44a)$$



Obr. 86. Proton v magnetickém poli. Napětí indukované v cívce má tutéž frekvenci jako precese protonu, a to bez ohledu na orientaci protonu. Orientace ovlivňuje jen amplitudu napětí, která ovšem musí být dostatečně velká, aby umožnila přesné měření frekvence

Maxwellovy rovnice 1

nepovinné pro studenty geologie

Maxwellovy rovnice:

(popisují vztah mezi elektrickým a magnetickým polem)

$$\operatorname{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1) \text{ Faradayho zákon}$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = 4\pi \vec{I} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2) \text{ Biot-Savartův zákon}$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (3)$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = 4\pi q \quad (4)$$

kde \vec{E} je intenzita elektr. pole
 \vec{H} — " — magnetického pole

\vec{I} proudová hustota

\vec{B} magnetická indukce

\vec{D} elektrická indukce

q elektrický náboj

Pozn $\operatorname{rot} \vec{E} = \nabla \times \vec{E} =$

$$\begin{vmatrix} i & j & k \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ E_x & E_y & E_z \end{vmatrix}$$

Maxwellovy rovnice 2

nepovinné pro studenty geologie

Dále platí vztahy:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$
$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$
$$\rho \vec{I} = \vec{E}$$

... Ohmův zákon

- (1) Faradayův zákon: časová změna magnetické indukce generuje elektrické napětí
- (2) Biot-Savartův zákon: Elektrický proud generuje magnetické pole
- (3) $\text{div} \vec{B} = 0$... siločáry magnetické indukce jsou spojitě, neexistují izolované magnetické póly, kde by magnetické pole končilo (mnohdylové pole)
- (4) $\text{div} \vec{D} = \rho_{\text{ext}}$... Elektrické pole může "začínat" nebo "končit" tam, kde jsou elektrické náboje

Magnetický dipól

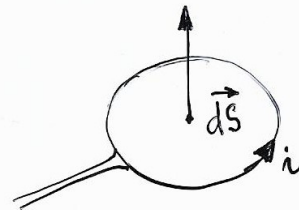
Magnetický dipól

Magnetismus těles je projevem kruhového pohybu nabíjených částic. Magnetický moment proudové smyčky s plochou dS protékající proudem i je

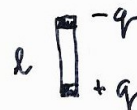
$$d\vec{m} = i d\vec{S}$$

pohorem
$$\vec{M} = \frac{i}{c} \sum \vec{m}_j$$

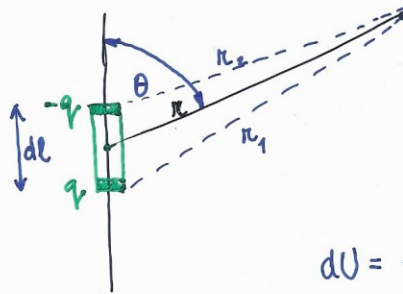
ktež c je objem tělesa.



Lze ukázat, že klas. magnetický dipól, složený formálně ze dvou magnetických množství $+q$, $-q$ vyvolá magnetické pole ekvivalentní proudové smyčce.



Magnetické pole dipólu



Pro potenciál v libovolné u
bodě platí

$$dU = dU_1 + dU_2$$

$$dU = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{q}{r_1} - \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{q}{r_2} = \frac{1}{4\pi} \cdot \left(\frac{q}{r_1} - \frac{q}{r_2} \right)$$

$$dU = \frac{q}{4\pi} \left(\frac{r_2 - r_1}{r_1 \cdot r_2} \right)$$

Pro $dl \ll r$ platí: $r_2 - r_1 \approx dl \cos \theta$
 $r_1 \cdot r_2 \approx r^2$

Potom pro potenciál dipólu platí: $dU = \frac{q \cdot dl}{4\pi} \cdot \frac{1}{r^2} \cdot \cos \theta$

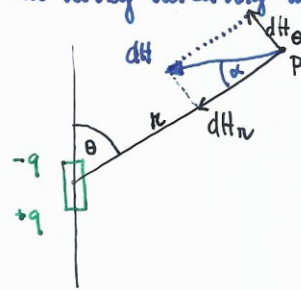
oznámím $dm = q \cdot dl$ magnetický moment dipólu

potom:
$$dU = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{dm}{r^2} \cdot \cos \theta$$

Tzn. Potenciál magnetického dipólu (proudiví smyčky) s magnetickým momentem dm , klesá s čtvercem vzdálenosti a s kosinem úhlu θ mezi osou dipólu a přímou \vec{r}

Magnetické pole dipólu

Pro složky intenzity magnetického pole dH platí:



$$dH_n = -\frac{\partial U}{\partial n} = \frac{2}{4\pi} \cdot \frac{dm}{n^3} \cdot \cos\theta$$

$$dH_\theta = -\frac{1}{n} \frac{\partial U}{\partial \theta} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{dm}{n^3} \cdot \sin\theta$$

Tedy celková velikost dH (podle Pythagorovy věty) je:

$$dH = \sqrt{dH_n^2 + dH_\theta^2} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{dm}{n^3} \cdot \sqrt{4\cos^2\theta + \sin^2\theta} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{dm}{n^3} \cdot \sqrt{3\cos^2\theta + 1}$$

$$dH = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{dm}{n^3} \cdot \sqrt{3\cos^2\theta + 1}$$

Pro směr intenzity (tj. úhel odklonu α od přímé) platí:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{dH_\theta}{dH_n} = \frac{1}{2} \operatorname{tg}\theta$$

Je ukázat, že pole homogenně magnetizované koule o poloměru R , objemu $V = 4/3\pi R^3$ a magnetizaci M je rovné magnetickému poli dipólu umístěnému v jejím středu. Pro moment dipólu platí:

$$\vec{m} = \vec{M}V$$

platí pro vzdálenost $r \gg R$.

