

Fyzika Zeme

- Úvodný kurz pre poslucháčov prvého ročníka bakalárskych programov v rámci odboru geológie
- 7. prednáška – magnetizmus
a elektromagnetizmus

Obsah prednášky:

- úvodné poznámky
- základné veličiny (intenzita, indukcia)
- magnetické vlastnosti látok
- zákony elektromagnetizmu
(Ampérova, Biot-Savartov, Faradayov)
- magnetické pole Zeme
- praktické použitie merania magnetického poľa
Zeme v geológii a archeológii

magnetické pole – základné fakty

Elektrické a magnetické polia sú veľmi úzko prepojené – z toho dôvodu sa aj často vo fyzike vraví o elektromagnetizme.

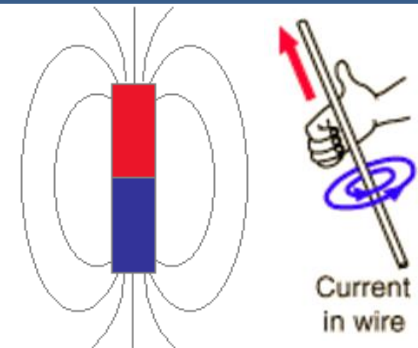
Magnetické pole je fyzikálne pole, v ktorom pôsobí na pohybujúce sa elektrické náboje alebo magnety (aj železné predmety) sila F .

Označujeme ju často ako magnetická sila $= F_M$.

Magnetické pole sa nachádza v okolí:

- permanentného magnetu
- vodiča, cez ktorý tečie elektrický prúd.

Aj pole permanentného magnetu je vlastne spôsobené pohybom elektrických nábojov - vo vnútri atómov látky magnetu.

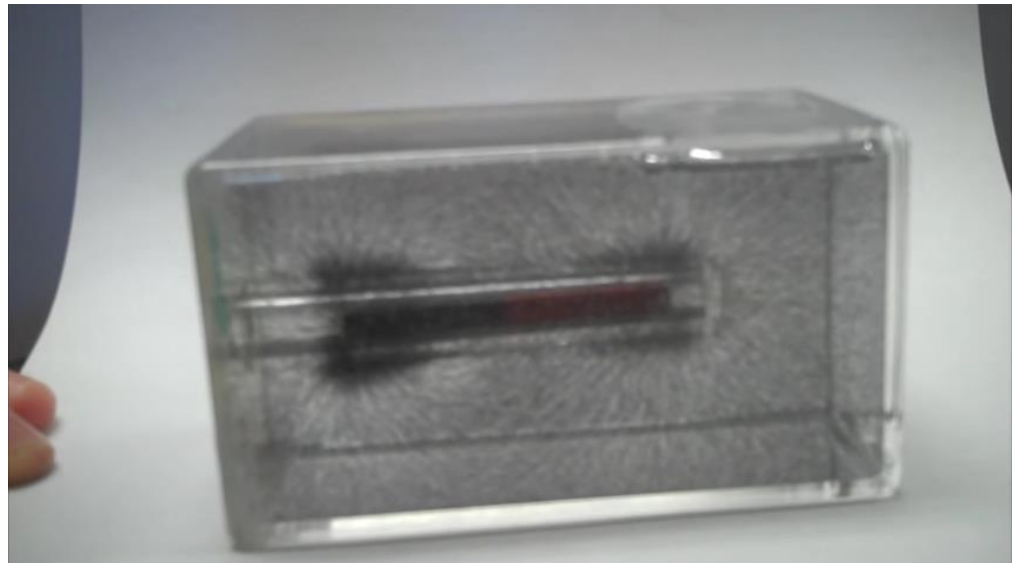


Magnetické polia rozdeľujeme takto na:

- magnetostatické polia (základný prípad – permanentný magnet alebo vodič s konštantným prúdom),
- premenlivé elektromagnetické polia (v okolí vodičov s premenlivým prúdom).

magnetické pole – základné fakty

Magnetické pole je často reprezentované **magnetickými siločiarami** (tiež magnetické indukčné čiary), ktoré ukazujú smer pôsobenia magnetického poľa v bodoch priestoru okolo zdroja.



video: <https://www.youtube.com/watch?v=8llkHQtaOlg>

magnetizmus – základné fyzikálne veličiny

Základné veličiny na popis magnetického poľa –

magnetická intenzita $\mathbf{H}$ (vektorová veličina, jednotka $[\text{A}\cdot\text{m}^{-1}]$) a
magnetická indukcia $\mathbf{B}$ (taktiež vektorová veličina, jednotka $[\text{T}]$).

Vzťah medzi nimi je daný jednoduchou rovnicou:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} ,$$

kde μ – **magnetická permeabilita**, (jednotka: $[\text{H}\cdot\text{m}^{-1} = \text{N}\cdot\text{A}^{-2}]$),
udáva mieru magnetizácie látky v dôsledku
pôsobenia vonkajšieho magnetického poľa.

Používame aj tzv. relatívnu magnetickú permeabilitu
(bezrozmerné číslo):

$$\mu_r = \mu / \mu_0 \Rightarrow \mu = \mu_r \cdot \mu_0$$

μ_0 – permeabilita vákua ($4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H}\cdot\text{m}^{-1}$).

magnetizmus – základné fyzikálne veličiny

Magnetická intenzita $\mathbf{H}$ (vektorová veličina, jednotka, $[\text{A}\cdot\text{m}^{-1}]$).

Popisuje mieru silových účinkov magnetického poľa.

Na rozdiel od magnetickej indukcie nezahŕňa reakciu látky (vplyv magnetizačných prúdov v nej), ale iba účinok „vonkajších“ zdrojov poľa.

Magnetická indukcia $\mathbf{B}$ (vektorová veličina, $[\text{T}]$).

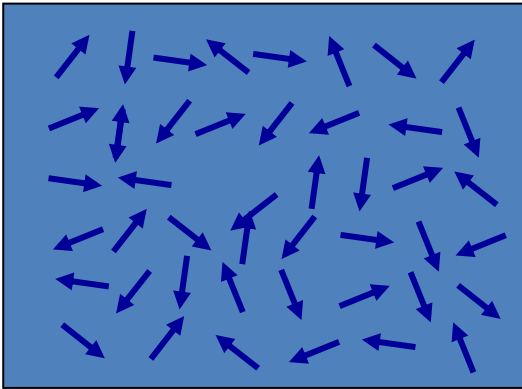
Charakterizuje silové účinky magnetického poľa na pohybujúci sa náboj, alebo na vodič s prúdom v magnetickom poli, pričom v sebe zahŕňa reakciu látky na vonkajšie magnetické pole (jej zmagnetizovanie alebo pôsobenie proti nemu).

Alternative names for B and H

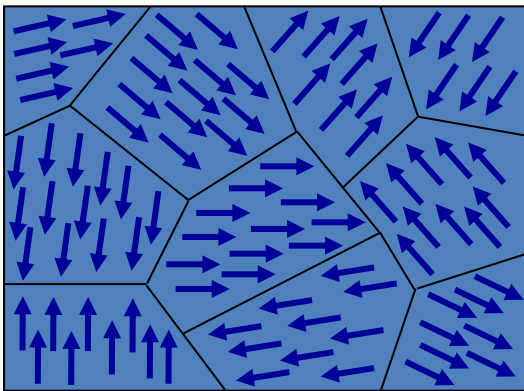
B	
name	used by
magnetic flux density	electrical engineers
<u>magnetic induction</u>	electrical engineers
magnetic field	physicists
H	
name	used by
<u>magnetic field intensity</u>	electrical engineers
magnetic field strength	electrical engineers
auxiliary magnetic field	physicists
magnetizing field	physicists

magnetizmus – základné fyzikálne veličiny

Elektrón pri svojom pohybe okolo jadra atómu vytvára magnetické pole, čím si každý atóm vytvára vlastný (elementárny) **magnetický moment m** . Tieto momenty sa môžu v látke navzájom rušiť alebo zosilňovať.



Vo väčšine látok sú tieto elementárne magnetické momenty usporiadané náhodne (tzv. diamagn. a paramagnetické), navonok sa ich magnetické vlastnosti neprejavujú. V niektorých (feromagn.) sa orientujú do určitých zón - **tzv. domén**.

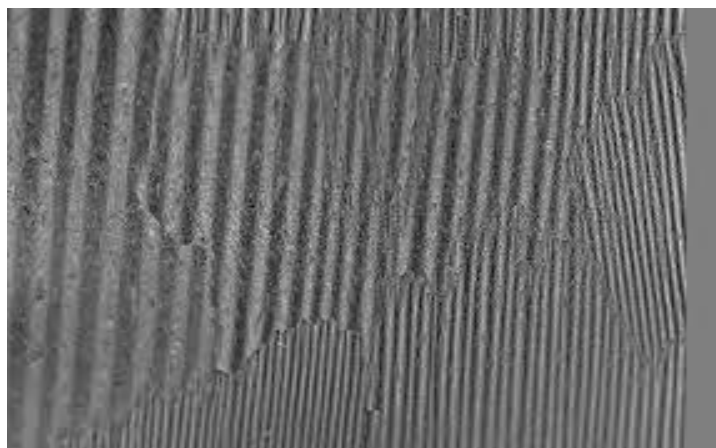
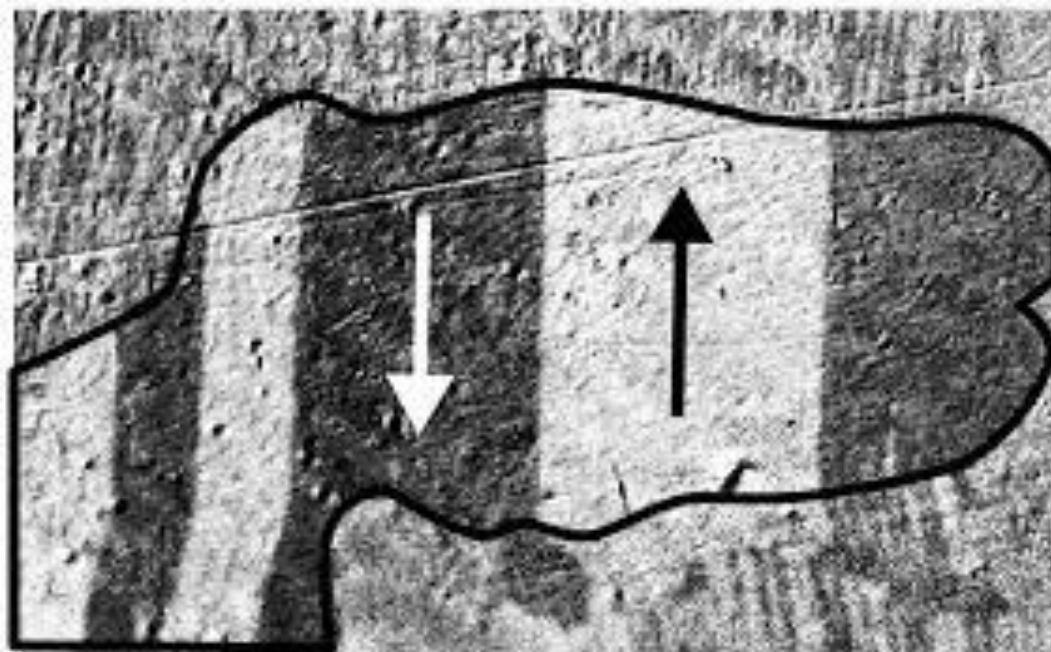
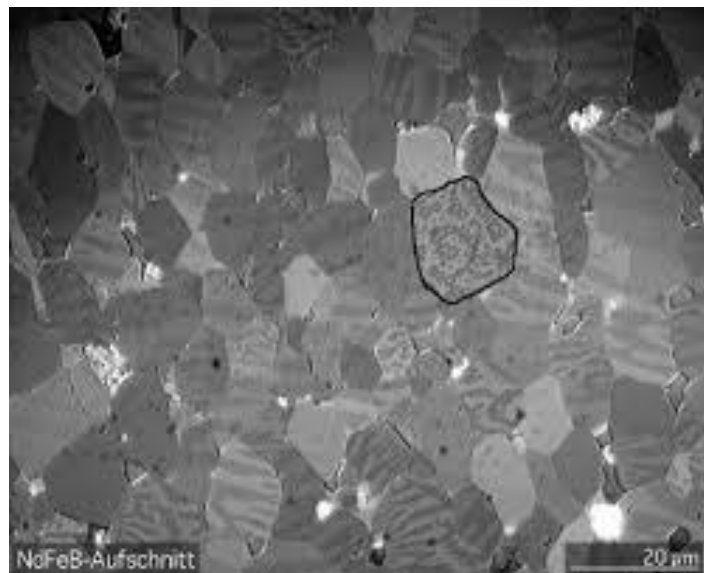


Ak látku vložíme do vonkajšieho magnetického poľa, sú elementárne magnetické momenty jeho pôsobením ovplyvnené a môžu zmeniť svoje usporiadanie v látke.

Fyzikálna jednotka magnetického momentu m je $[A \cdot m^2]$.

