

# Fyzika Zeme

- Úvodný kurz pre poslucháčov prvého ročníka bakalárskych programov v rámci odboru geológie
- 7. téma – 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**.

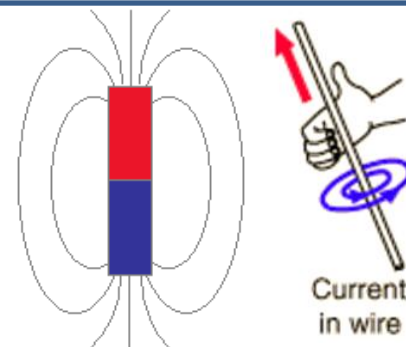
**Magnetické pole** je fyzikálne pole, v ktorom **pôsobí na pohybujúce sa elektrické náboje alebo magnety** (aj železné predmety) **sila  $F$** .

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.

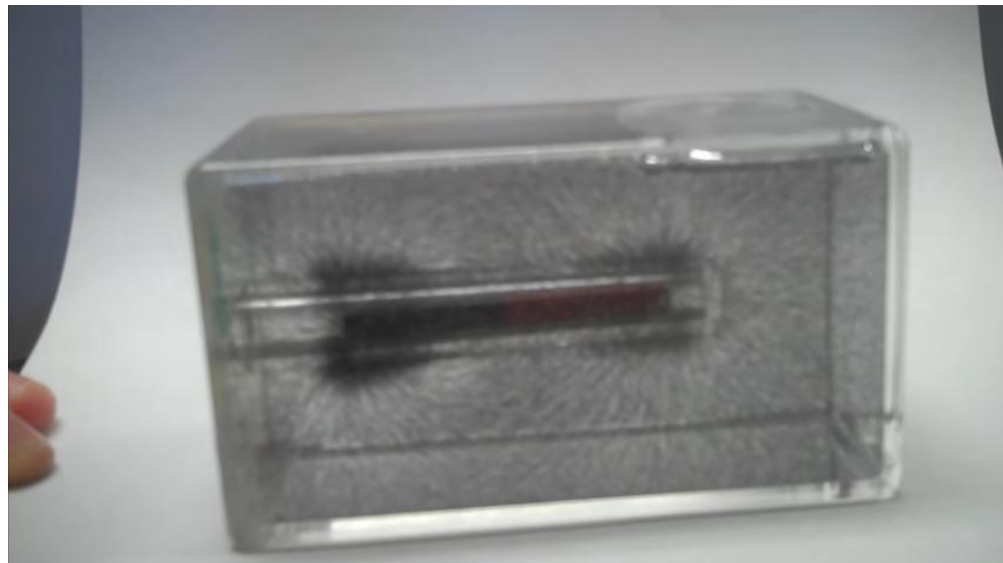


Magnetické polia rozdeľujeme takto na:

- 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  $\mu$  – **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):

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

$\mu_0$  – permeabilita vákua ( $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H}\cdot\text{m}^{-1}$ ).

# magnetizmus – základné fyzikálne veličiny

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

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  $B$**  (vektorová veličina,  $[T]$ ).

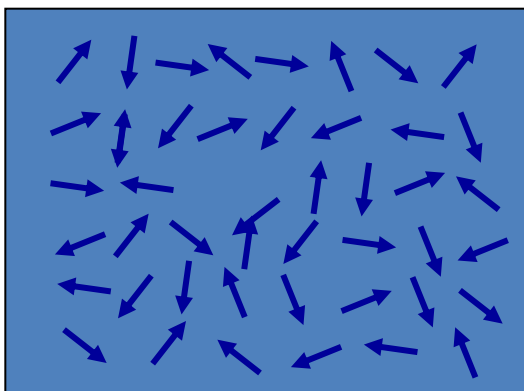
Charakterizuje silové účinky magnetického poľa na pohybujúci sa náboj, alebo na vodič s prúdom v magnetickom poli, pričom v sebe zahŕňa reakciu látky na vonkajšie magnetické pole (jej zmagnetizovanie alebo pôsobenie proti nemu).

Alternative names for  $B$  and  $H$

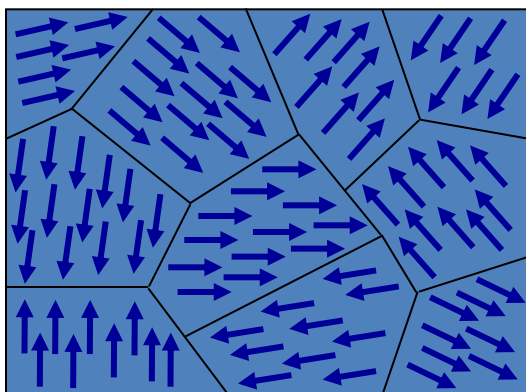
| $B$                             |                      |
|---------------------------------|----------------------|
| name                            | used by              |
| magnetic flux density           | electrical engineers |
| <u>magnetic induction</u>       | electrical engineers |
| magnetic 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**.

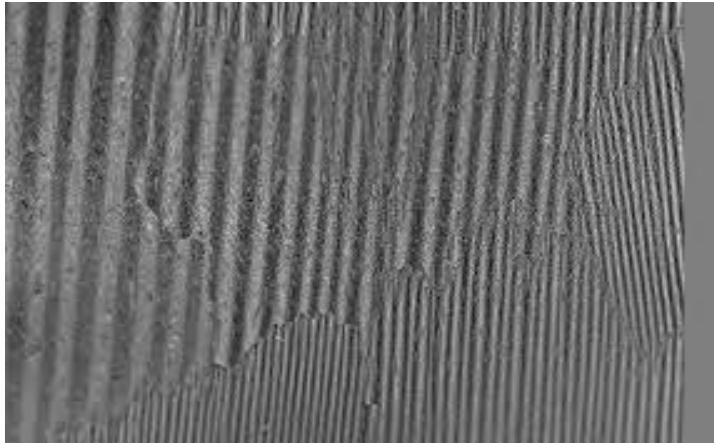
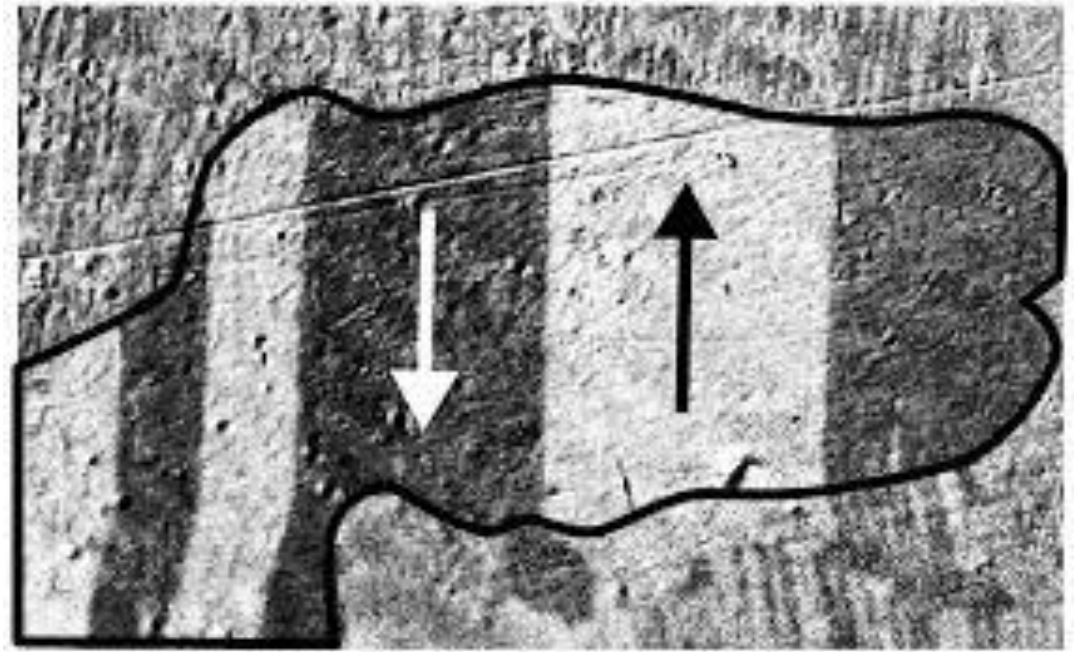
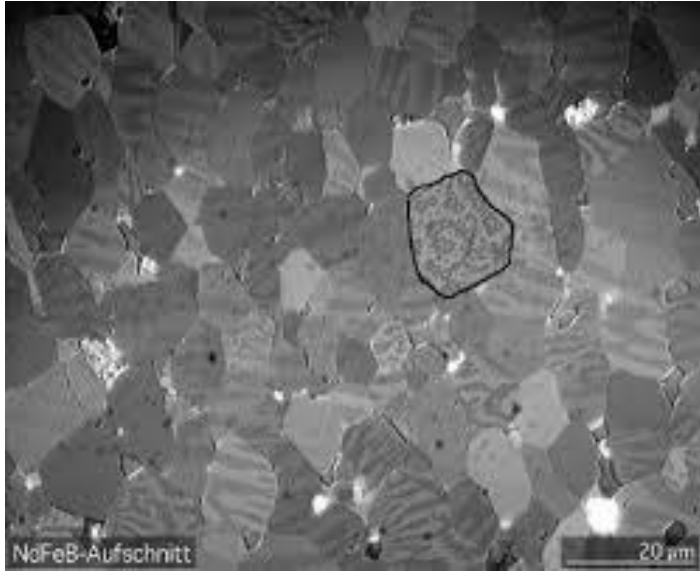