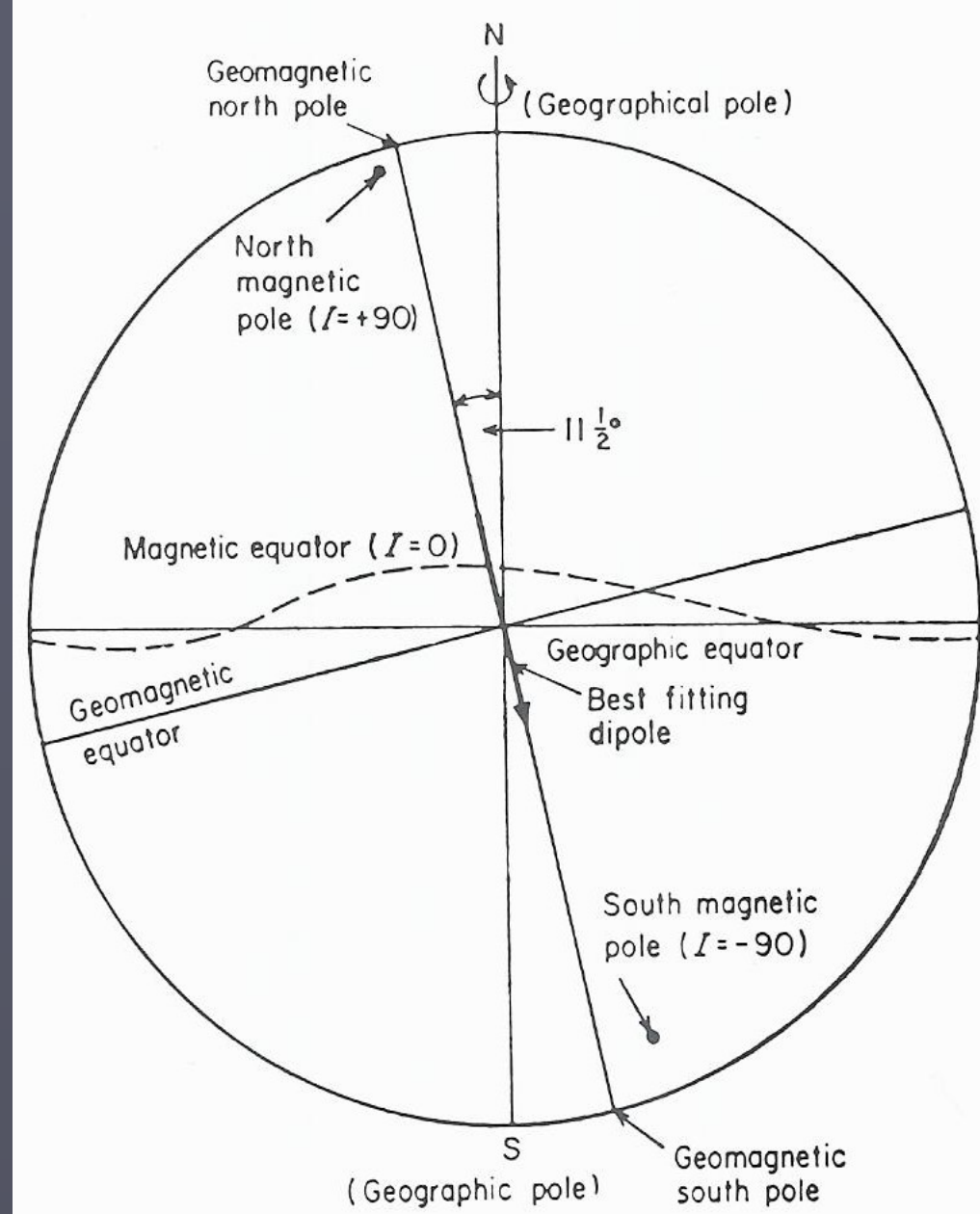
Zemské magnetické pole

Geomagnetický pól je místo kde osa ukloněného dipólu protíná zemský povrch

(79°N , 71°W a 79°S , 109°E) (tzv. best-fitting central dipole)

Magnetický pól (magnetic dip pole) je místo kde inklinace magnetického pole je $I = \pm 90^{\circ}$ tj. magnetické pole směřuje vertikálně dolů. Horizontální složka $H = 0$.