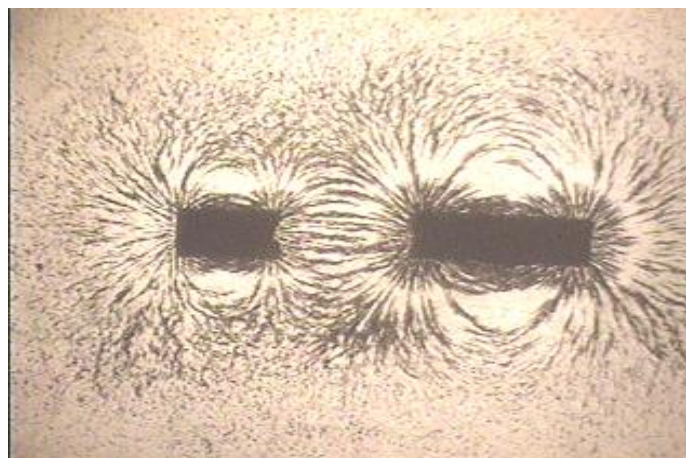
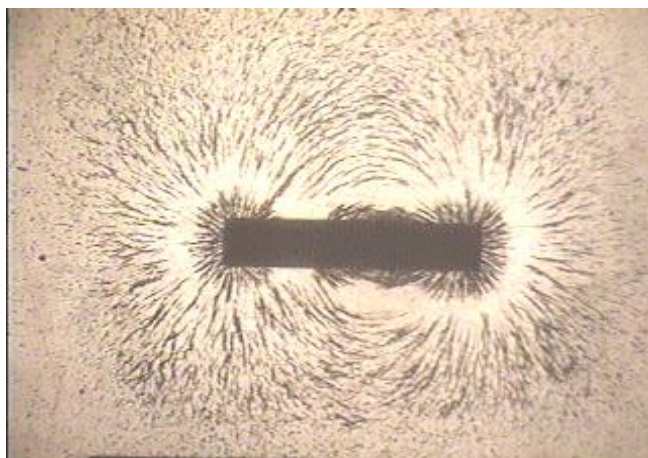
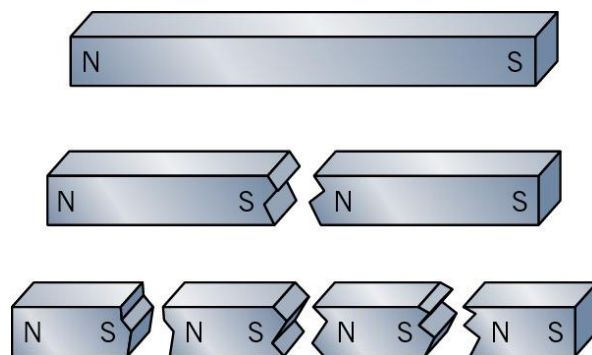
magnetizmus – základné fyzikálne veličiny

Magnetické domény (príklady z elektrónového mikroskopu):



magnetizmus – základné fyzikálne veličiny

Pozn.: Magnetické pole má v princípe vždy **tzv. dipólový charakter** („plus/mínus“). V makrosvete dosiaľ nebol nikdy vyrobený tzv. magnetický monopól (aj keď existujú určité teoretické predpoklady na jeho možnú existenciu).



magnetizmus – základné fyzikálne veličiny

Podľa hodnoty μ_r ($\mu_r = \mu/\mu_0$) delíme látky na:

diamagnetické ($\mu_r < 1$), zoslabujú magn. pole (napr. voda, organické látky, ale aj niektoré kovy: Cu, Ag, Au, Hg, Bi,)

paramagnetické ($\mu_r > 1$), zosilňujú magn. pole (napr. Al, Mn, Cr, Pt)

feromagnetické ($\mu_r \gg 1$) výrazne zosilňujú magn. pole (5 kovov: Fe, Ni, Co, Gd, Dy).

Diamagnetické látky sú z magnetického poľa vypudzované, paramagnetické a feromagnetické sú naopak do magnetického poľa vtáňované (pohyb smerom do miesta s najvyššou intenzitou poľa).

Feromagnetické látky sú schopné si magnetizáciu „zapamätať“ – zostáva im aj po „vypnutí“ vonkajšieho indukujúceho poľa.

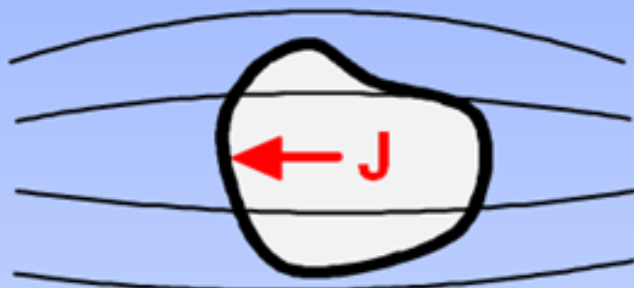
Najsilnejšie diamagnetické chovanie vykazujú supravodiče, ktoré môžu do určitej intenzity pôsobiaceho magnetického poľa úplne zabrániť vnikaniu poľa do svojho objemu (až na tenkú povrchovú vrstvu) a tak je v určitej oblasti ich platí $\mu_r = 0$.

magnetizmus – základné fyzikálne veličiny

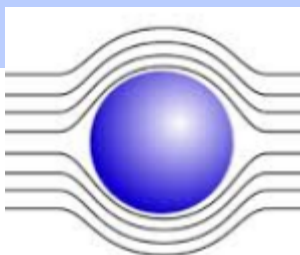
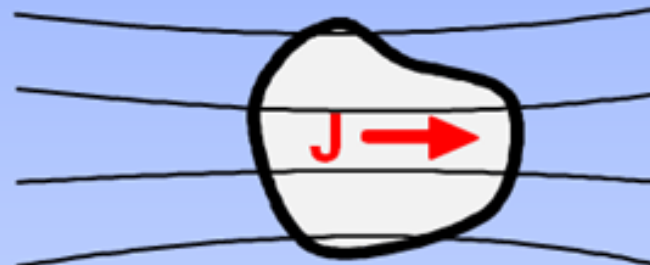
Magnetic field (B_0)



Diamagnetic



Para/Ferromagnetic



(supravodič)

magnetizmus – základné fyzikálne veličiny

Materiál	μ_r
Permalloy _{Ni-Fe}	50 000 - 140 000
Železo	300 - 10 000
Kobalt	80 - 200
Hliník	1,000 023
Kapalný kyslík	1,003 620
Plynný kyslík	1,000 001 86
Platina	1,000 264
Měď	0,999 990
Voda	0,999 991

$$\mu_r = \mu / \mu_0$$

diamagnetické ($\mu_r < 1$)

paramagnetické ($\mu_r > 1$)

feromagnetické ($\mu_r \gg 1$)



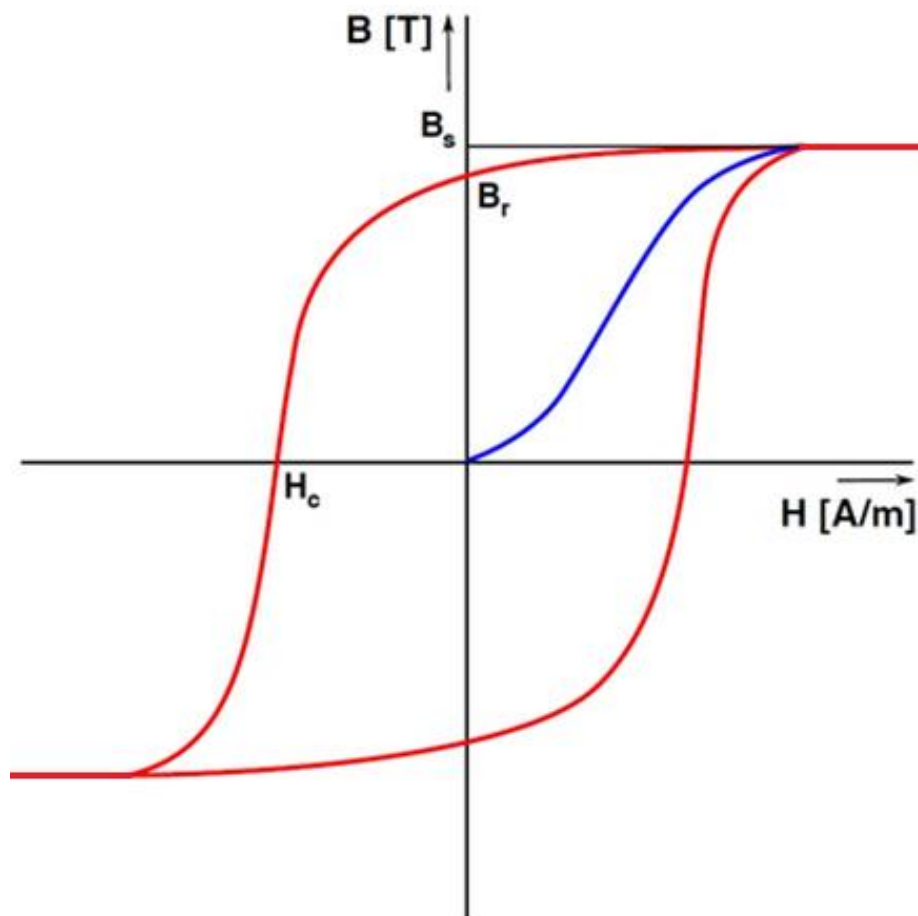
magnetit (trigonálna sústava)



magnetizmus – základné fyzikálne veličiny

Paramagnetickým látkam nezostáva po „vypnutí“ vonkajšieho magnetického poľa jednotný magnetický moment.

V prípade feromagnetických je to rozdielne – zostávajú zmagnetizované. Tento jav opisuje **magnetická hysterézia** (slučka, krivka):



B_s – stav nasýtenia
(max. hodnota B),
 B_r – remanetná
magnetizácia,
 H_c – koercitívna
intenzita,

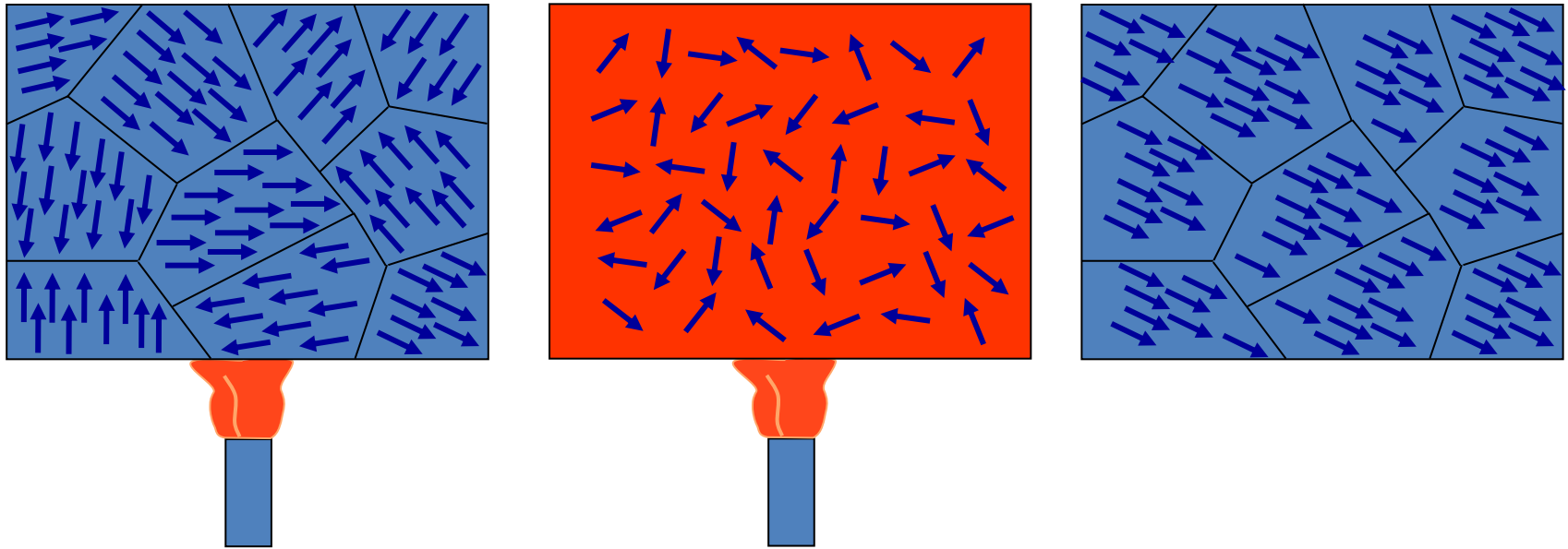
Podľa veľkosti H_c
delíme
feromagnetické látky
na magneticky mäkké
(malá H_c) a tvrdé
(veľká H_c)

magnetizmus – základné fyzikálne veličiny

feromagnetické látky – Curieho teplota

Pri zohriatí feromagnetickkej látky na určitú teplotu (tzv. **Curieho teplota**, napr. pre železo cca 770°C) sa látka zmení na paramagnetickú.

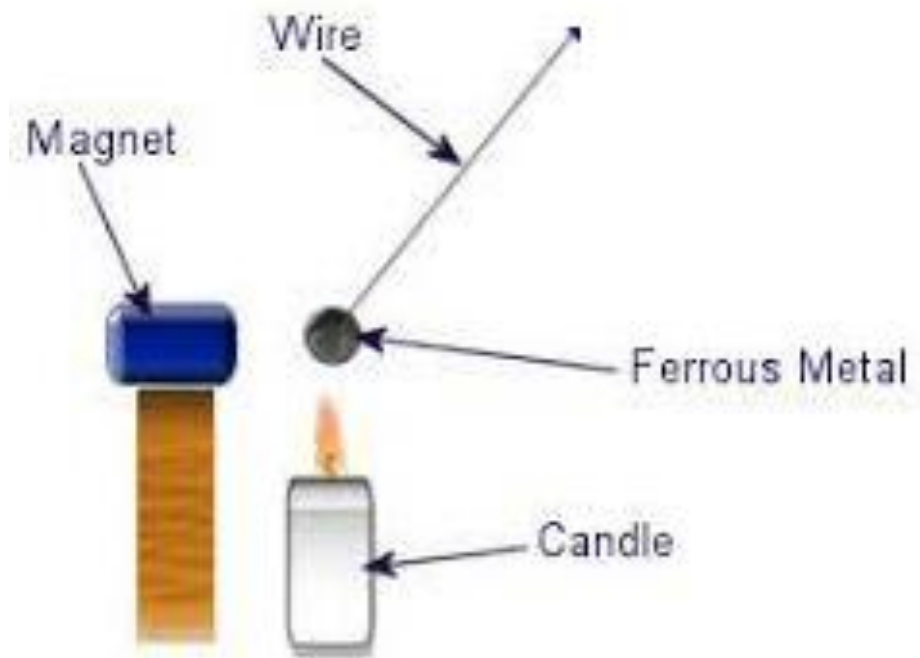
Keď teplota poklesne, látka sa znova stane feromagnetickou a obnoví sa doménové usporiadanie.