Ak látku vložíme do vonkajšieho magnetického poľa, sú elementárne magnetické momenty jeho pôsobením ovplyvnené a môžu zmeniť svoje usporiadanie v látke.

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

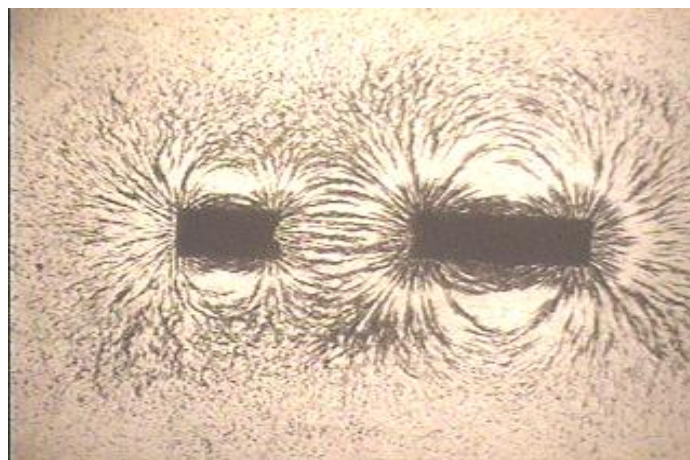
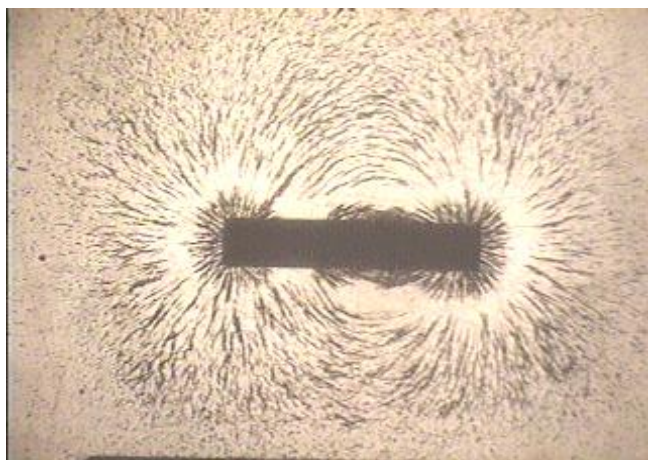
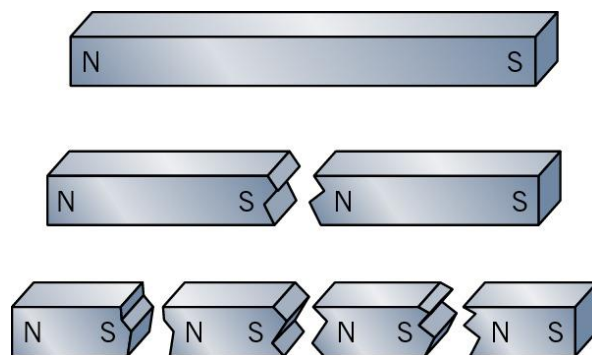
# magnetizmus – základné fyzikálne veličiny

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  $\mu_r$  ( $\mu_r = \mu/\mu_0$ ) 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).

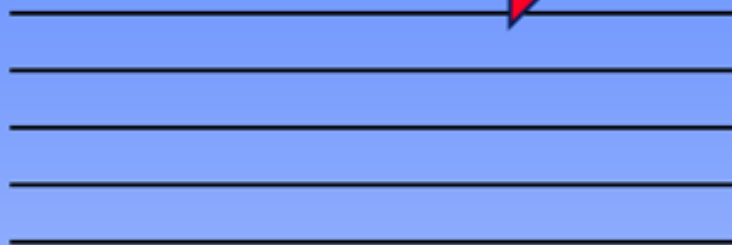
Diamagnetické látky sú z magnetického poľa vypudzované, paramagnetické a feromagnetické sú naopak do magnetického poľa vtáňované (pohyb smerom do miesta s najvyššou intenzitou poľa).

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

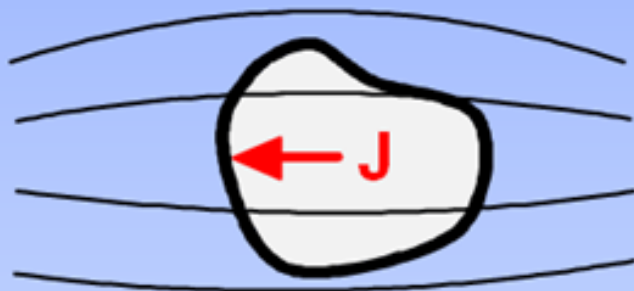
Najsilnejšie diamagnetické chovanie vykazujú supravodiče, ktoré môžu do určitej intenzity pôsobiaceho magnetického poľa úplne zabrániť vnikaniu poľa do svojho objemu (až na tenkú povrchovú vrstvu) a tak je v určitej oblasti ich platí  $\mu_r = 0$ .

# magnetizmus – základné fyzikálne veličiny

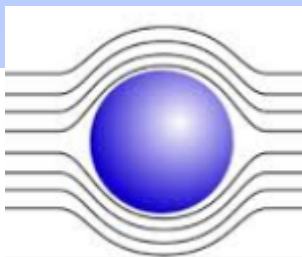
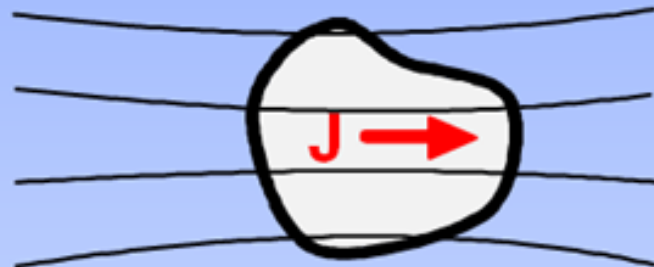
**Magnetic field ( $B_0$ )**



**Diamagnetic**



**Para/Ferromagnetic**



(supravodič)

# magnetizmus – základné fyzikálne veličiny

| Material                   | $\mu_r$          |
|----------------------------|------------------|
| Permalloy <sub>Ni-Fe</sub> | 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 ( $\mu_r \gg 1$ )