(76°N , 101°W a 66°S , 141°E)

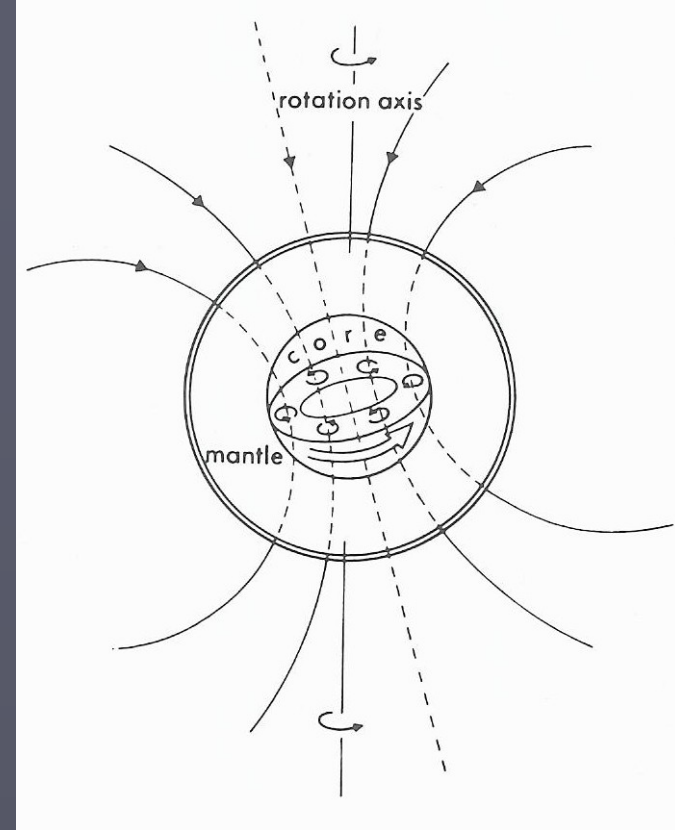


Geomagnetické dynamo

V nataveném, vodivém materiálu vnějšího jádra dochází k pohybu hmot napříč k existujícímu slabému magnetickému poli.

Tento konvektivní pohyb je pravděpodobně udržován radiogenním teplem uvolňovaným zemským jádrem.

Tento elektrický proud generuje sekundární magnetické pole. Tato dvě magnetická pole dohromady jsou silnější než původní pole a leží ve směru blízkém k rotační ose Země.



Geocentrický souosý dipól

Geocentrický odkloněný dipól lze rozložit do složky v ose rotace Země a do složky normální. Pokud normální složku zanedbáme zůstane tzv. geocentrický souosý dipól

Pro ten platí:
$$T = \sqrt{\frac{\mu_0 m}{4\pi R^3} \cdot \sqrt{3 \sin^2 \varphi + 1}}$$

$$\operatorname{tg} I = 2 \operatorname{tg} \varphi$$

φ je zeměpisná šířka ($\varphi = 90^\circ - \theta$, θ je doplňková zeměpisná šířka)

číselně:
$$\begin{aligned} \mu_0 &= 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m} \\ m &= 8 \cdot 10^{22} \text{ A/m}^2 \\ R &= 6378 \text{ km} = 6,378 \times 10^6 \text{ m} \end{aligned}$$

| | |
|--|------------|
| $T(\varphi = 0^\circ) \doteq 31 \mu\text{T} = 31000 \text{ nT}$ | ... rovník |
| $T(\varphi = 90^\circ) \doteq 62 \mu\text{T} = 62000 \text{ nT}$ | ... pól |
| $T(\varphi = 50^\circ) \doteq 51 \mu\text{T}$ | ... ČR |

Magnetické anomálie

magnetické anomálie

Vektor magnetické indukce \vec{T} je složen z následujících složek:

$$\vec{T} = \underbrace{(\vec{T}_d + \vec{T}_k)}_{\text{odkloněný dipól}} + \vec{T}_{an} + \vec{T}_{al}$$

lokální anomálie

regionální anomálie

kontinentální anomálie

$$\vec{T}_n = \vec{T}_d + \vec{T}_k \quad \dots \text{tka normální pole}$$

totální anomálie: $\vec{T}_a = \vec{T} - \vec{T}_n$

anomálie ΔT : $\Delta T = T - T_n$

(tj. velikost vektoru \vec{T}_a promítnutá do směru normálního pole.)