Pozn.: Uvedená vlastnosť sa prejavuje aj pri vzniku magnetizácie hornín (tzv. termoremanentná magnetizácia) – pri tuhnutí magmy (lávy)

magnetizmus – základné fyzikálne veličiny

feromagnetické látky – Curieho teplota



jednoduché pokusy – s nahriatím feromagnetických objektov

magnetizmus – základné fyzikálne veličiny

Curieho teplota:

Material	Curie temperature (K)
Iron (Fe)	1043
Cobalt (Co)	1400
Nickel (Ni)	627
Gadolinium (Gd)	292
Dysprosium (Dy)	88
Mn Bi	630
MnSb	587
CrO ₂	386
MnAs	318
EuO	69
Iron(III) oxide (Fe ₂ O ₃)	948
Iron(II,III) oxide (FeOFe ₂ O ₃)	858

kovy (materiály)

Pozor hodnoty sú v termodyn. teplote.

Mineral	Composition	Magnetic Order	T _c (°C)
Oxides			
Magnetite	Fe ₃ O ₄	ferrimagnetic	575-585
Ulvospinel	Fe ₂ TiO ₂	AFM	-153
Hematite	αFe ₂ O ₃	canted AFM	675
Ilmenite	FeTiO ₂	AFM	-233
Maghemite	γFe ₂ O ₃	ferrimagnetic	~600
Jacobsite	MnFe ₂ O ₄	ferrimagnetic	300
Trevorite	NiFe ₂ O ₄	ferrimagnetic	585
Magnesioferrite	MgFe ₂ O ₄	ferrimagnetic	440
Sulfides			
Pyrrhotite	Fe ₇ S ₈	ferrimagnetic	320
Greigite	Fe ₃ S ₄	ferrimagnetic	~333
Troilite	FeS	AFM	305
Oxyhydroxides			
Goethite	αFeOOH	AFM, weak FM	~120
Lepidocrocite	γFeOOH	AFM(?)	-196
Feroxyhyte	δFeOOH	ferrimagnetic	~180

magnetické minerály

(hodnoty sú v °C)

magnetizmus – poznámka ku permanentným magnetom

Neodymium - Nd

V čistej forme má Nd paramagnetické vlastnosti (!)
(pod úrovňou teploty 20 K aj čiastočne feromagnetické).

Avšak vo forme zlúčeniny $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ (kryštalizuje v tetragon. sústave) dosahuje výrazné feromagnetické vlastnosti.

Tieto zlúčeniny sú známe sú ako tzv. **neodýmové magnety**.
(ich vlastnosti sa podieľajú na mnohých technických riešeniach: magnety v reproduktoroch, mikrofónoch, v časticových urýchlovačoch... atď.).

video:

<http://www.dailymotion.com/video/x15ryzj>



magnetizmus – poznámka ku permanentným magnetom

Neodymium - Nd

V čistej forme má Nd paramagnetické vlastnosti (!)
(pod úrovňou teploty 20 K aj čiastočne feromagnetické).

Avšak vo forme zlúčeniny $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ (kryštalizuje v tetragon. sústave) dosahuje výrazné feromagnetické vlastnosti.

Tieto zlúčeniny sú známe sú ako tzv. **neodýmové magnety**.
(ich vlastnosti sa podieľajú na mnohých technických riešeniach: magnety v reproduktoroch, mikrofónoch, v časticových urýchlovačoch... atď.).

video:

<http://www.dailymotion.com/video/x15ryzj>



elektromagnetizmus

Prepojenie **elektrických a magnetických javov** si všimli a rozvinuli viacerí fyzici v 19. storočí.

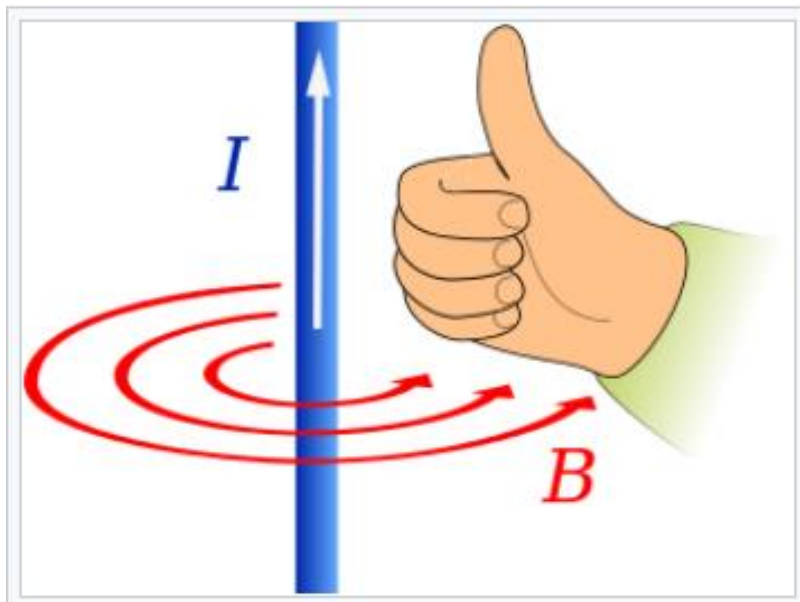
(Ørsted, Henry, Farraday, Ampère, Maxwell a ďalší).

Postupne bolo formulovaných niekoľko základných zákonov elektromagnetizmu.



základy elektromagnetizmu – Biot-Savartov zákon

Magnetická indukcia **B** v okolí vodiča (ktorým preteká jednosmerný prúd **I**) je opísaná tzv. **Biot-Savartovým zákonom**:



$$|\vec{B}| = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I}{r}$$

kde r je kolmá vzdialenosť od vodiča.

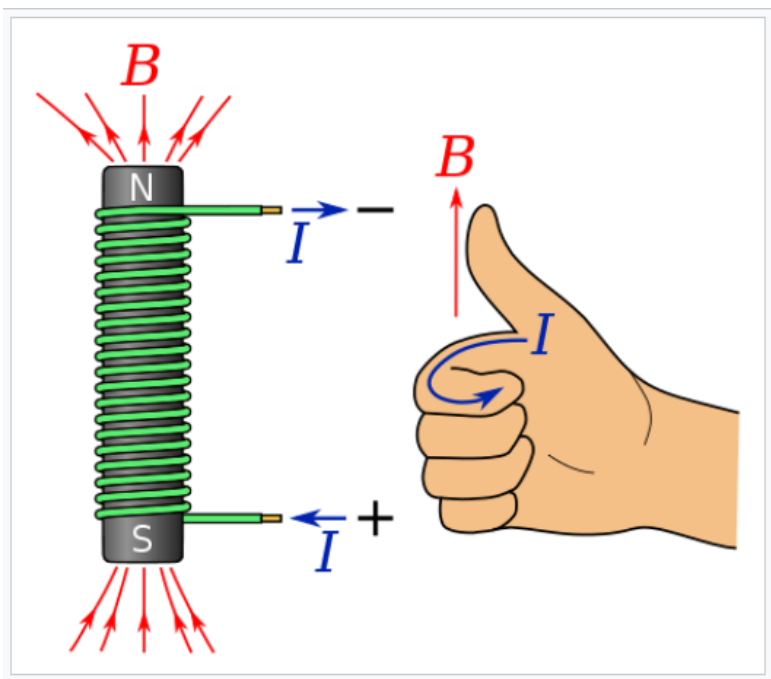
Ak sa nachádzajú vedľa seba viacej paralelných vodičov, tak, celkové pole magnetickej indukcie je dané súčtom ich príspevkov (tzv. sumačný princíp).

Pozn.: Pre smer siločiar magnetickej indukcie v okolí vodiča platí tzv. **Ampérove pravidlo pravej ruky** – palec prvej ruky ukazuje v smere prúdenia prúdu **I** a ostatné prsty v smere pôsobenia vektora magnetickej indukcie **B**.

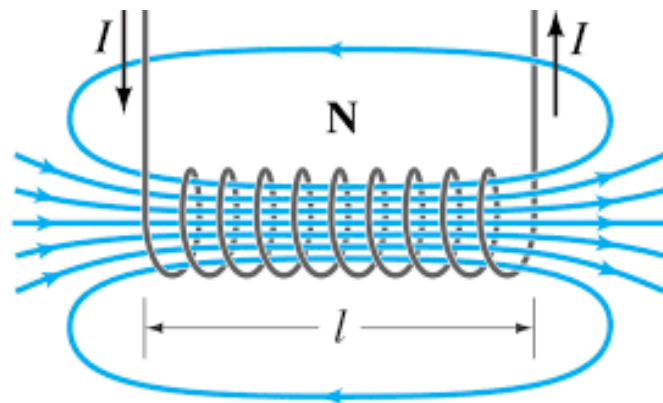
video: <https://www.youtube.com/watch?v=opJYLFvI-RE>

základy e-magnetizmu – Biot-Savartov zákon

Pole magnetickej indukcie v okolí **solenoidu** (dlhá cievka s počtom závitov N a celkovou dĺžkou ℓ), ktorou preteká prúd I :



$$|\vec{B}| = \frac{\mu_0 I N}{\ell}$$

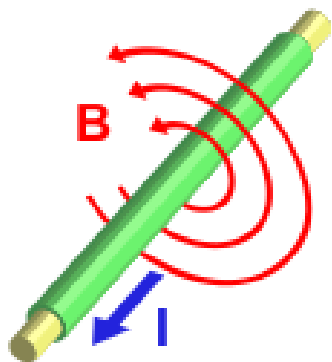


Podiel N/ℓ udáva počet závitov na jednotku dĺžky (tzv. hustota závitov).

základy e-magnetizmu – Ampérov zákon

Jeden z najpriamejších dôkazov prepojenia magnetických a elektrických fenoménov je vznik magnetického poľa v okolí vodiča, ktorým prechádza elektrický prúd – popísané je to **Ampérovým zákonom**:

Opisuje kruhové magnetické pole **B** v okolí vodiča vo vzťahu k elektrickému prúdu **I**, ktorý prechádza vodičom.



$$\oint_{l(S)} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I$$

krivkový integrál magnetickej indukcie **B** po ľubovoľnej uzavretej orientovanej krivke **l** je priamoúmerný celkovému elektrickému prúdu **I**, ktorý tečie cez povrch **S** (uzavretý krivkou **l**).

základy e-magnetizmu – Faradayov zákon

elektromagnetická indukcia

Oproti Biot-Savartovmu zákonu platí aj opačný jav:

- a) ak sa vodič pohybuje v magnetickom poli alebo
- b) vodič je v pokoji a mení sa pole magn. indukcie $\mathbf{B}$,
tak sa v ňom indukuje tzv. elektromotorická sila.

Uvedený jav nazývame ako **elektromagnetická indukcia**.

Súčasťou tohto pohybu (a zmeny magnetickej indukcie $\mathbf{B}$) je aj vznik elektromotorického napätia a prúdu (v uzavretom obvode), o čom hovorí tzv. **Faradayov zákon indukcie**.

video:

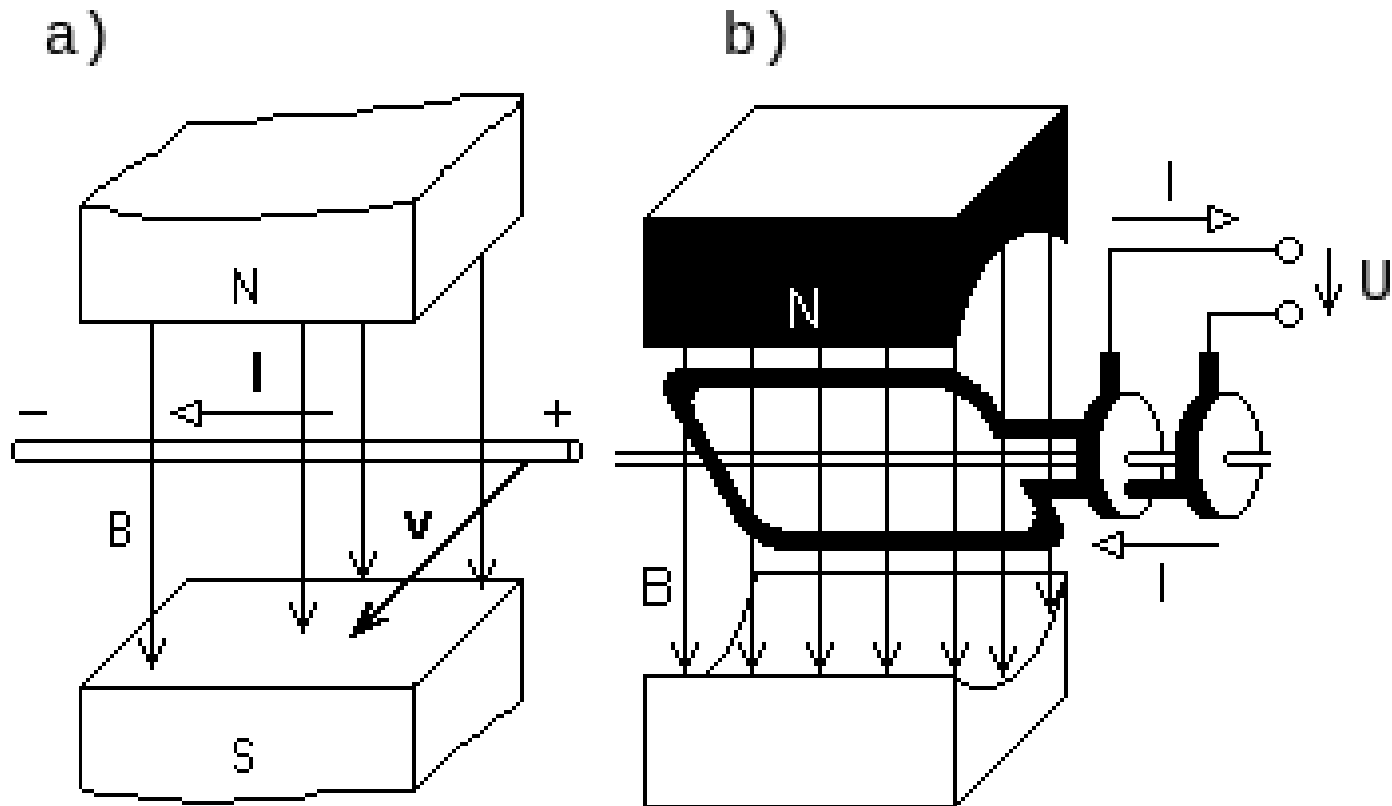
<https://www.youtube.com/watch?v=vwldZjld8fo>



elektromagnetická indukcia

Faradayov zákon indukcie – popisuje vznik elektrického napätia v uzavretom elektrickom obvode, ktorý je spôsobený zmenou magnetickej indukcie **B**.