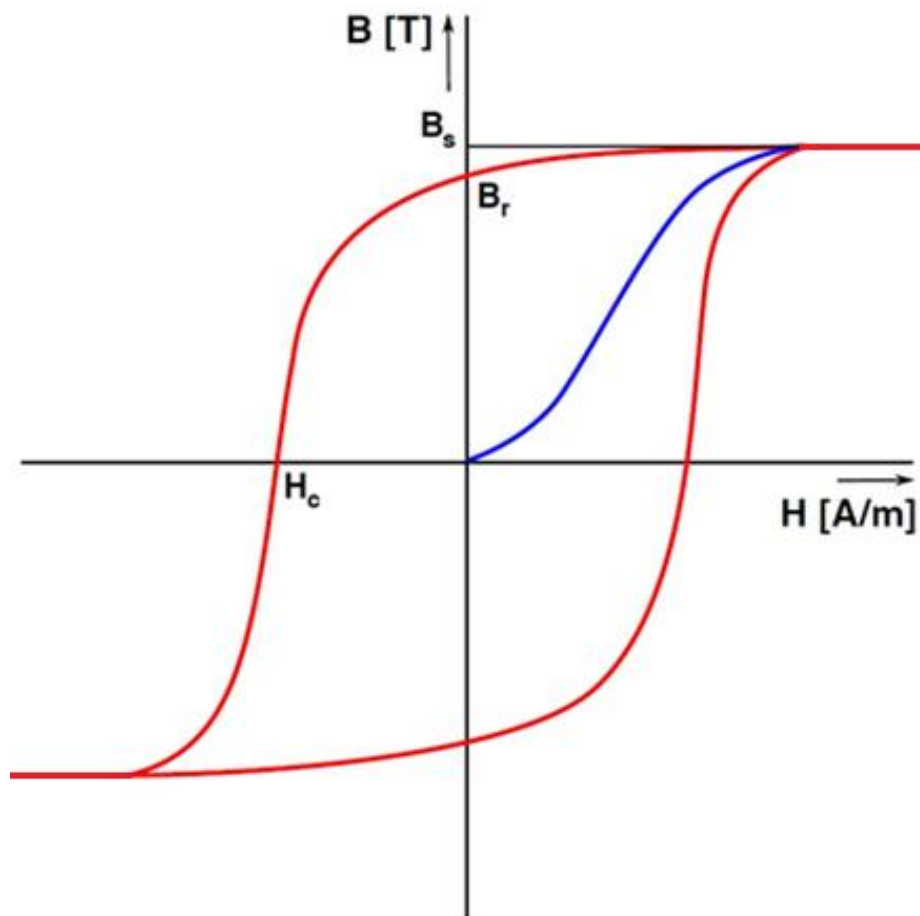
magnetit (trigonálna sústava)



# 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,

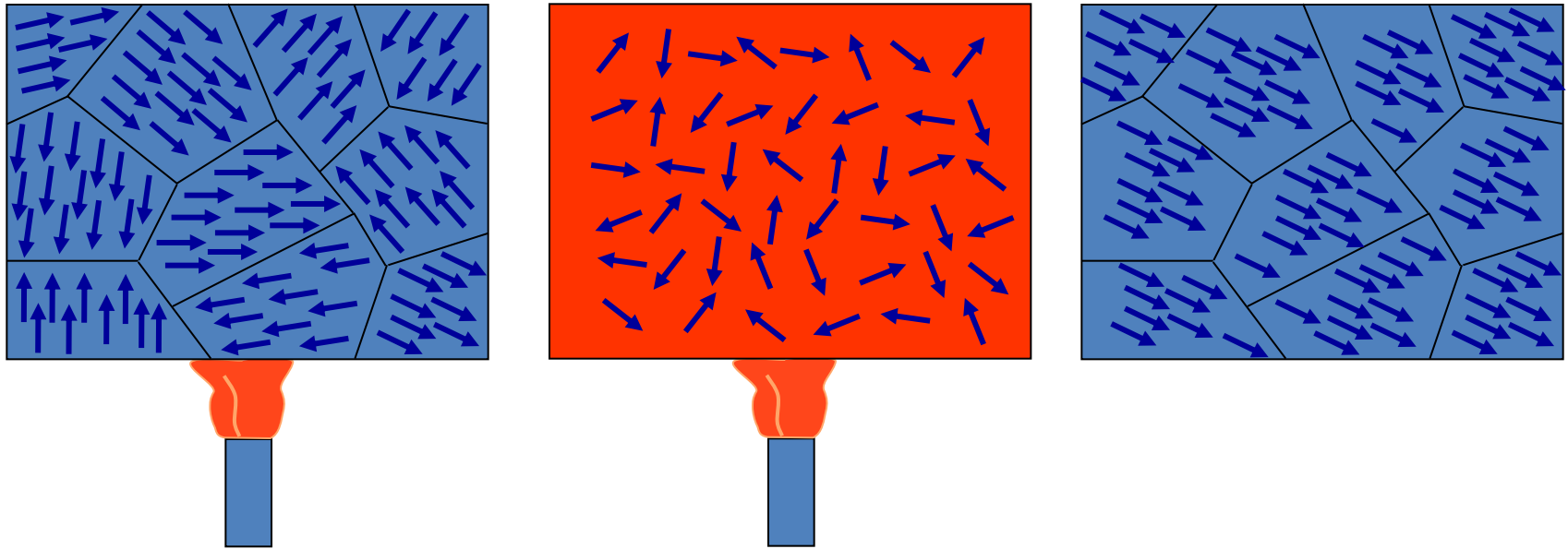
Podľa veľkosti  $H_c$   
delíme  
feromagnetické látky  
na magneticky mäkké  
(malá  $H_c$ ) a tvrdé  
(veľká  $H_c$ )

# magnetizmus – základné fyzikálne veličiny

## feromagnetické látky – Curieho teplota

Pri zohriatí feromagnetickkej látky na určitú teplotu (tzv. **Curieho teplota**, napr. pre železo cca  $770^{\circ}\text{C}$ ) sa látka zmení na paramagnetickú.

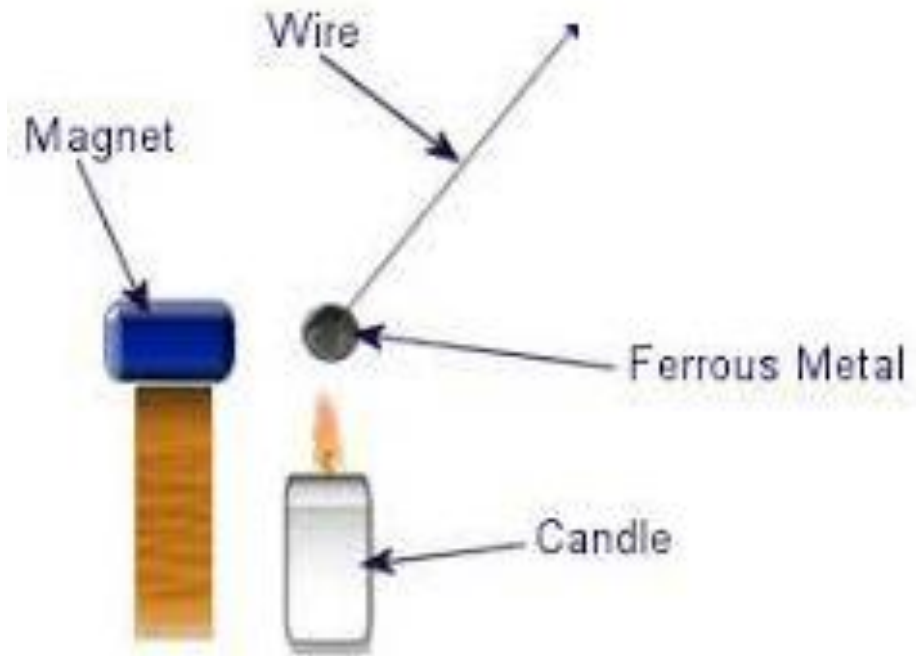
Keď teplota poklesne, látka sa znova stane feromagnetickou a obnoví sa doménové usporiadanie.



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 <sub>2</sub>                                        | 386                   |
| MnAs                                                    | 318                   |
| EuO                                                     | 69                    |
| Iron(III) oxide (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )       | 948                   |
| Iron(II,III) oxide (FeOFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | 858                   |

kovy (materiály)

Pozor hodnoty sú v termodyn. teplote (K).

| Mineral              | Composition                      | Magnetic Order | T <sub>c</sub> (°C) |
|----------------------|----------------------------------|----------------|---------------------|
| <b>Oxides</b>        |                                  |                |                     |
| Magnetite            | Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>   | ferrimagnetic  | 575-585             |
| Ulvospinel           | Fe <sub>2</sub> TiO <sub>2</sub> | AFM            | -153                |
| Hematite             | αFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | canted AFM     | 675                 |
| Ilmenite             | FeTiO <sub>2</sub>               | AFM            | -233                |
| Maghemite            | γFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | ferrimagnetic  | ~600                |
| Jacobsite            | MnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> | ferrimagnetic  | 300                 |
| Trevorite            | NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> | ferrimagnetic  | 585                 |
| Magnesioferrite      | MgFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> | ferrimagnetic  | 440                 |
| <b>Sulfides</b>      |                                  |                |                     |
| Pyrrhotite           | Fe <sub>7</sub> S <sub>8</sub>   | ferrimagnetic  | 320                 |
| Greigite             | Fe <sub>3</sub> S <sub>4</sub>   | ferrimagnetic  | ~333                |
| Troilite             | FeS                              | AFM            | 305                 |
| <b>Oxyhydroxides</b> |                                  |                |                     |
| 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.