Kontinentální magnetické anomálie

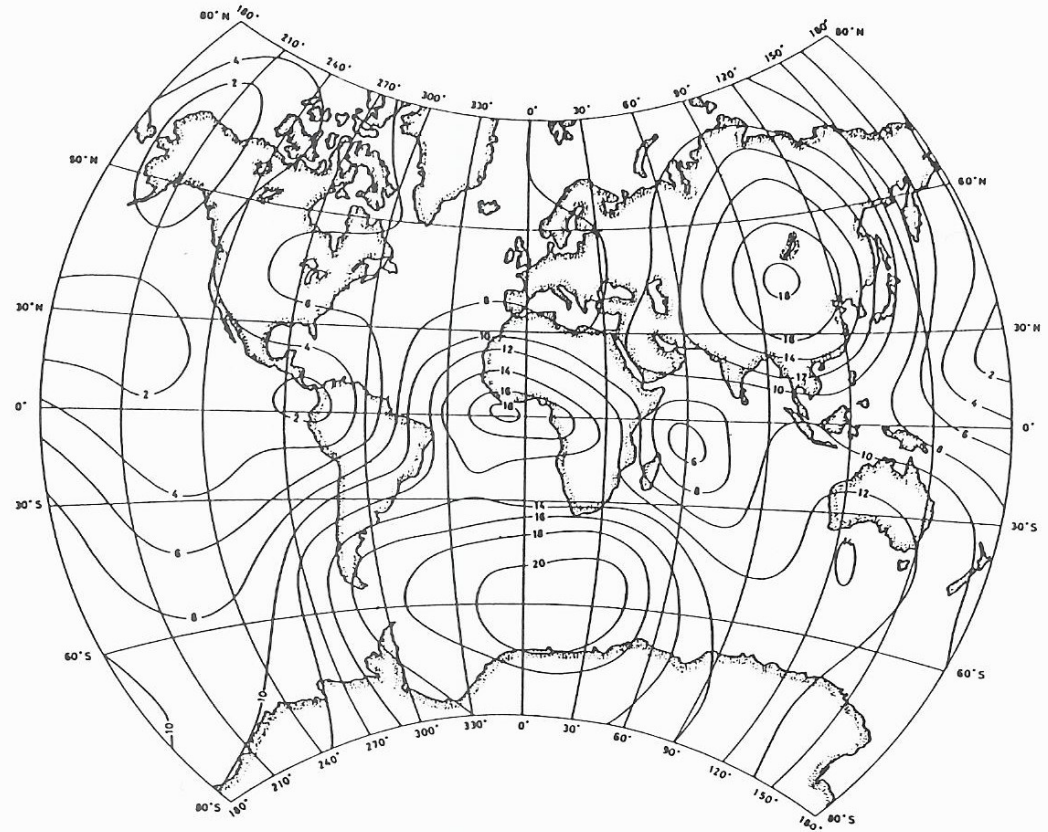
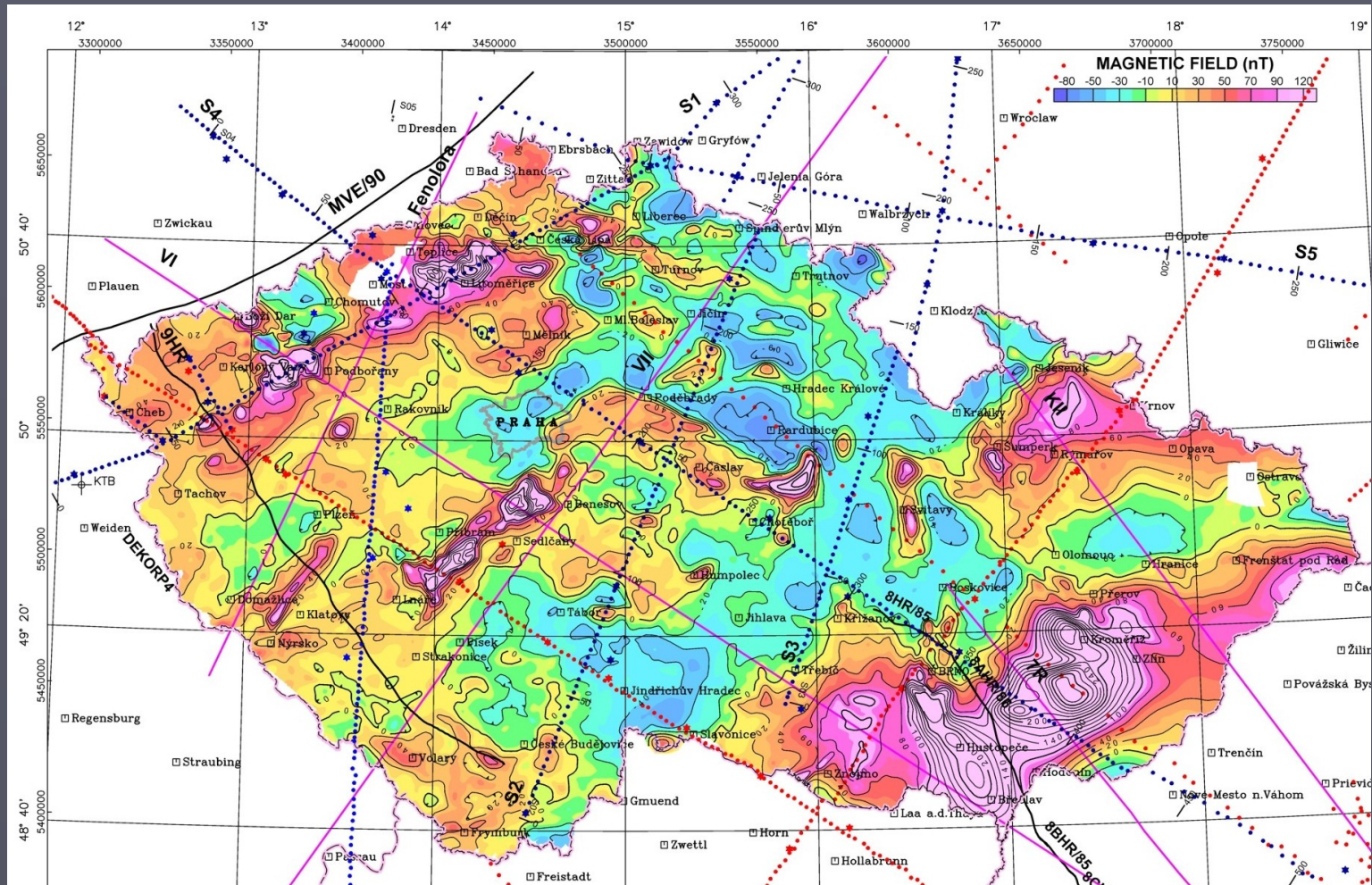