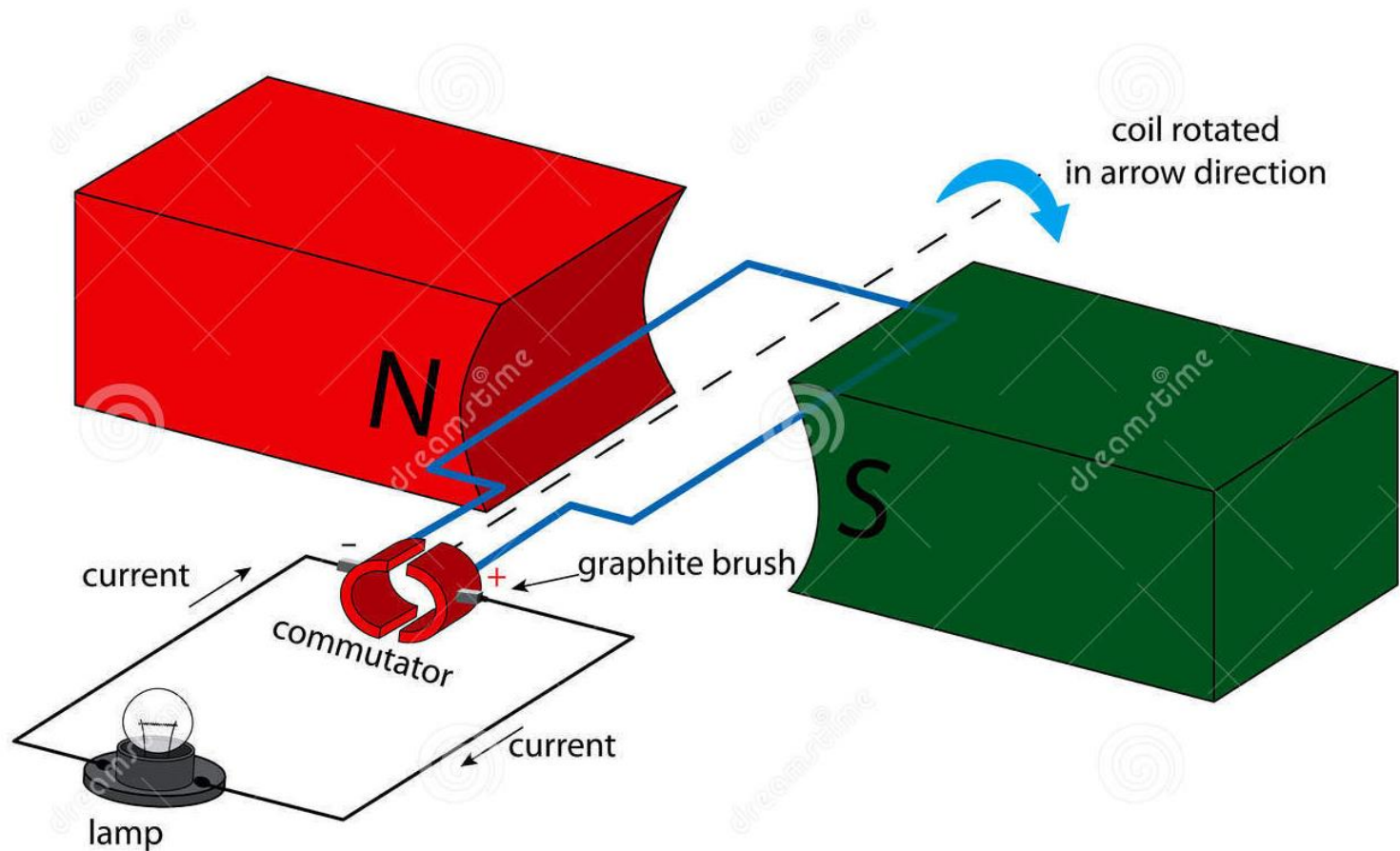
Indukčné javy sú základom pre výrobu elektrického prúdu.



elektromagnetická indukcia

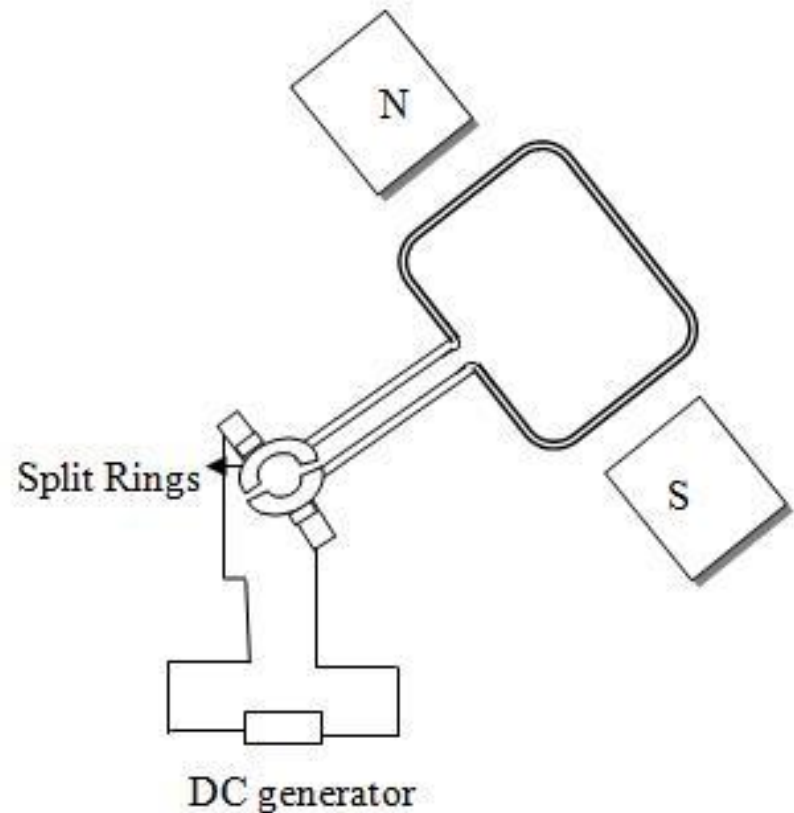
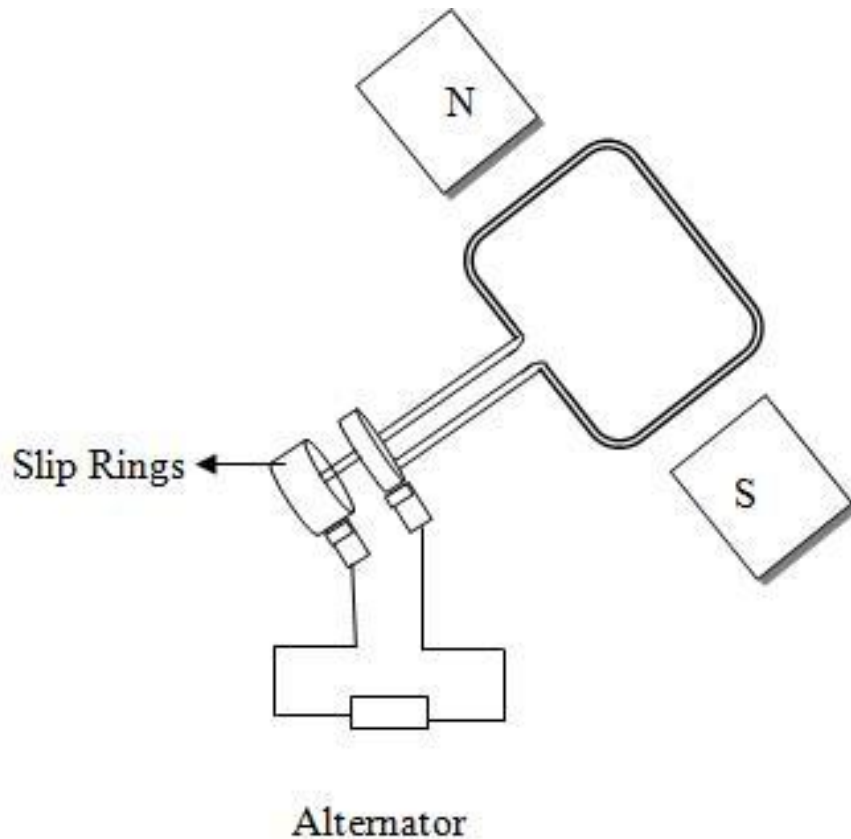
Výroba elektrického prúdu: jednosmerného (direct current = d.c.).

Simple d.c. Dynamo



elektromagnetická indukcia

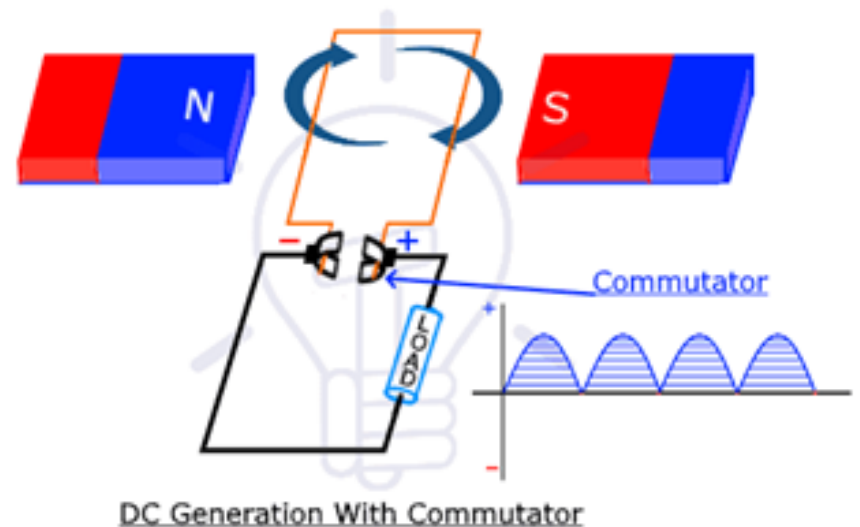
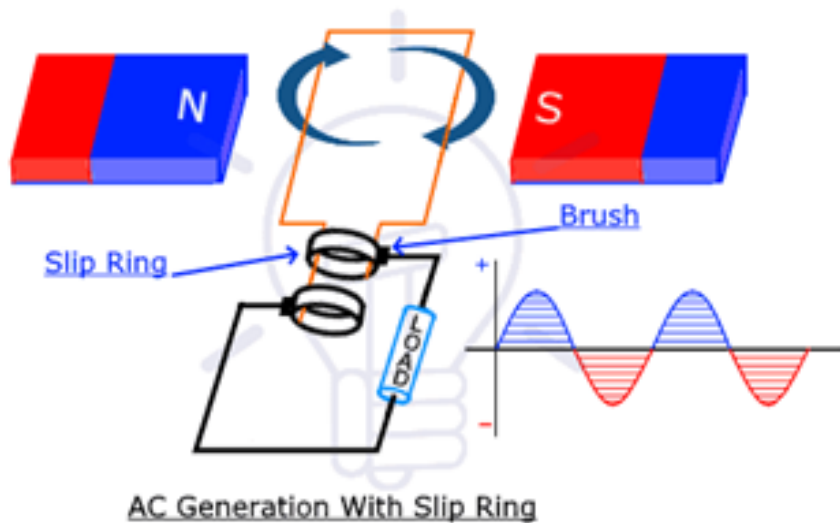
Výroba elektrického prúdu: striedavého a jednosmerného.



Principiálny rozdiel medzi alternátorom (striedavý prúd) a generátorom (jednosm. prúd) je v tvare tzv. komutátora.

elektromagnetická indukcia

Výroba elektrického prúdu: striedavého a jednosmerného.



Principiálny rozdiel medzi alternátorom (striedavý prúd) a generátorom (jednosm. prúd) je v tvare tzv. komutátora.