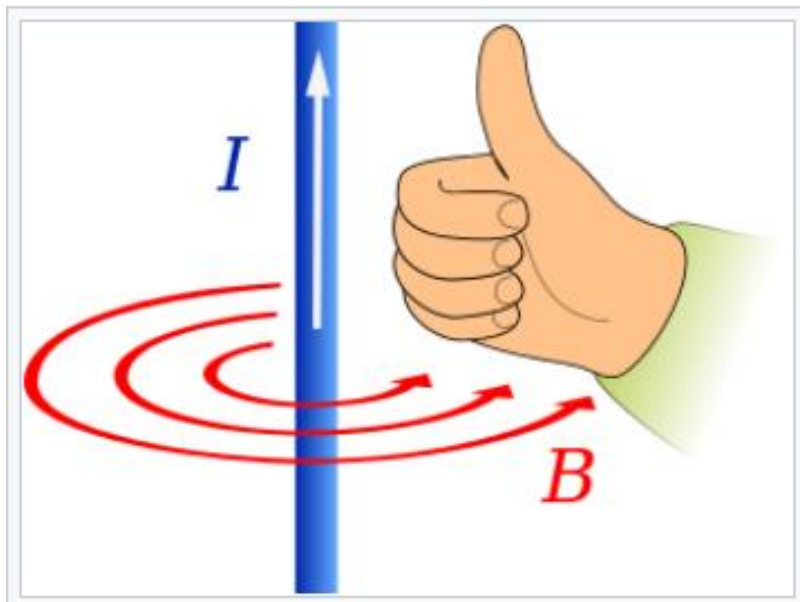
(Ørsted, Henry, Farraday, Ampère, Maxwell a ďalší).

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.

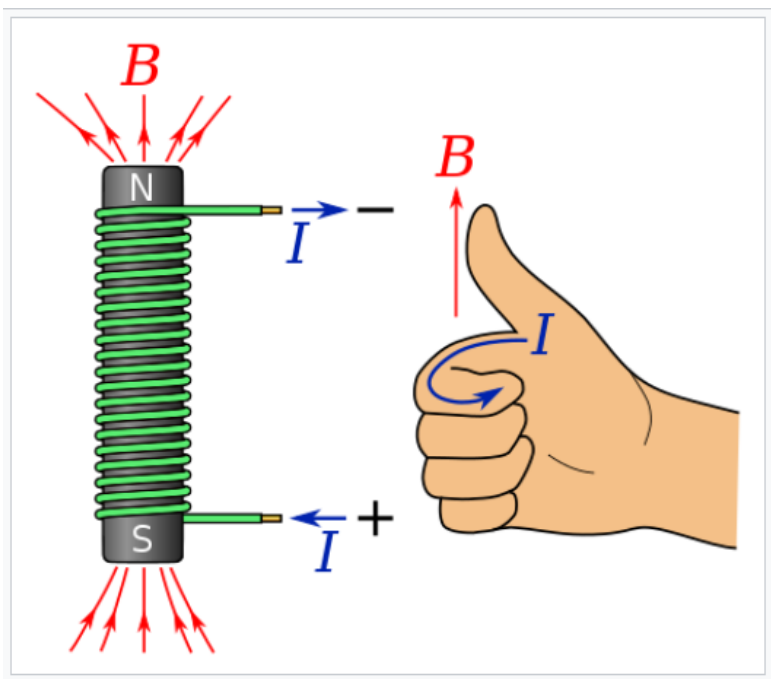
Ak sa nachádzajú vedľa seba viacej paralelných vodičov, tak, celkové pole magnetickej indukcie je dané súčtom ich príspevkov (tzv. sumačný princíp).

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**.

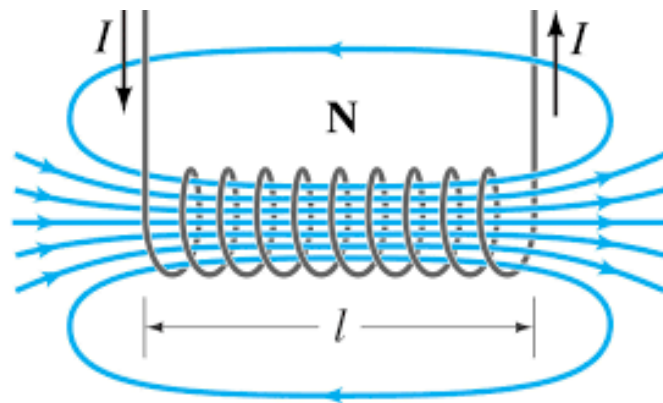
video: <https://www.youtube.com/watch?v=opJYLFvI-RE>

# základy e-magnetizmu – Biot-Savartov zákon

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



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

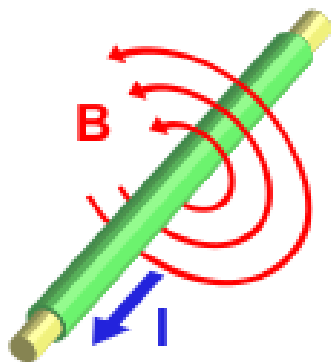


Podiel  $N/\ell$  udáva počet závitov na jednotku dĺžky (tzv. hustota závitov).