Figure 4.10. The total intensity of the nondipole field for the epoch 1980. Contour interval $2\mu\text{T}$. Note the comparatively small amplitude of the nondipole field over the Pacific hemisphere. (Source: Nevalinna et al., 1983, Geological Survey of Finland, Report Q19/22.0/World-1983/1, map based on IGRF 1980, Peddie, 1982.)

Kontinentální magnetické anomálie získáme, když od zemského magnetického pole odečteme magnetické pole ukloněného geocentrického dipólu

Magnetická mapa ČR



Maximální amplituda v ČR: cca 8000 nT v centrální části Doupovských hor

Častou příčinou zvýšené magnetizace je bazický vulkanizmus

Časové změny magnetického pole

Časové změny geomagnetického pole

krátkodobé variace: denní variace. o periodě slunečního dne velikost desítek nT, mají původ v systému elektrických proudů v ionosféře (slapy ionosféry)

krátkoperiodické variace (0,1s až 30 min) amplituda 0,1 nT až 100 nT důsledky sluneční aktivity

magnetické bouře trvají 1 den i více, amplituda až stovky nT. U nás nepůsobilé. Sluneční erupce. Nelze měřit mag. pole.

dlouhodobé variace: systematické změny středních hodnot elementů magnetického pole
(\equiv sekulární variace)

např. Londýn r. 1540
1580
1819
1990

..... $D = +7,2^\circ$
..... $D = +11,3^\circ$
..... $D = -24,5^\circ$
.... $D = 0^\circ$

Změna velikosti magnetického pole činí až 200 nT/nok

Sekulární variace postihují zejména nedipólovou část pole!