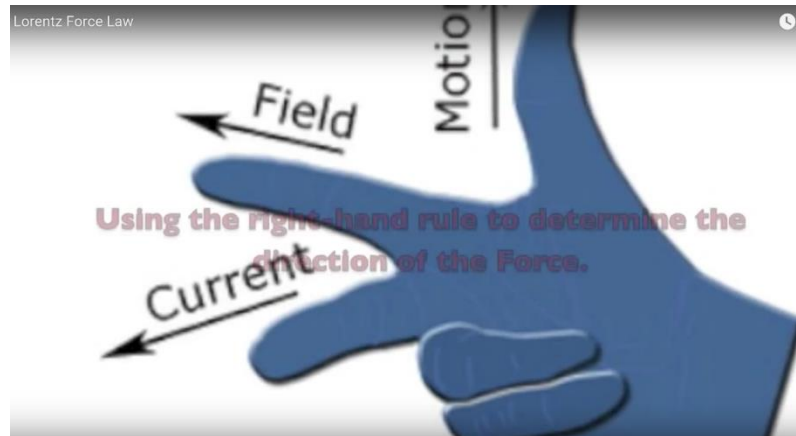
elektromagnetická indukcia

Dôsledkom elektromagnetickej indukcie je aj silové pôsobenie na:

- a) vodič s jednosm. prúdom v magnetickom poli,
- b) elektrický náboj, pohybujúci sa v magnetickom poli

Ak je elektrický vodič umiestnený do magnetického poľa $\mathbf{B}$ a týmto vodičom preteká prúd $\mathbf{I}$, tak naň pôsobí sila $\mathbf{F}$.

pravidlo
pravej ruky
pre pochopenie
pôsobenia
smerov vektorov



video:

https://www.youtube.com/watch?v=L9zq_fvRuwo

Pozn.: Vzťah medzi silou $\mathbf{F}_M$, ktorou pôsobí magnetické pole s indukciou $\mathbf{B}$ na vodič dĺžky ℓ , keď ním preteká prúd I :

$$\mathbf{F}_M = \mathbf{B} I \ell \sin\alpha$$

(kde α je uhol medzi vektorom $\mathbf{B}$ a vodičom ℓ).

elektromagnetická indukcia

Dôsledkom elektromagnetickej indukcie je aj silové pôsobenie na:

- a) vodič s jednosm. prúdom v magnetickom poli,
- b) elektrický náboj, pohybujúci sa v magnetickom poli

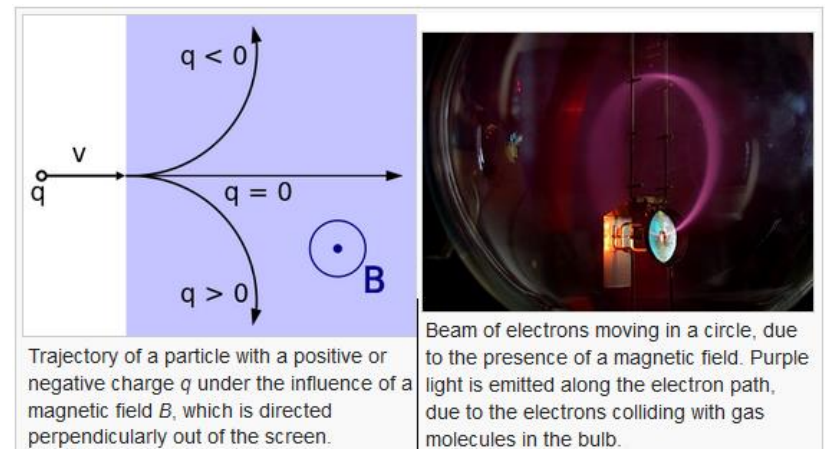
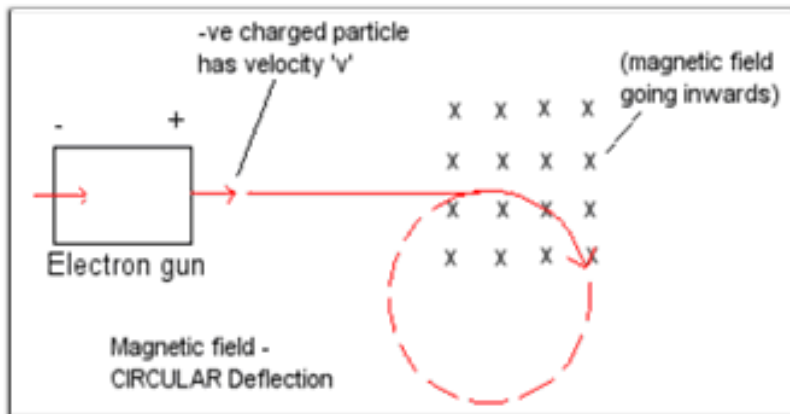
Ak vletí častica s elektrickým nábojom (elektrón, protón, ión) do magnetického poľa kolmo ku indukčným čiaram, magnetické pole na ňu pôsobí silou $\mathbf{F}_M$:

$$\mathbf{F}_M = \mathbf{B} Q \mathbf{v} ,$$

kde v je veľkosť rýchlosti častice. Reakciou je vznik dostredivej sily $\mathbf{F}_{DO}$:

$$\mathbf{F}_{DO} = m\mathbf{v}^2/r ,$$

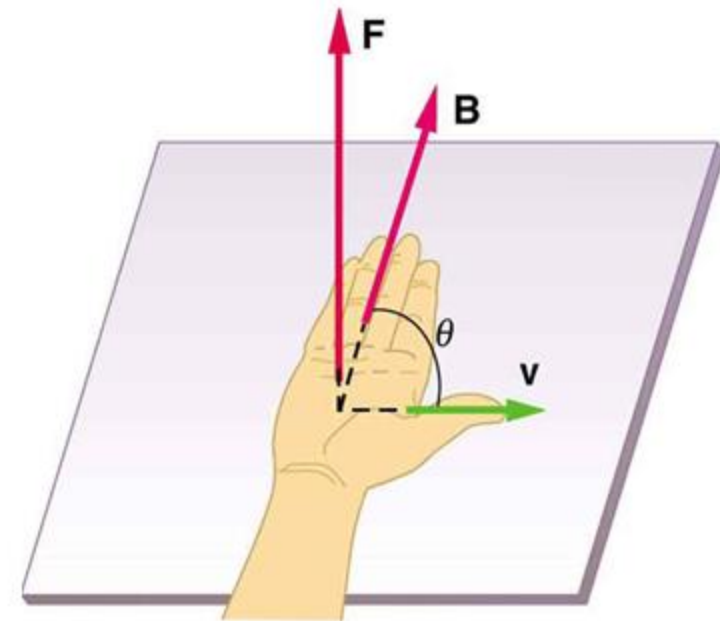
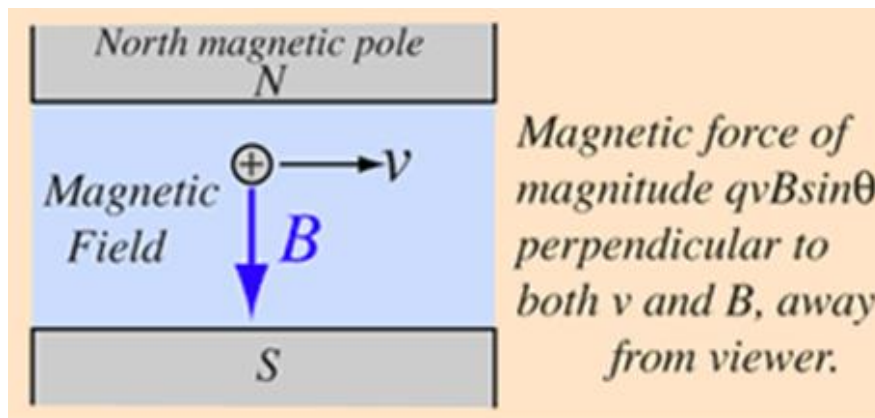
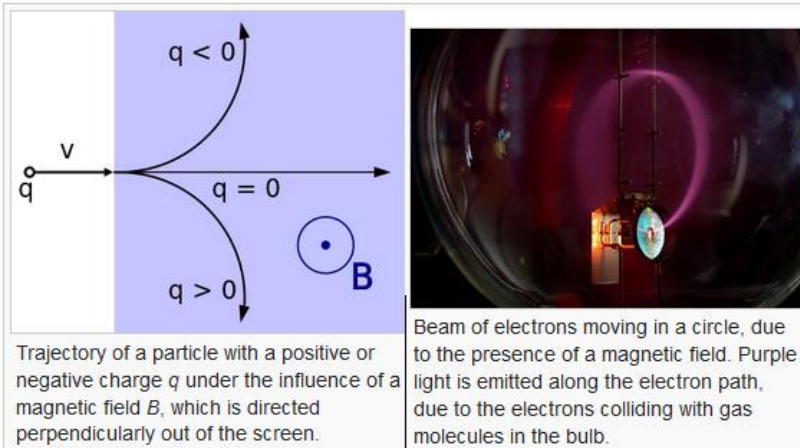
kde r je polomer kružnice, ktorá je trajektóriou takéhoto pohybu.



elektromagnetická indukcia

Dôsledkom elektromagnetickej indukcie je aj silové pôsobenie na:

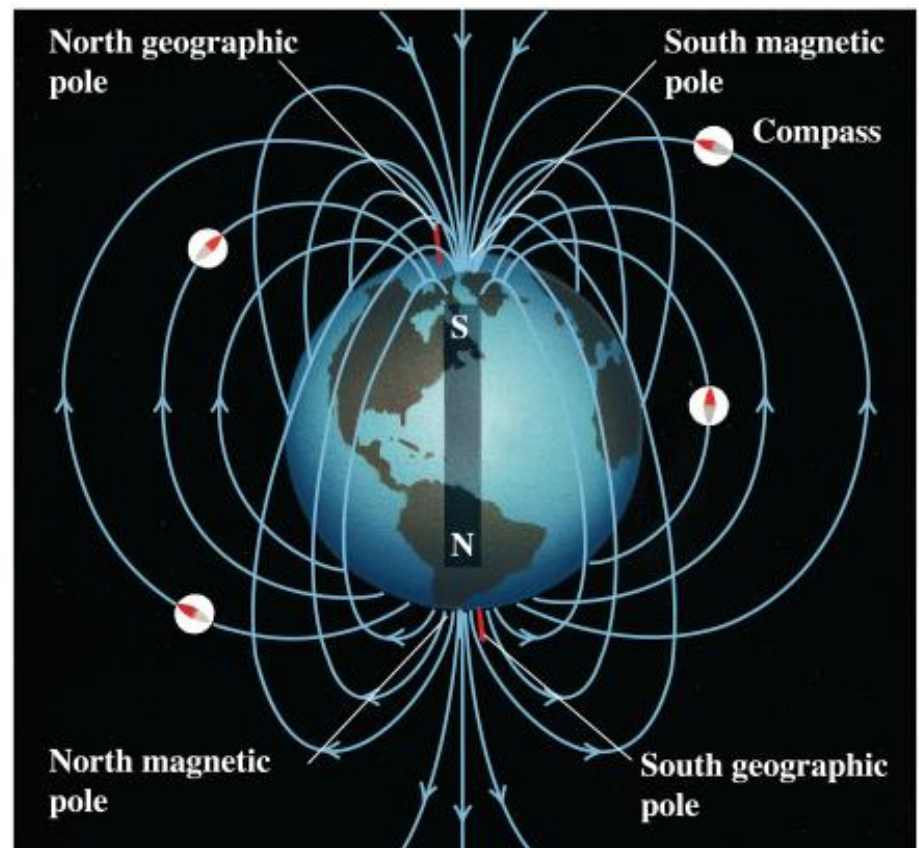
- a) vodič s jednosm. prúdom v magnetickom poli,
- b) elektrický náboj, pohybujúci sa v magnetickom poli



magnetické pole Zeme a jeho vlastnosti

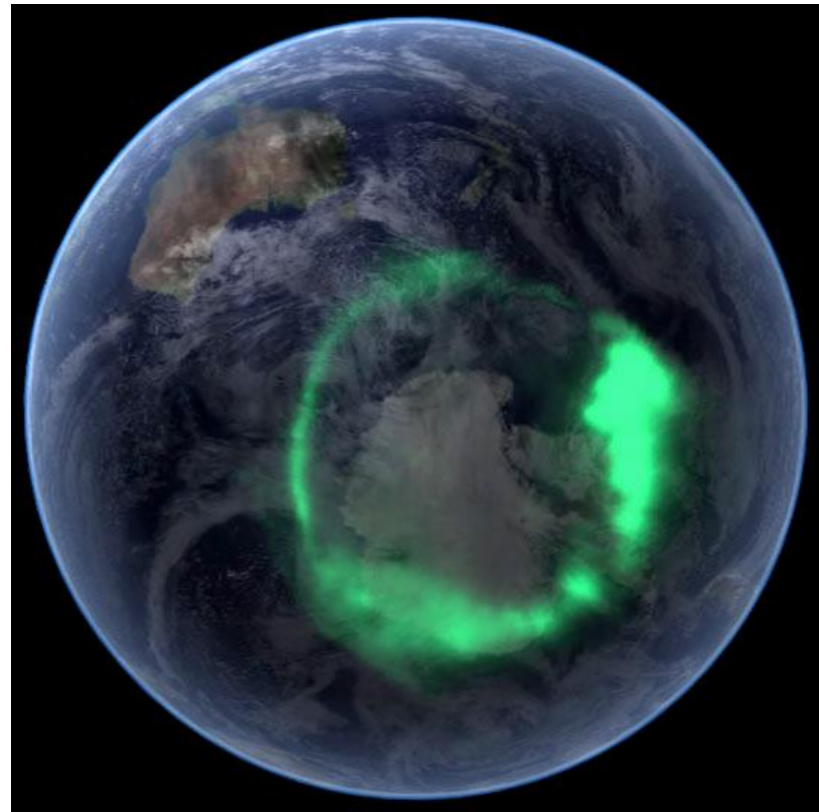
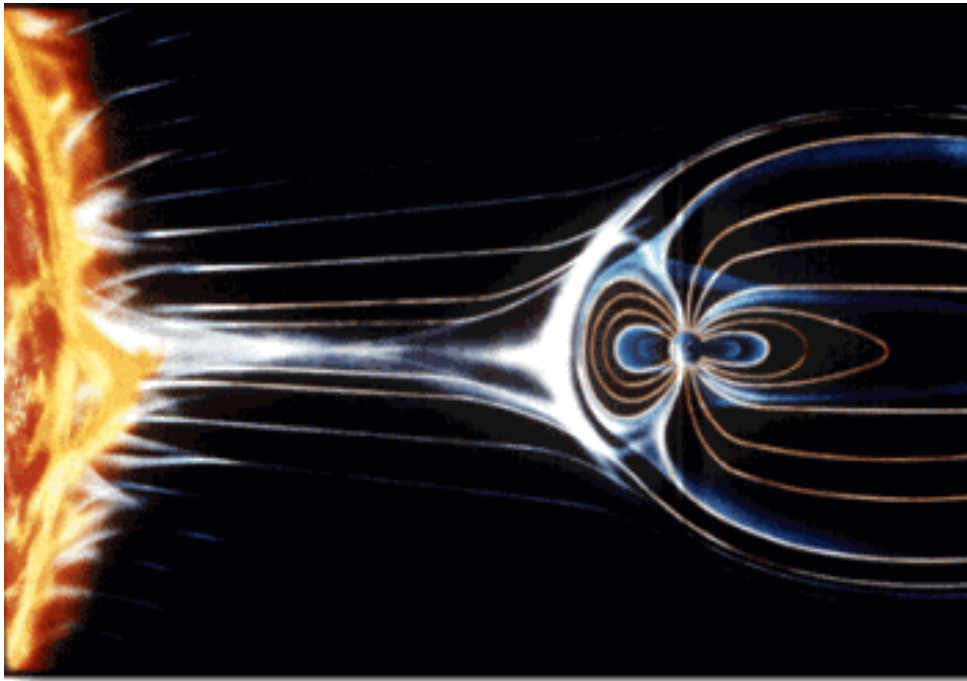
magnetické pole Zeme

Základom jeho generovania je pohyb vodivých hmôt (elektricky nabitých částíc) vo vonkajšom jadre – tzv. hydromagneto dynamické javy.