# 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.

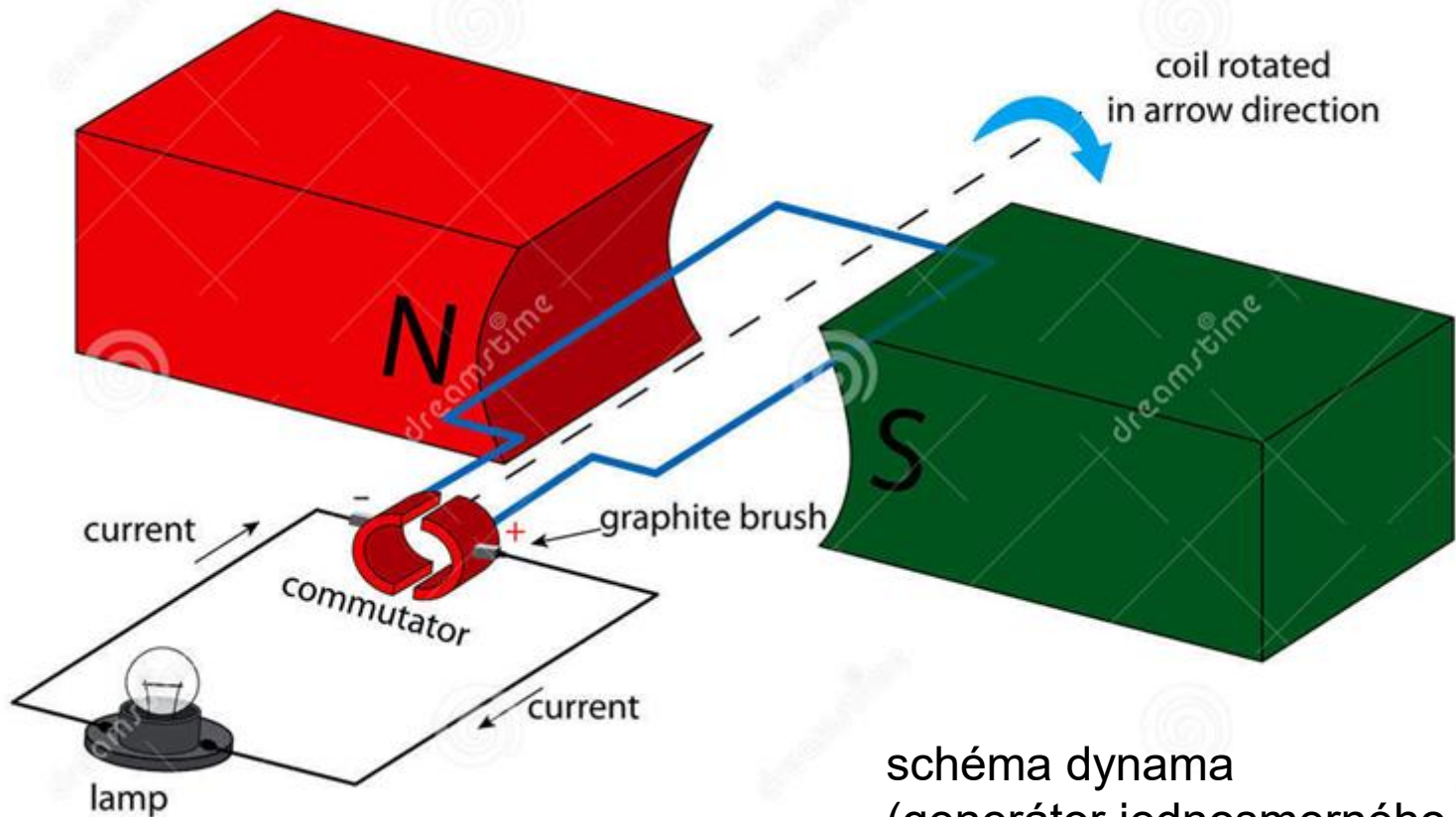
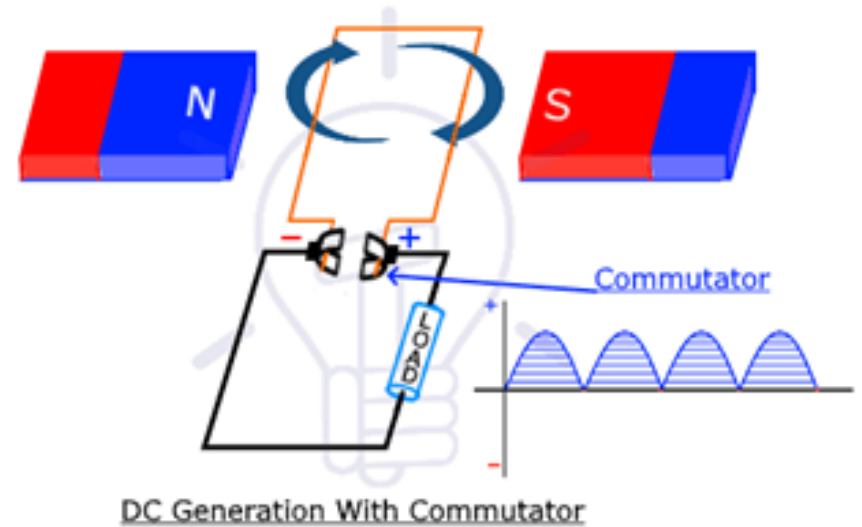
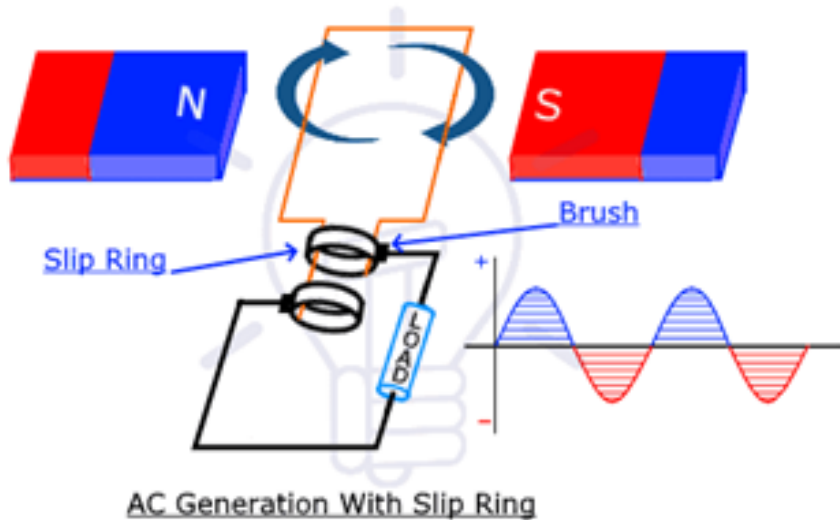


schéma dynama  
(generátor jednosmerného  
prúdu, DC)

# elektromagnetická indukcia

Výroba elektrického prúdu: striedavého (AC) a jednosmerného (DC).



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

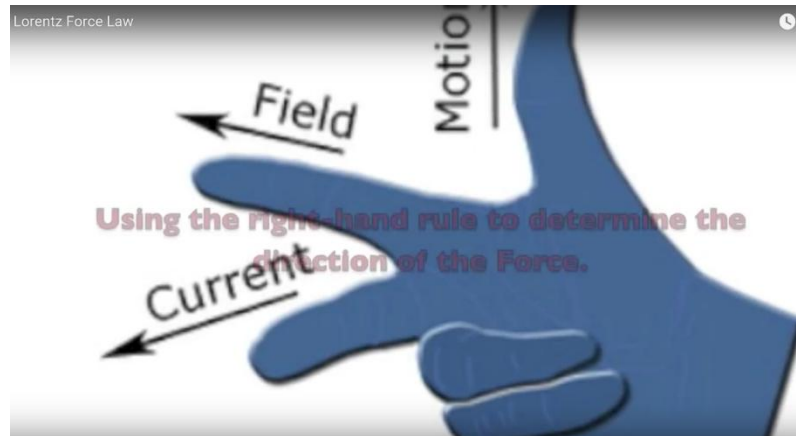
# elektromagnetizmus

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 **B** a týmto vodičom preteká prúd **I**, tak naň pôsobí sila **F**.

pravidlo  
pravej ruky  
pre pochopenie  
pôsobenia  
smerov vektorov



video:

[https://www.youtube.com/watch?v=L9zq\\_fvRuwo](https://www.youtube.com/watch?v=L9zq_fvRuwo)

Pozn.: Vzťah medzi silou **F<sub>M</sub>**, ktorou pôsobí magnetické pole s indukciou **B** na vodič dĺžky  $\ell$ , keď ním preteká prúd **I**:

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

(kde  $\alpha$  je uhol medzi vektorom **B** a vodičom  $\ell$ ).

# elektromagnetizmus

Dôsledkom elektromagnetickej indukcie je aj silové pôsobenie na:

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

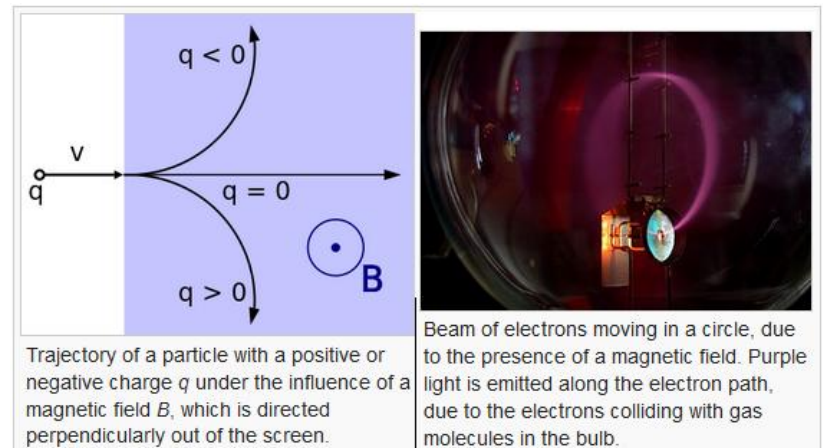
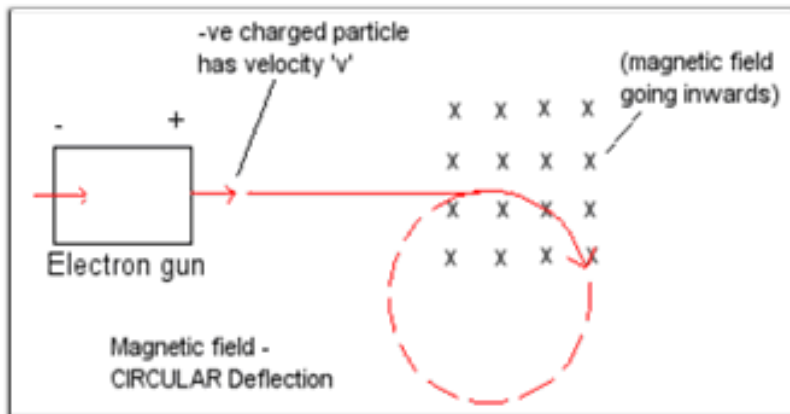
Ak vletí častica s elektrickým nábojom (elektrón, protón, ión) do magnetického poľa kolmo ku indukčným čiaram, magnetické pole na ňu pôsobí silou  $\mathbf{F}_M$ :