Časové změny magnetického pole

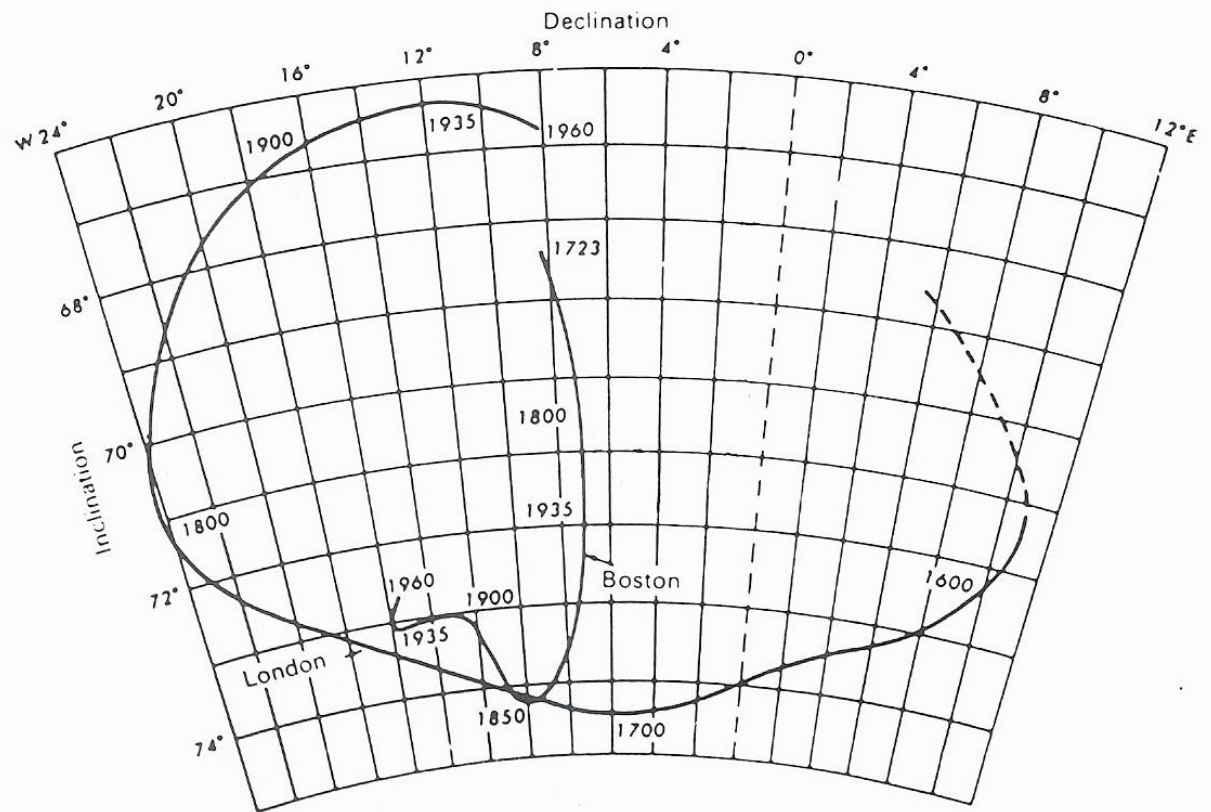
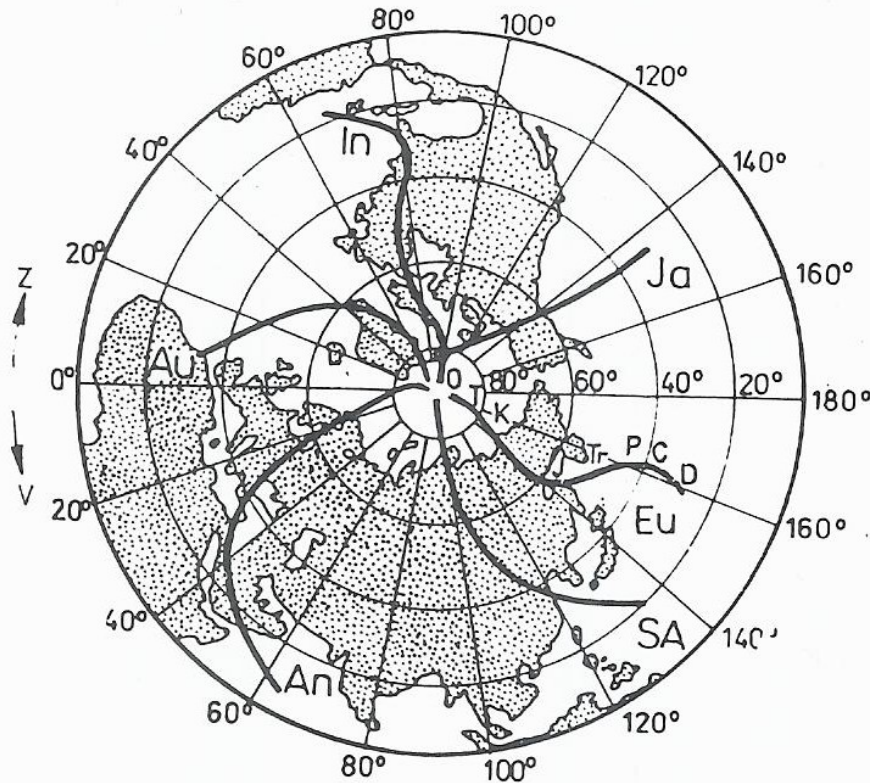


Figure 4.12. Observatory records of secular change in declination and inclination of the geomagnetic field at London and Boston. (Sources: Gaiber Puertas (1953) and U.S. Navy Hydrographic Charts.)

Paleomagnetismus

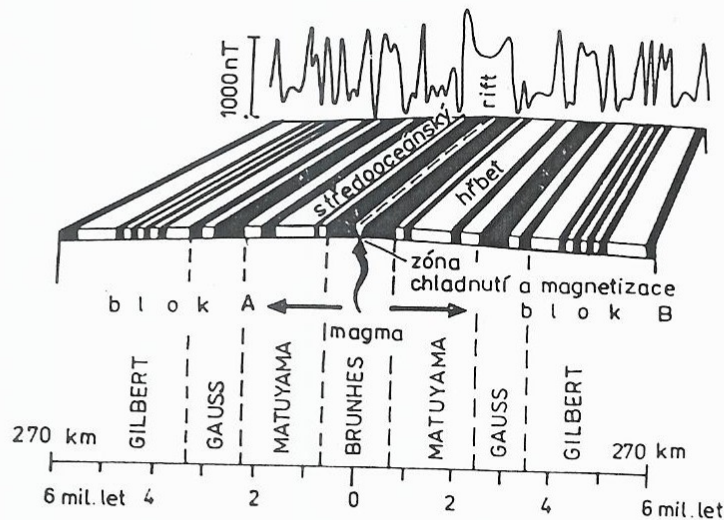


Obr. 19. Křivky zdánlivého putování severního pólu pro různé kontinenty (schematizováno podle různých autorů)
Eu — Evropa (D — devon, C — karbon, P — perm, Tr — trias, J — jura, K — křída, T — třetihory, Q — čtvrtohory), SA — Severní Amerika (od siluru), An — Antarktida (od kambria), Au — Austrálie (od karbonu), In — Indie (od křída), Ja — Japonsko (od křída). Například Evropa byla v permokarbonu od pólu v úhlové vzdálenosti zhruba 90°, tj. nacházela se v oblasti magnetického rovníku. Tyto výsledky oživily teorii kontinentálního driftu a staly se východiskem moderních koncepcí o stavbě zemské kůry a procesech jejího vývoje