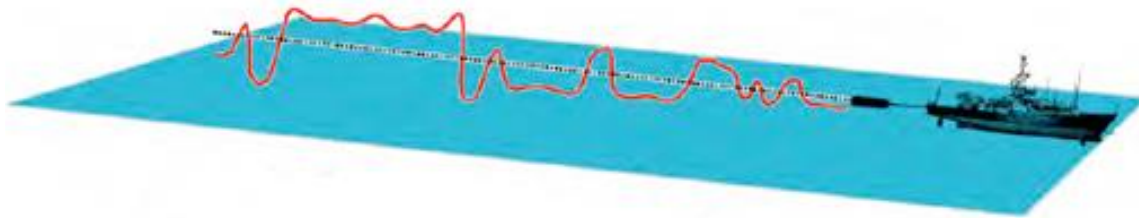
magnetické pole Zeme

Z celoplanetárneho hľadiska sa zvykne hovoriť o magnetosfére – ktorá tvorí ochranný „štít“ Zeme pred tzv. slnečným vetrom (prúd vysoko energetických častíc, ktoré sú emitované z povrchu Slnka).

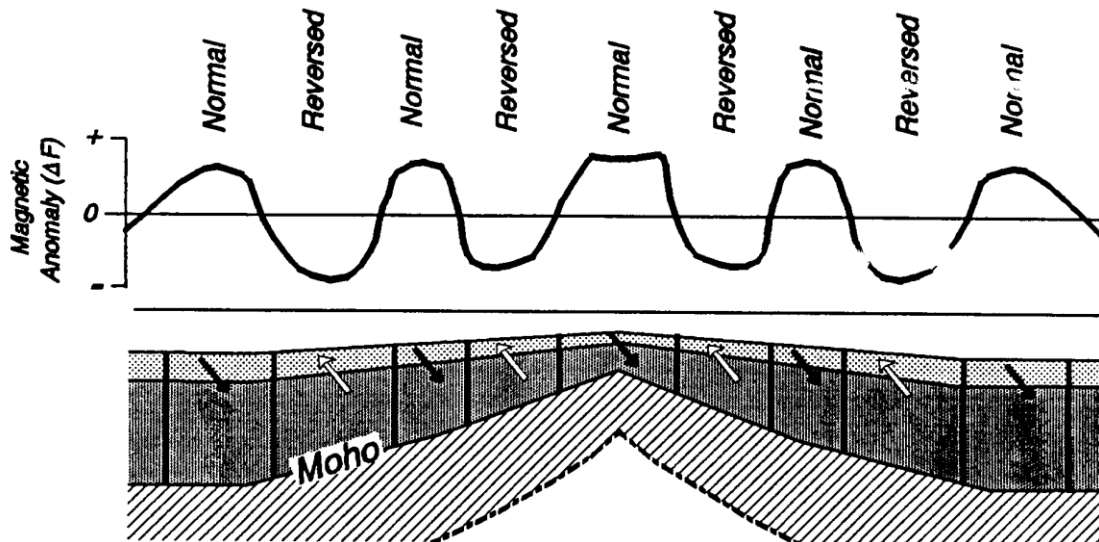


magnetické pole Zeme

V priebehu historických dôb došlo ku tzv. prepólovaniu magnetických pólů.



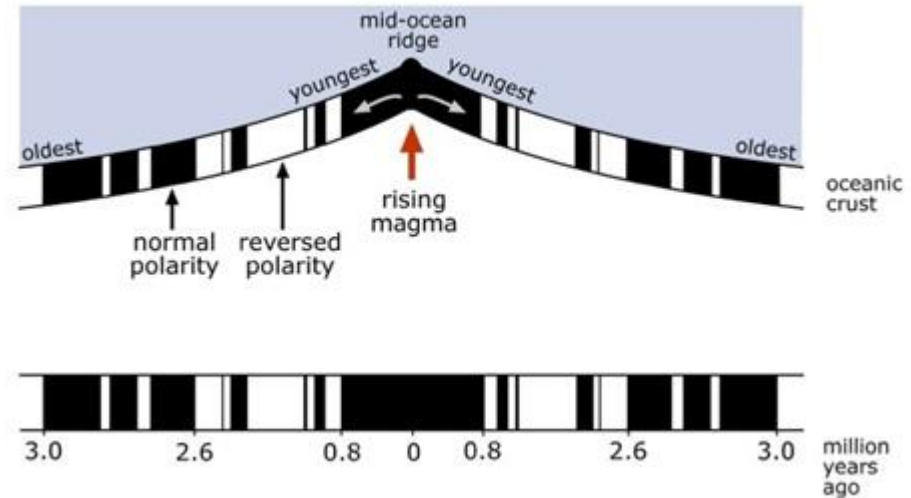
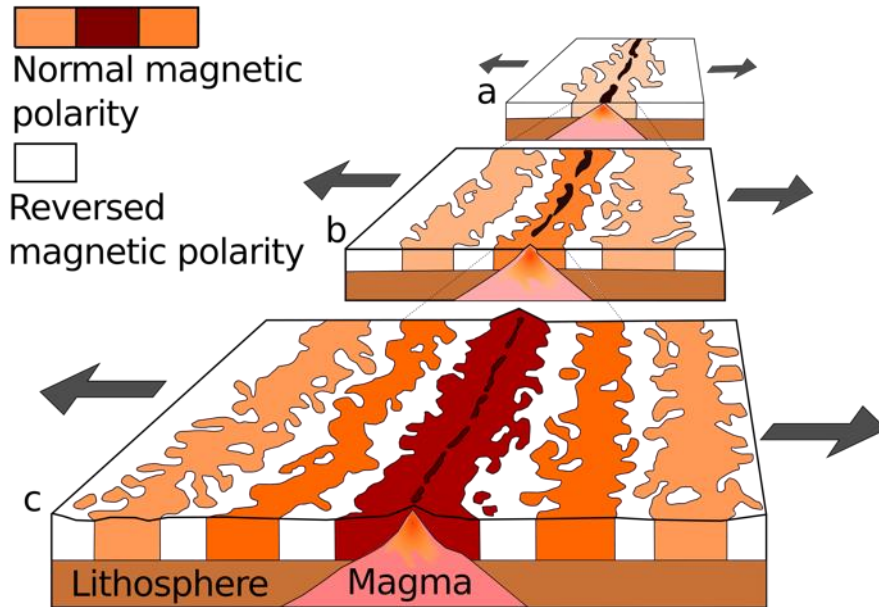
merania v priestore Atlantického oceánu
(Rald and Mason, 1961)



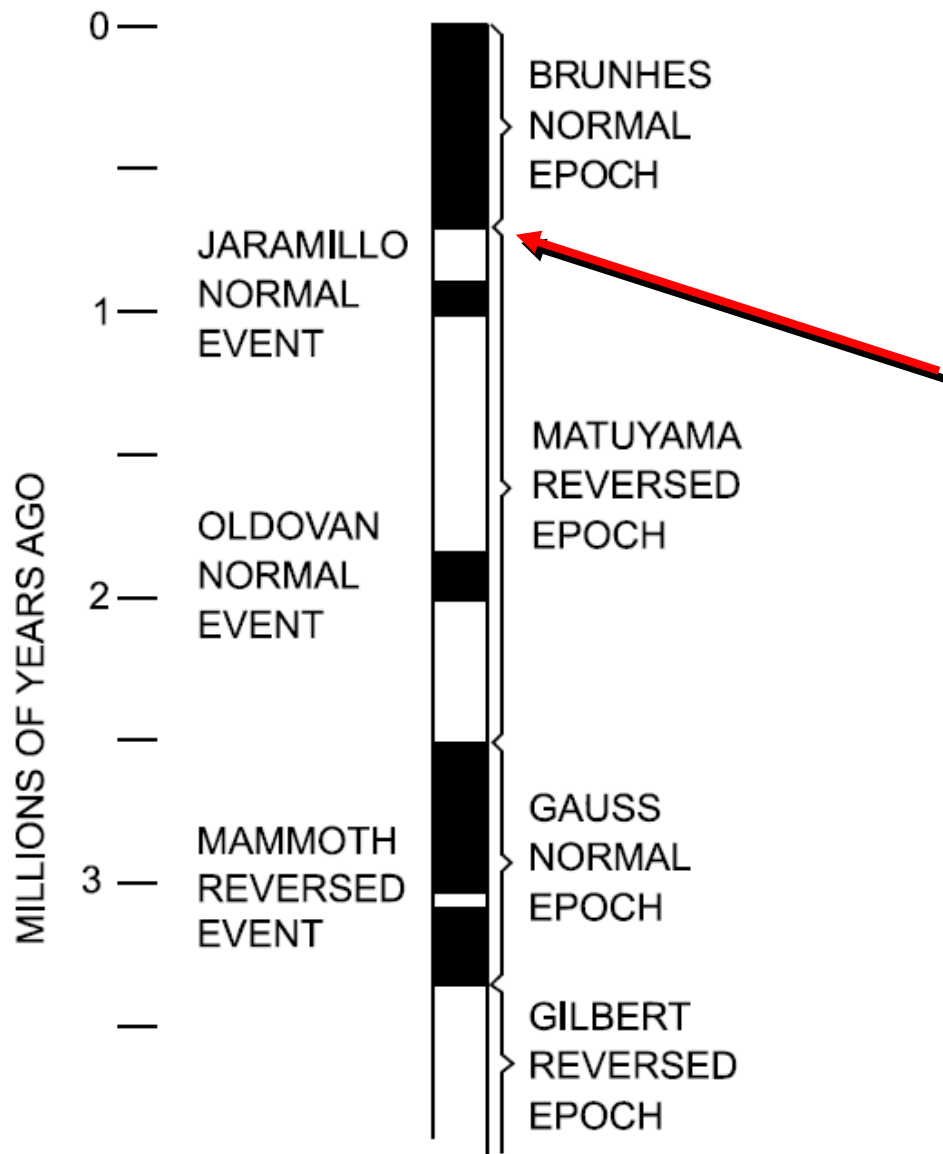
odvetvie geofyziky – paleomagnetizmus a archeomagnetizmus

magnetické pole Zeme

V priebehu historických dôb došlo ku tzv. prepólovaniu magnetických pólů.



magnetické pole Zeme



- perióda prepólovania sa pohybuje v rozmedzí hodnôt rádovo **tisíce rokov** až **milióny rokov** – v priemere 250.000 rokov,

- v súčasnosti sa nachádzame v tzv. Brunhesovej normálnej epoche, ktorá začala pred cca 780.000 rokmi,

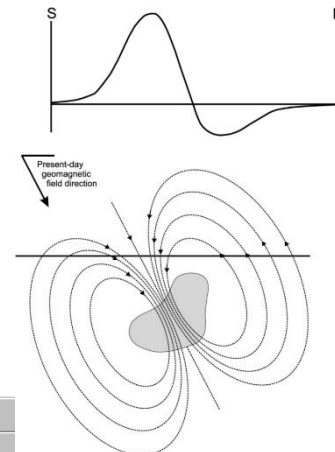
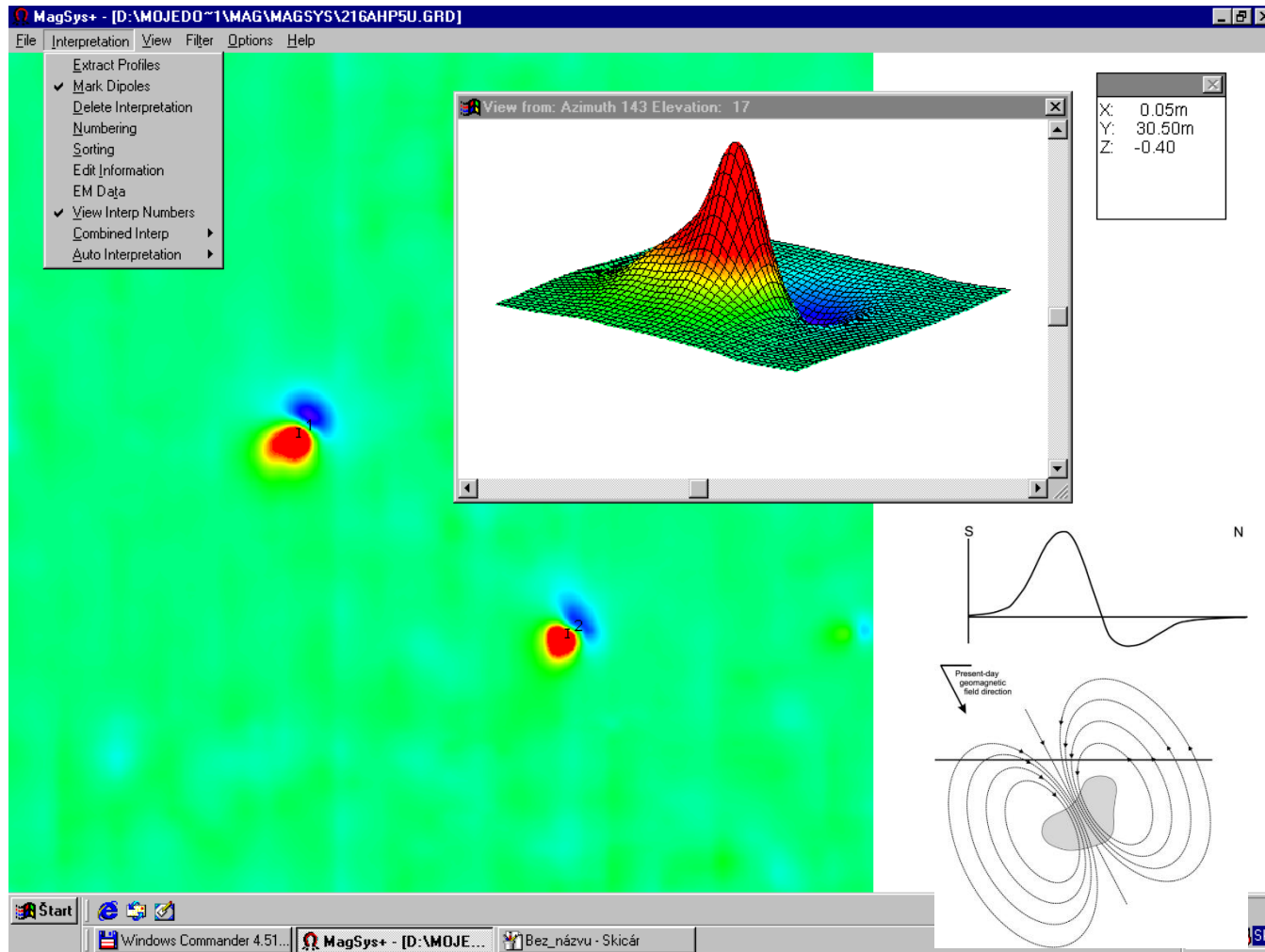
magnetometria – využitie magnetických vlastností hornín

Vo vonkajšom magnetickom poli Zeme sa magnetizujú nielen časti oceánickej kôry, ale aj viaceré horniny, ktoré majú paramagnetické alebo feromagnetické vlastnosti (najmä bázické magmatické horniny, ale aj metamorfované a dokonca aj sedimentárne).