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

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

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

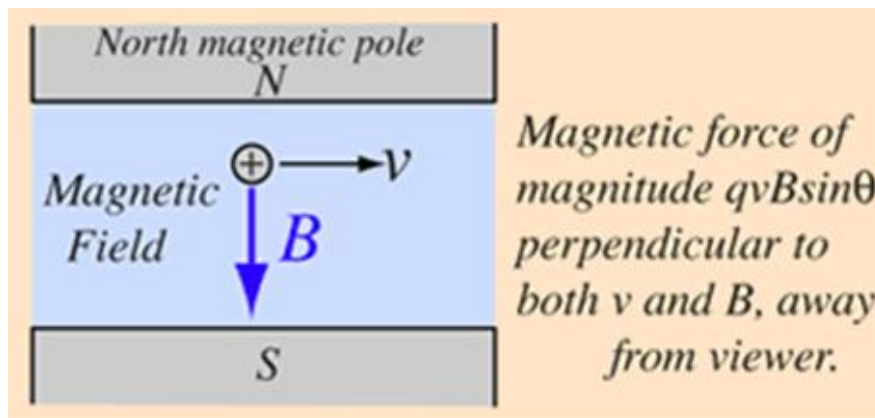
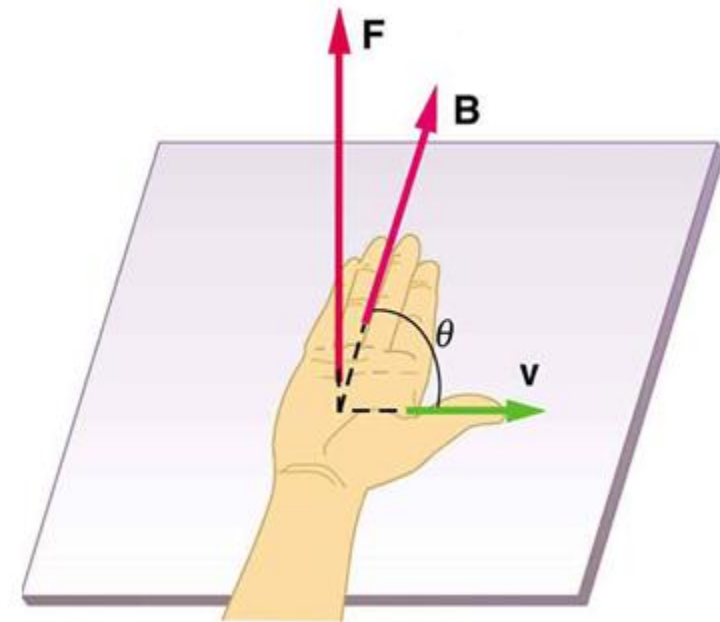
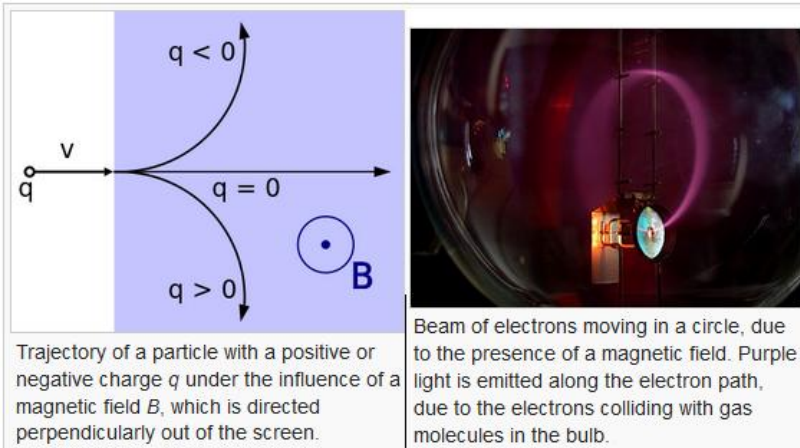
kde  $r$  je polomer kružnice, ktorá je trajektóriou takéhoto pohybu.



# elektromagnetizmus

Dôsledkom elektromagnetickej indukcie je aj silové pôsobenie na:

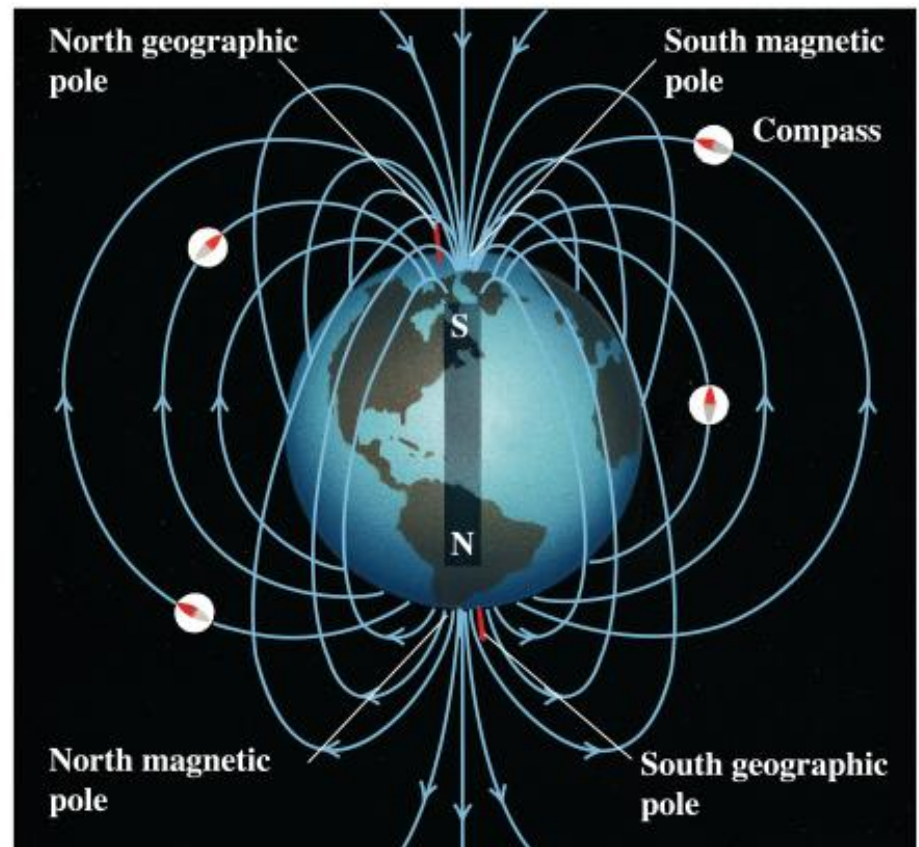
- vodič s jednosm. prúdom v magnetickom poli,
- elektrický náboj, pohybujúci sa v magnetickom poli