Inverze geomagnetického pole

| | | | | K-Ar stáří (mil. let) | |
|------------------------|---------|----------------------|-----------------------------|--------------------------|----------|
| | | | | Polarita | |
| Nunivok | Cochiti | Mammoth Kaena | Oiduvai Oiduvai Gilsb | Jaramillo | Laschamp |
| GILBERTOVA inverzní | | GAUSSOVA normální | | MATUYAMAOVA inverzní | |
| | | | | BRUNHESOVA normální | |
| | | | | Epocha polarity | |

a)



b)

Obr. 18. Inverze geomagnetického pole

a) časová stupnice inverzí (podle A. Coxe in J. Verhoogen et al. 1970). Existence geomagnetického pole, jeho sekulárních změn a inverzí umožňuje usuzovat o procesech, které probíhají v zemském nitru,

b) zjištění inverzí a odpovídajícího sledu kladných a záporných magnetických zón ve světových oceánech se stalo základem pro teorii o rozšiřování oceánického dna a o blokové stavbě zemské kůry (podle W. C. Pitmana a J. R. Heirtzlera in J. Verhoogen et al. 1970)

Magneticky významné horninotvorné minerály

Magneticky významné horninotvorné minerály

diamagnetické minerály: grafit, sádrovec, diamant, křemen
 $\chi < 0$ $\chi \sim 10^{-6} \div 10^{-5}$ živec, galenit

paramagnetické minerály: pyrit, muskovit, amfibol,
 $\chi > 0$ $\chi \sim 10^{-5} \div 10^{-3}$ biotit, siderit, pyroxen

feromagnetické minerály: hematit (Fe_2O_3)
 $\chi \gg 0$ magnetit (Fe_3O_4)
pyrhotin $\text{Fe}_{1-x}\text{S}_x$; $0 \leq x < 0,2$
ilmenit TiFeO_3
železo

Magnetické vlastnosti hornin jsou určeny podílem nejsilnější magnetických minerálů.

Zde zejména o rudy minerály - oxidy a sulfidy

Oxidy: Magnetit (Fe_3O_4), feromagnetický, kubická soustava
Curieova teplota 578°C

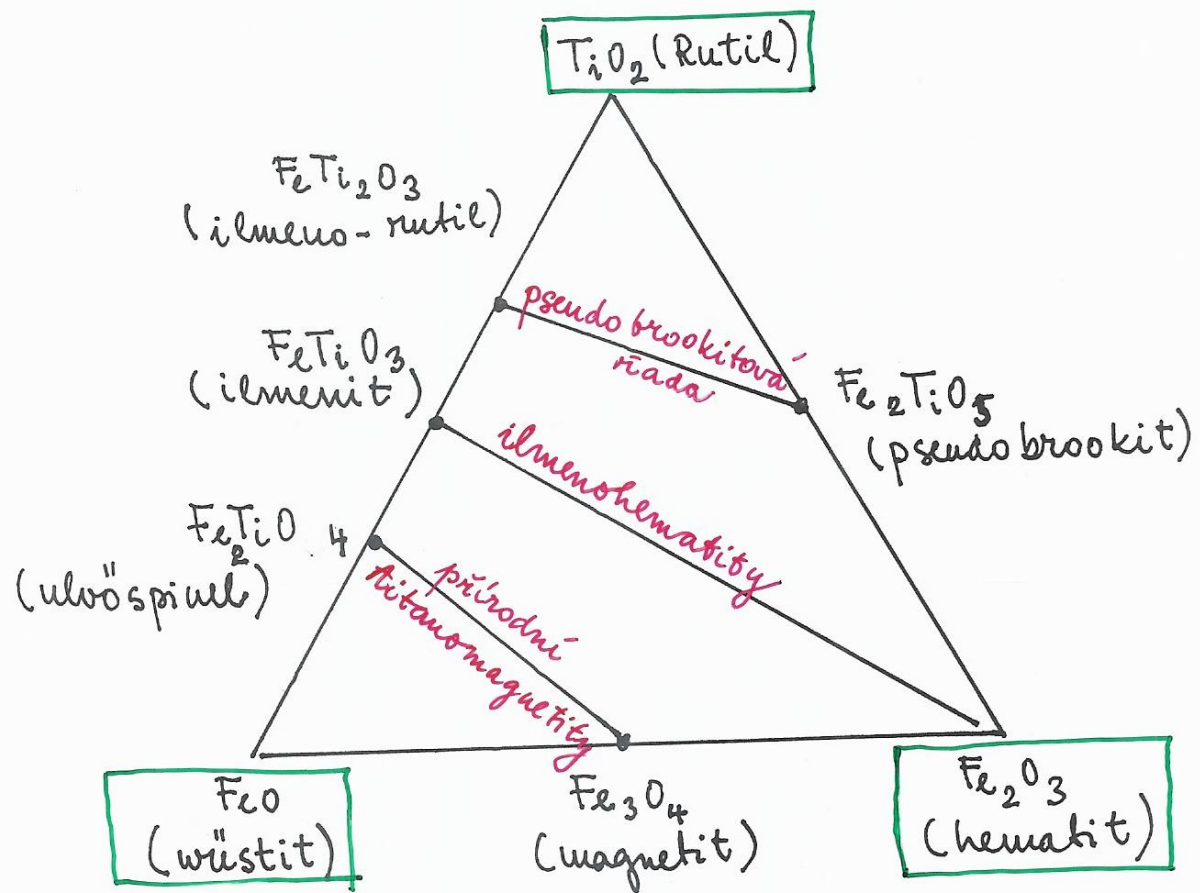
Hematit (Fe_2O_3), antiferomagnetický, trigonální s.,
Curieova (Néelova) teplota 675°C