Tieto anomálne prejavy je možné merať pomocou prístrojov – **magnetometrov**.



magnetometria – využitie magnetických vlastností materiálov

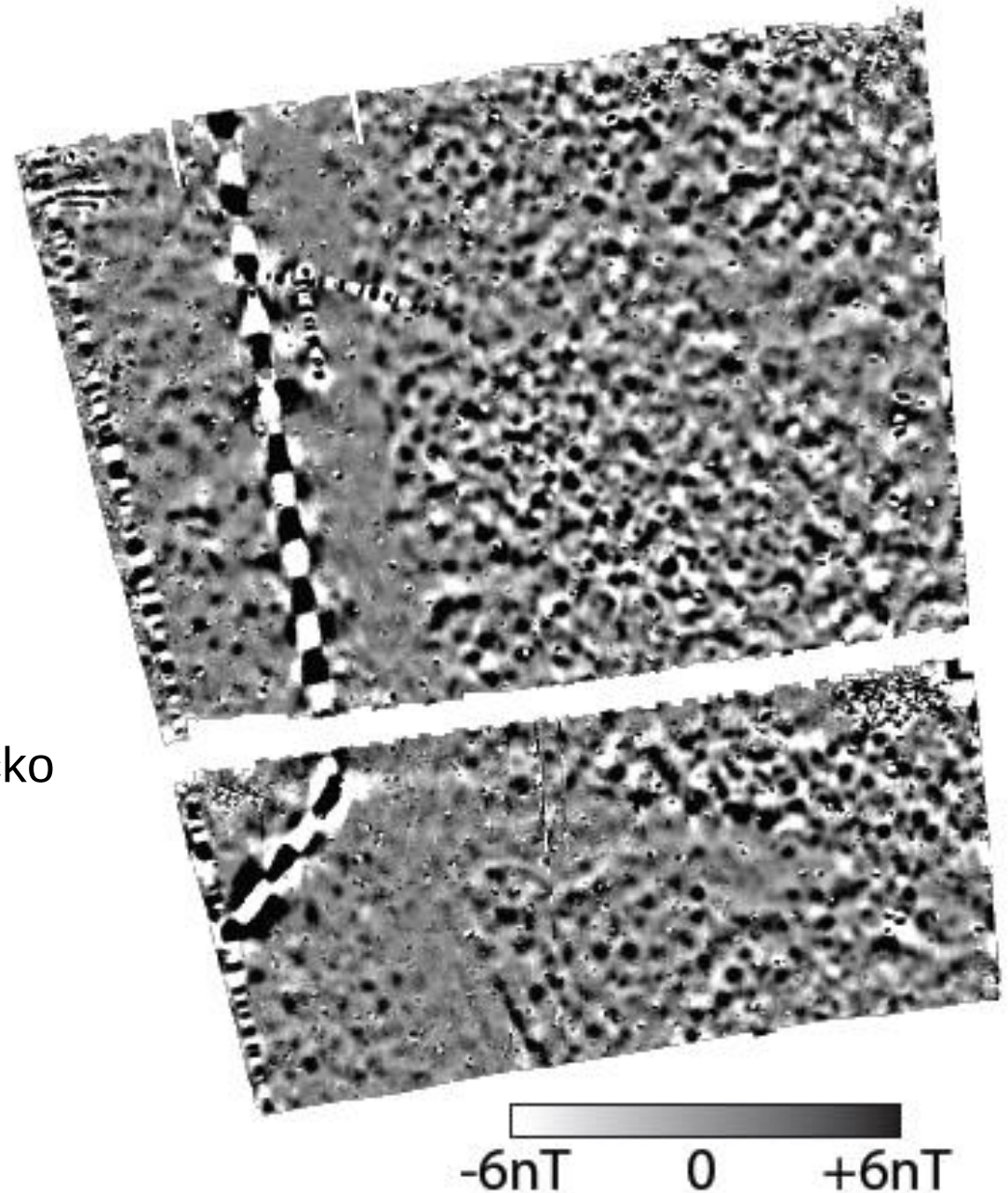


Príklad – typické dipólové anomálie namerané nad objektmi nevybuchnutej munície (železné projektily).

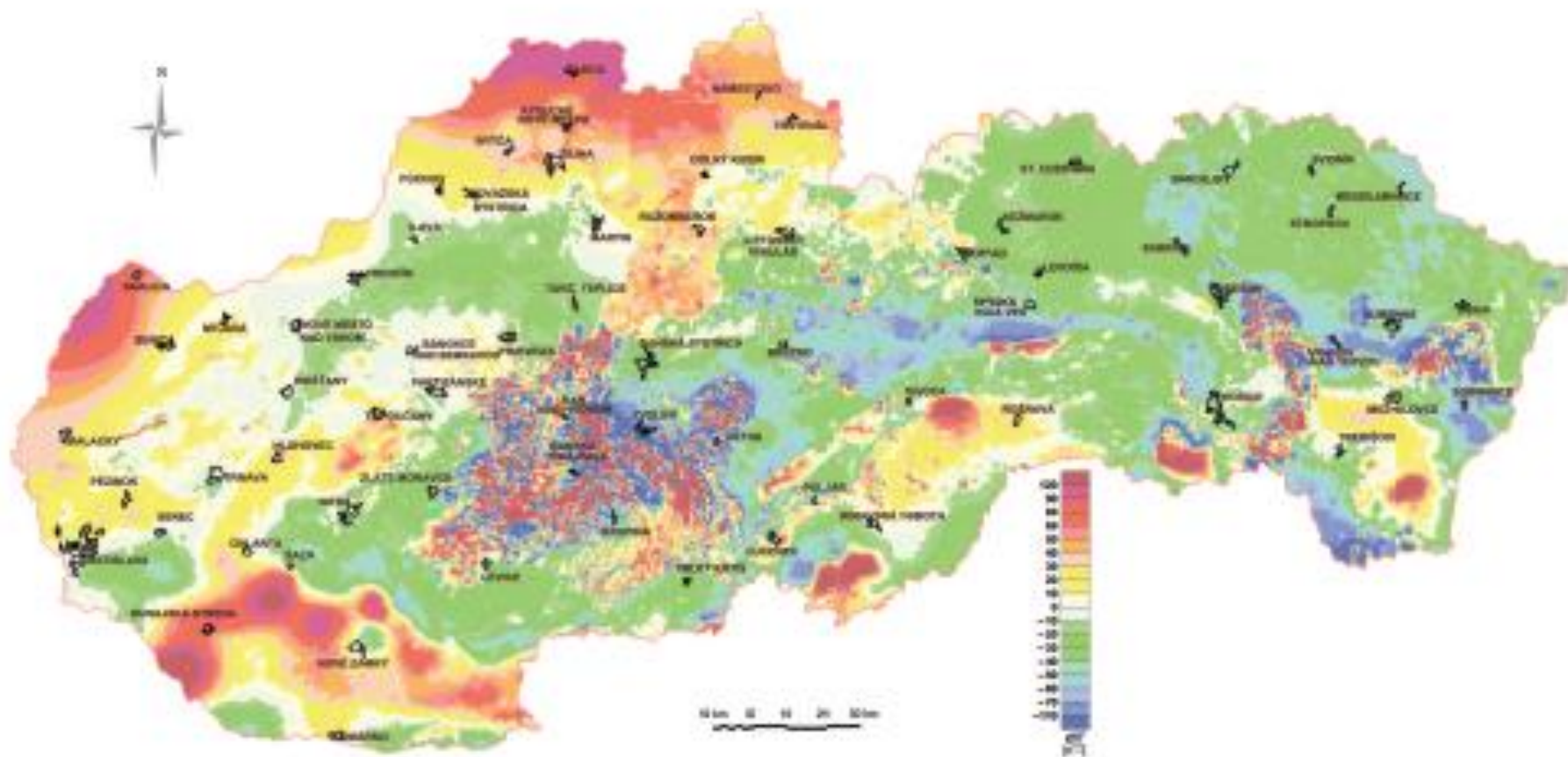
magnetometria – využitie magnetických vlastností materiálov

Príklad – prejav oceľového potrubia (typické spojenie dipólových anomálií od jednotlivých častí potrubia)