# **magnetické pole Zeme a jeho vlastnosti**

# magnetické pole Zeme

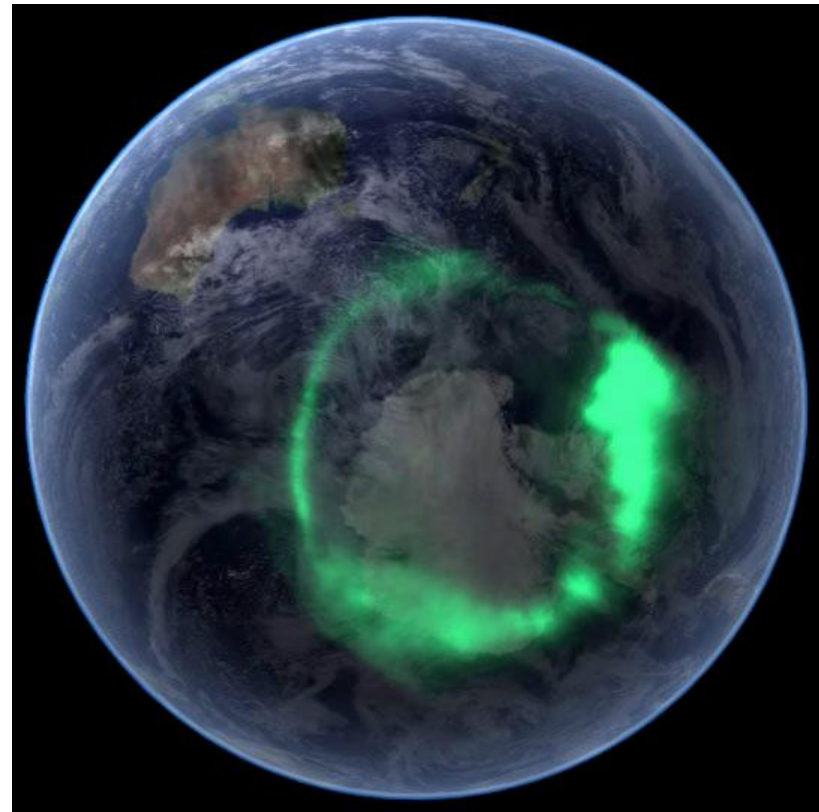
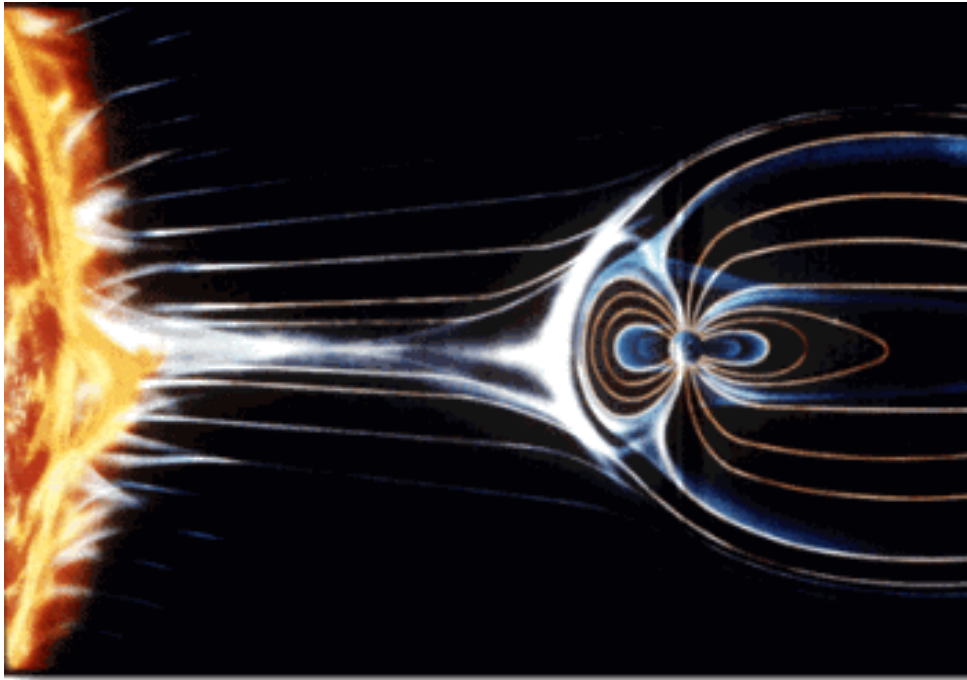
Základom jeho generovania je pohyb vodivých hmôt (elektricky nabitých částíc) vo vonkajšom jadre – tzv. hydromagneto dynamické javy.



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

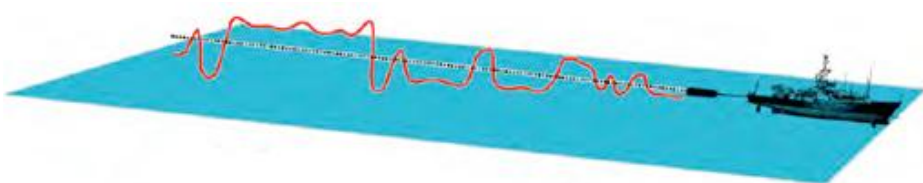
# magnetické pole Zeme

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).

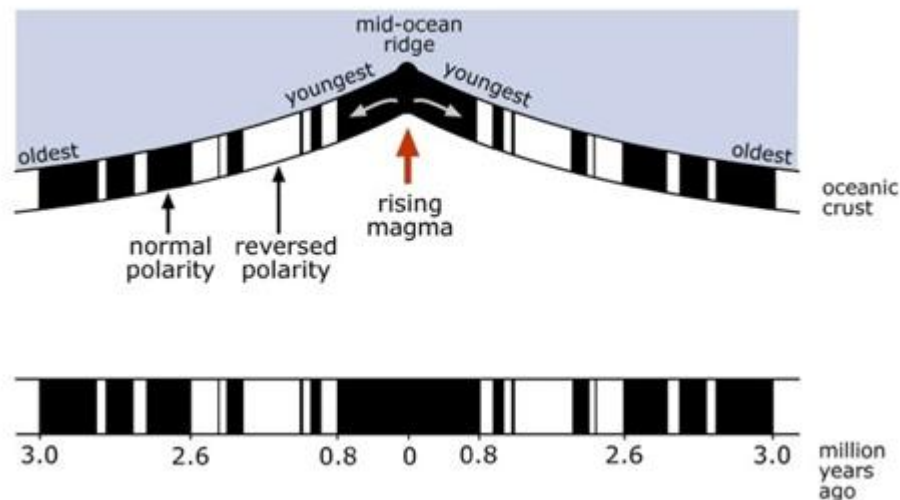
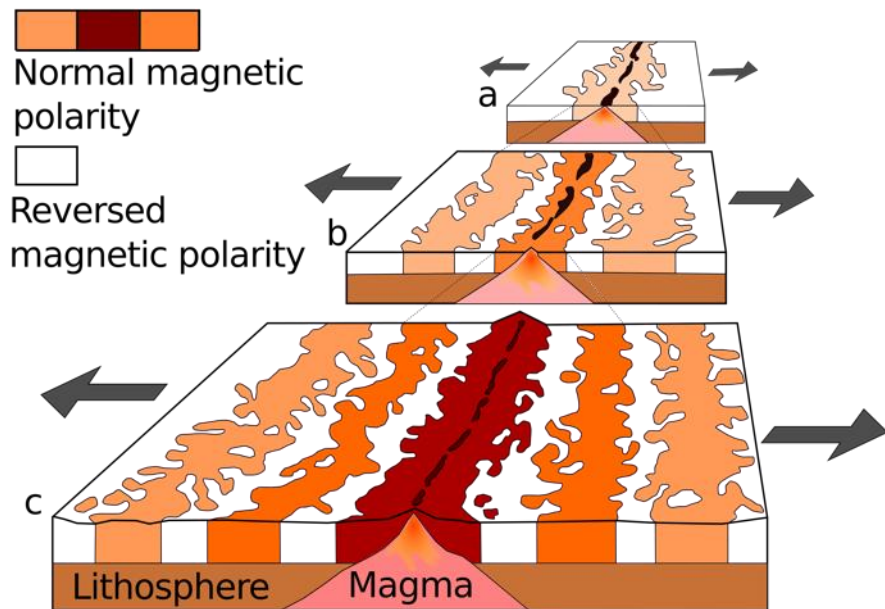
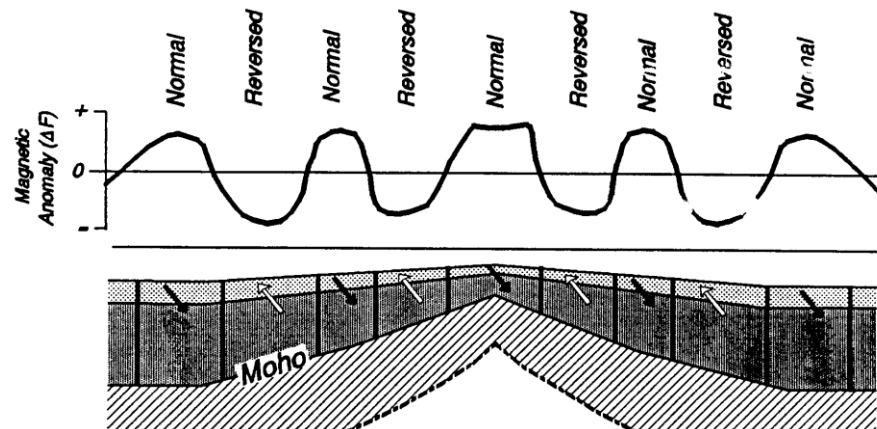