Ilmenit (TiFeO_3) podobná struktura jako hematit
do 68°K antiferomagnetický
jinak paramagnetický
hlavní nositel Ti v ž. kůře

Sulfidy: Pyrhotin ($\text{Fe}_{1-x}\text{S}_x$; $0 \leq x < 0,2$)
hexagon. soust., $T_{\text{Curie}} \approx 320^\circ\text{C}$
 $x < 0,085$ antiferomagnetický
 $x > 0,085$ feromagnetický

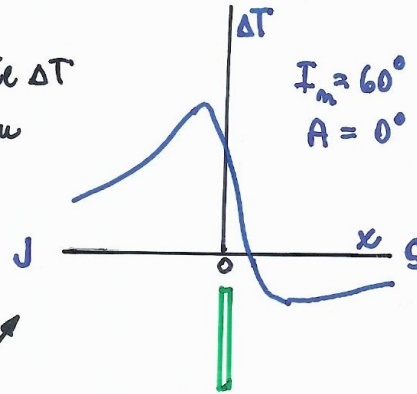
Ternární diagram s koncovými členy rutil, wüstit, hematit

Některým antiferomagnetickým a feromagnetickým minerálům lze postihnout v ternárním diagramu s koncovými členy Rutil (TiO_2 kyslíček titaničitý)
 Wüstit (FeO kyslíček železnatý)
 Hematit (Fe_2O_3 kyslíček železitý)



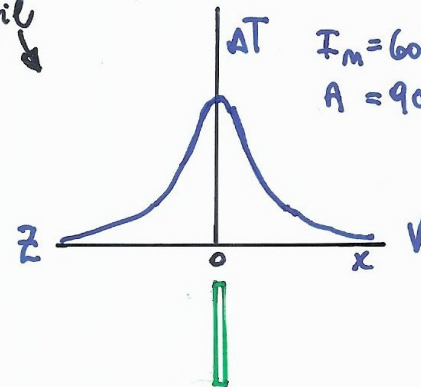
Přímá úloha magnetometrie

Magnetická anomálie ΔT
nad tekoucí svistlou
deskou



severo-jihův profil ↗

východo-západní profil ↘



Severo-jihův profil je charakteristický doprovodným
minimem v severní části profilu

Východo-západní profil je symetrický okolo počátku
osy x .

Přímá úloha magnetometrie

Na obrázku 21a je příklad průběhu křivek Z_a , H_a , ΔT , T_a na charakteristickém s.-j. profilu ($A = 0$) přes tenkou svislou desku s velkým hloubkovým dosahem, směřující V-Z, namagnetovanou indukovaně v zemském poli o zvoleném I_n . Určující analytické výrazy mají v tomto případě tvar

$$Z_a = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{2b \ 2M}{x^2 + h^2} (h \sin I_n - x \cos I_n), \quad (4.16a)$$

$$H_a = - \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{2b \ 2M}{x^2 + h^2} (h \cos I_n + x \sin I_n), \quad (4.16b)$$

$$\Delta T = - \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{2b \ 2M}{x^2 + h^2} (h \cos 2I_n + x \sin 2I_n), \quad (4.16c)$$

$$T_a = \sqrt{Z_a^2 + H_a^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2b \ 2M}{(x^2 + h^2)^{\frac{1}{2}}}, \quad (4.16d)$$

kde $2b$ je mocnost desky, h hloubka horního okraje, $M = \kappa T'$ je magnetizace, x proměnná vzdálenost výpočetního bodu od bodu O . Obrázek 21b znázorňuje proměnlivost průběhu anomálie ΔT nad tenkými deskami o různém směru a sklonu (na charakteristických profilech).

Použití magnetometrie

Použití magnetometrie

I) pozemní magnetometrie

- 1) vyhledávání Fe rud
- 2) vyhledávání polymetalických rud geneticky spjatých s pyrohotinem či magnetitem
- 3) vyhledávání rud vázaných na horniny o kontrastní magnetizaci : Ni-Cu ; Cr, W, Mo
- 4) vyhledávání diamantových sopouchů
- 5) vyhledávání zlatových křemenných žil
- 6) vyhledávání nevybuchlých leteckých bomb
- 7) archeologie

II) letecká magnetometrie

- 1) vyhledávání Fe rud
- 2) prospekce na ropu a plyn (určení reliéfu podloží sedimentárních páin, ale i rozčlenění samotného sedimentárního komplexu)
- 3) geologické mapování