lokalita: Kiel, severné Nemecko

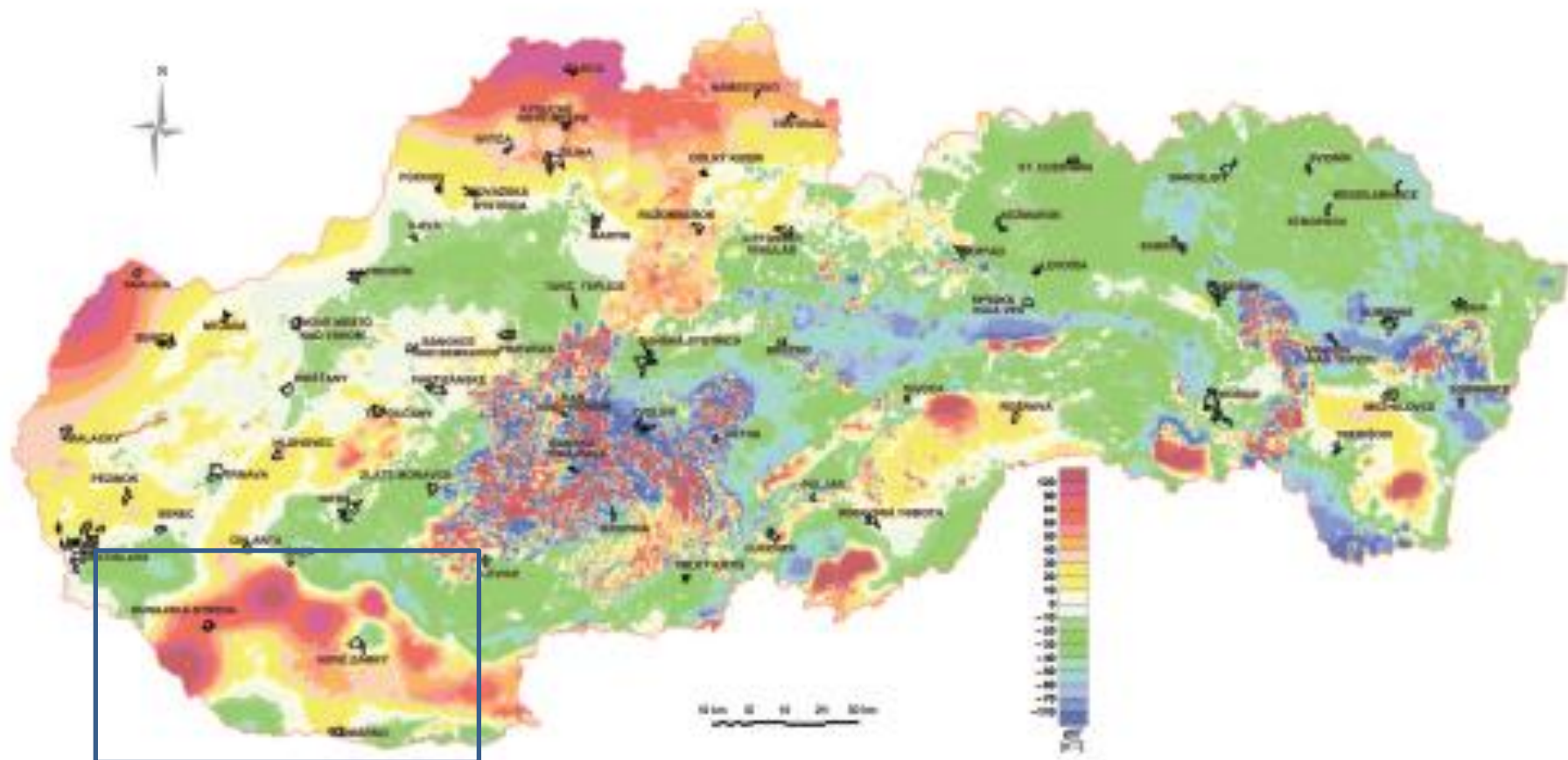


magnetometria – využitie magnetických vlastností hornín



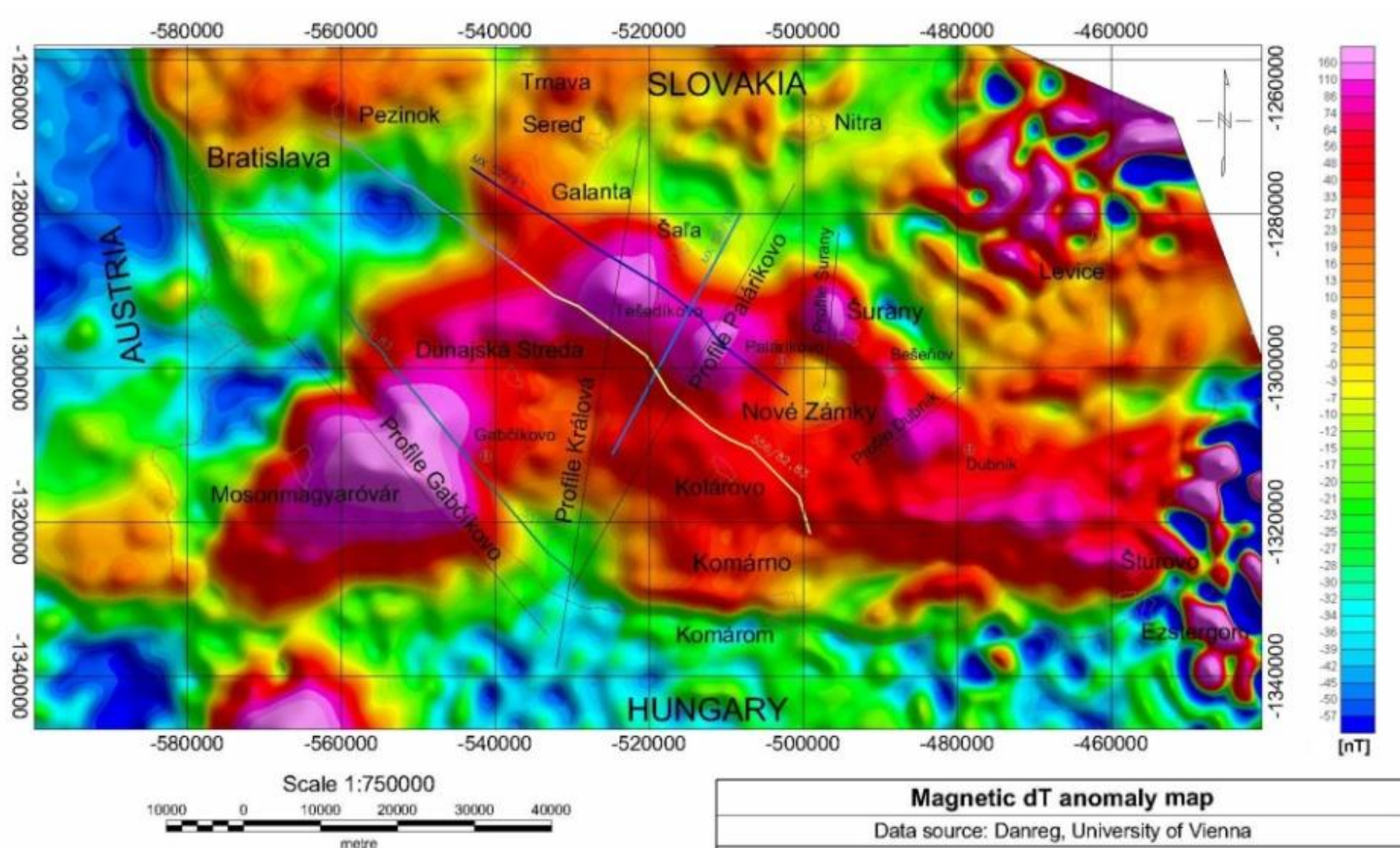
príklad – anomálne magnetické pole (magnetická indukcia) SR

magnetometria – využitie magnetických vlastností hornín

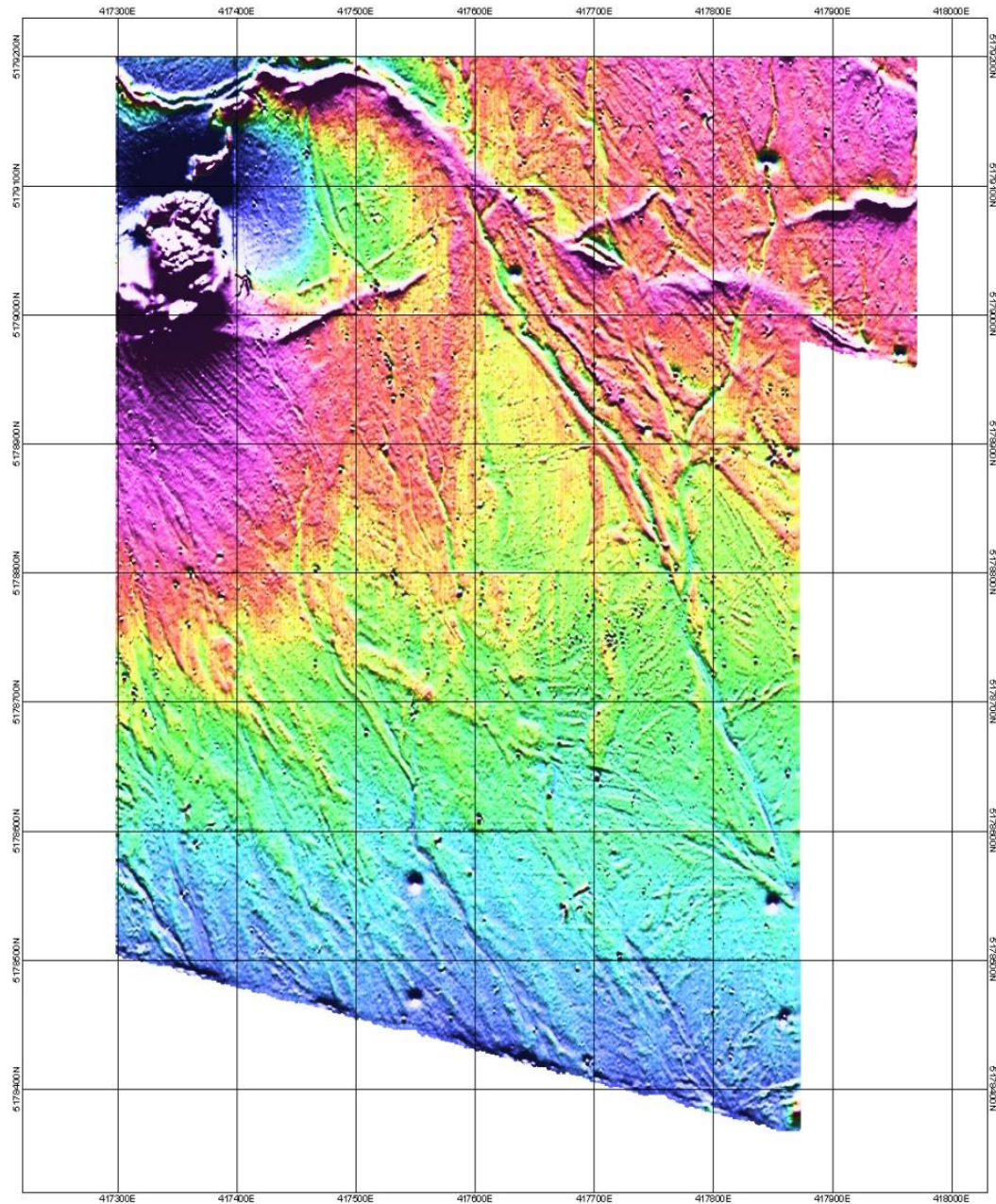


príklad – anomálne magnetické pole (magnetická indukcia) SR –
- detail v obdĺžniku bude zobrazený na ďalšom snímku

magnetometria – využitie magnetických vlastností hornín



príklad – detail: anomálne magnetické pole (magnetická indukcia) z pohraničia SR, Maďarska a Rakúska.



Colour Image of Total Magnetic Intensity
Chevallier Ranch
Surveyed for the Montana Army National Guard

príklad : anomálne
magnetické pole
(magnetická indukcia),
zmerané
nad bazaltovým
sopečným aparátom
(plocha cca 0.6x0.8 km),

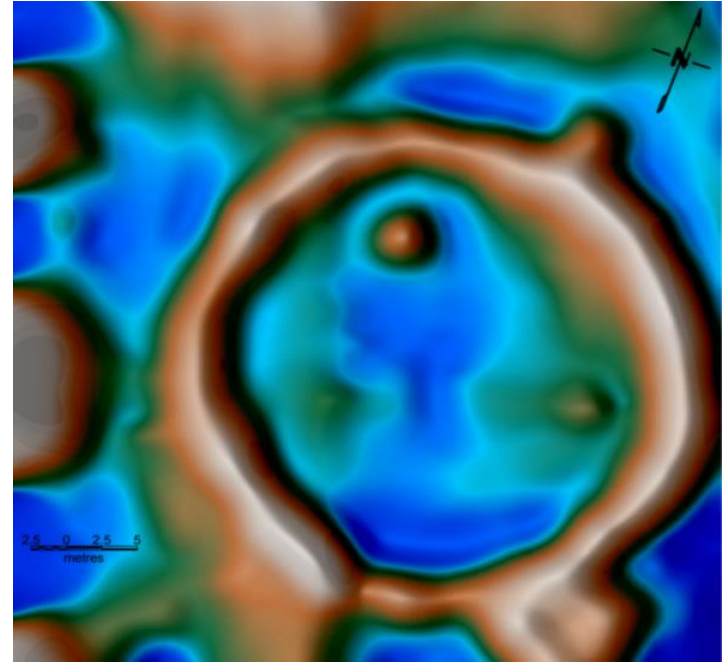
lokalita Chevallier ranch,
Montana, USA

magnetometria – využitie magnetických vlastností hornín

letecká snímka – letné obdobie



anomálne magnetické pole



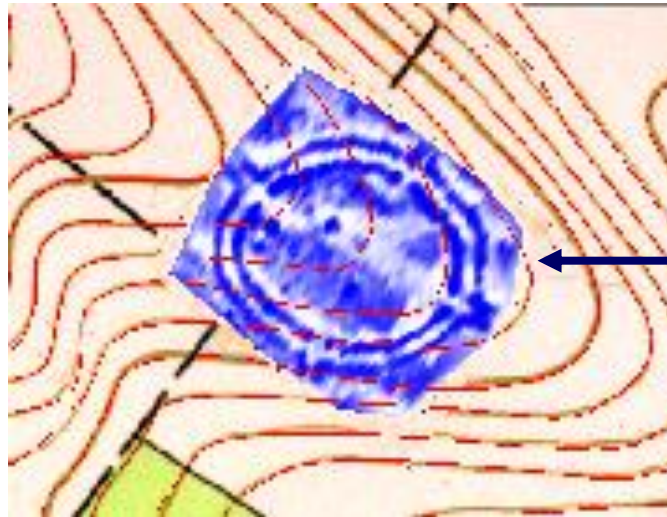
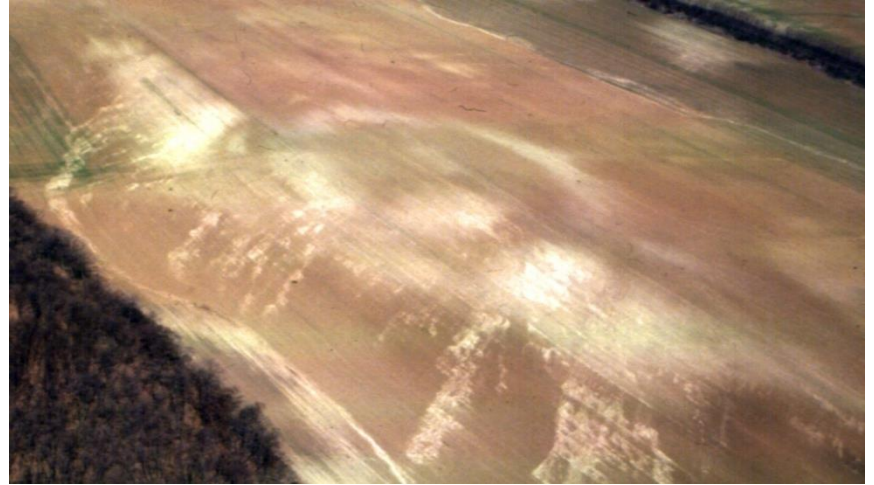
BRANČ, okr. Nitra, obdobie: doba bronzová – 18. stor. p.n.l.

magnetometria – využitie magnetických vlastností hornín

letecká snímka – letné obdobie



letecká snímka – zimné obdobie

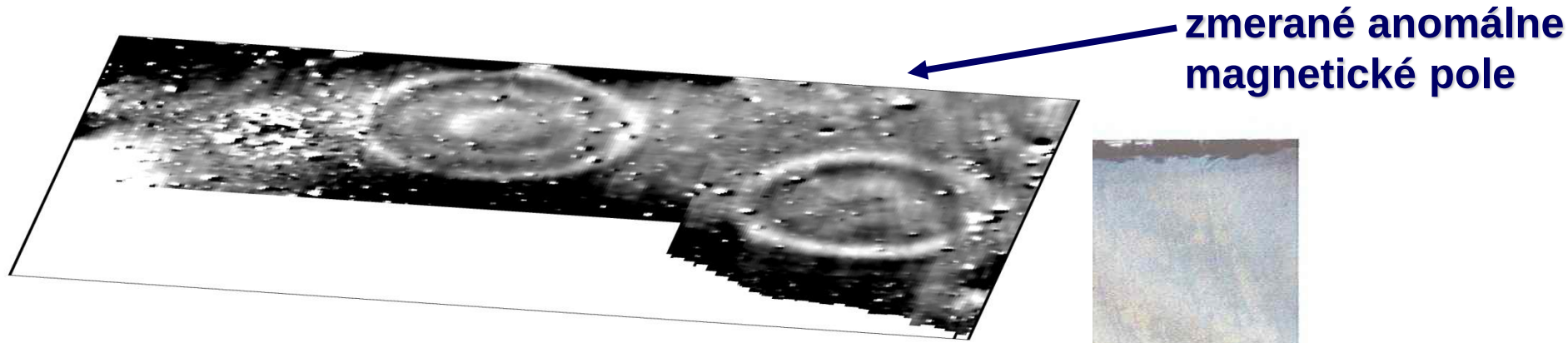


anomálne
magnetické pole

HORNÉ OTROKOVCE, okr. Hlohovec, obdobie: neolit – 35. stor. p.n.l.

Príklad – mapovanie archeologických štruktúr vďaka zvýšenej koncentrácii magnetických minerálov v humuse (tzv. rondel).

magnetometria – využitie magnetických vlastností hornín



lokalita: Biely Kostol (pri Trnave), halštatské mohyly

Príklad – mapovanie archeologických štruktúr vďaka rozdielnym magnetickým vlastnostiam použitých materiálov (aj napr. vďaka zvýšenej koncentrácii magnetických minerálov v humuse).