# magnetické pole Zeme

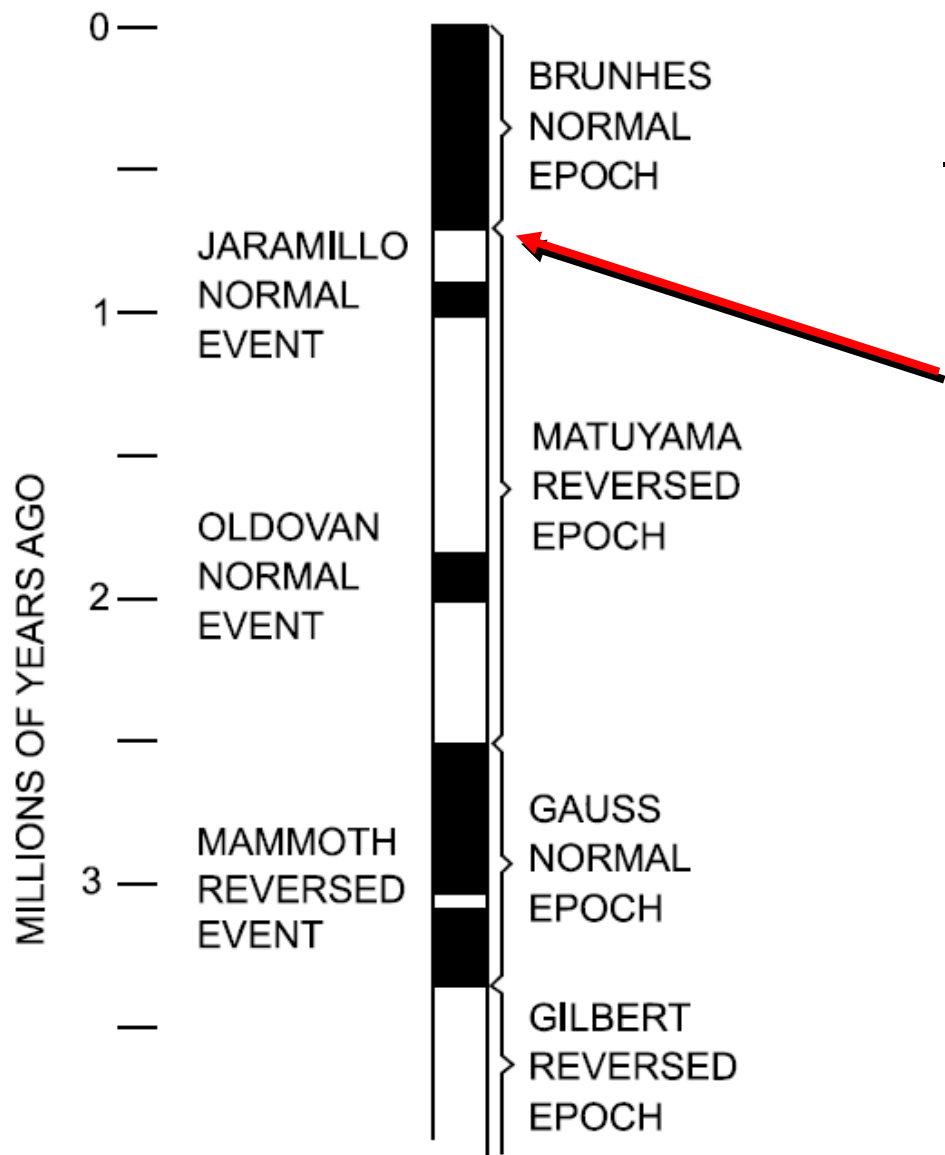
V priebehu historických dôb došlo ku tzv. prepólovaniu magnetických pólů.



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



# 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,

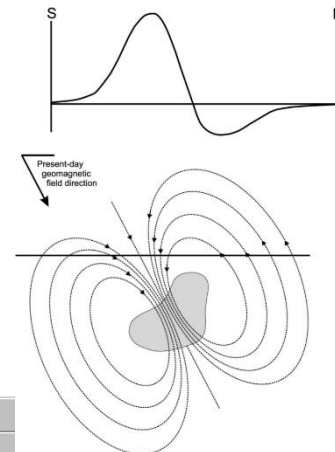
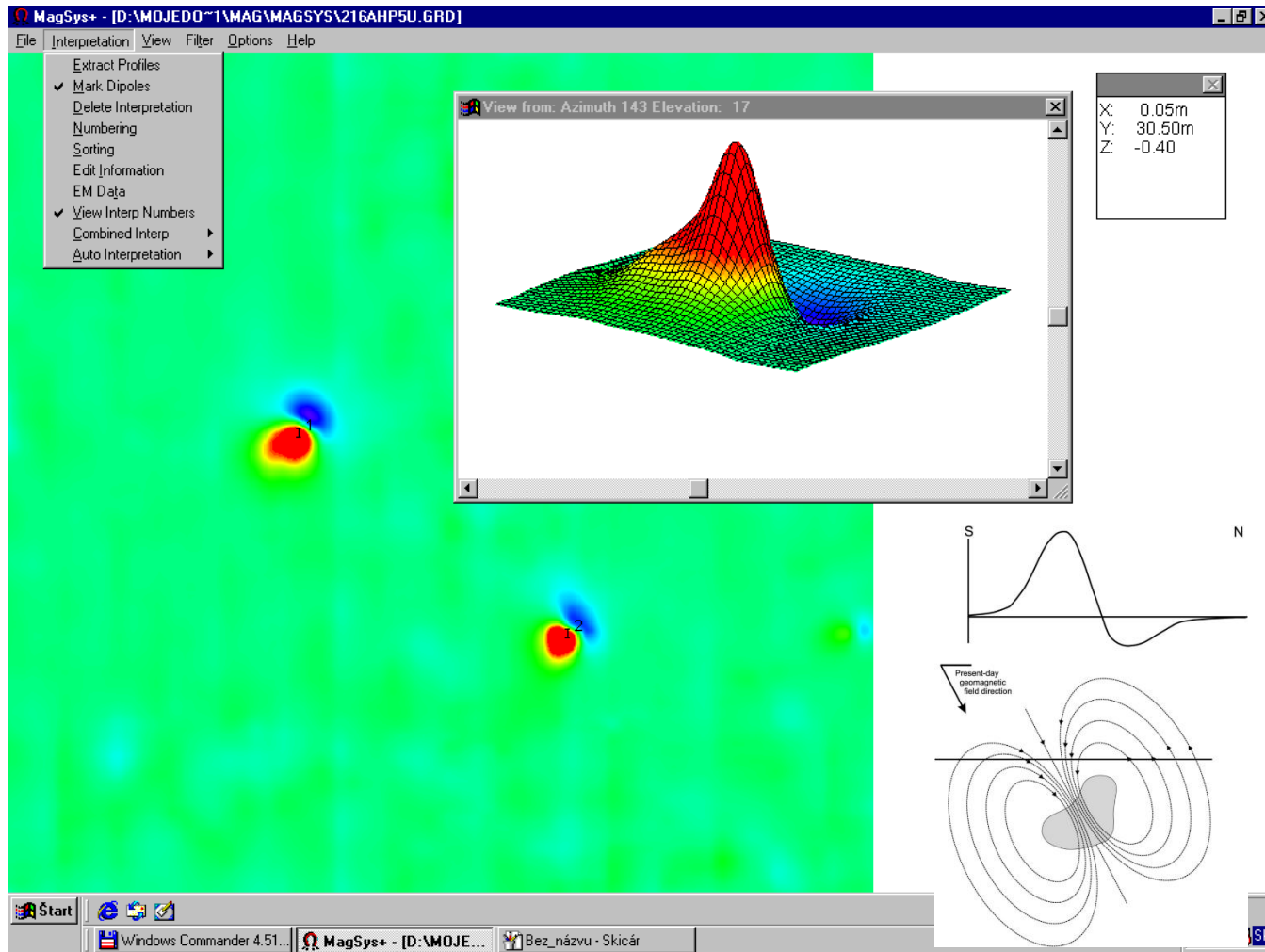
# magnetometria – využitie magnetických vlastností hornín

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

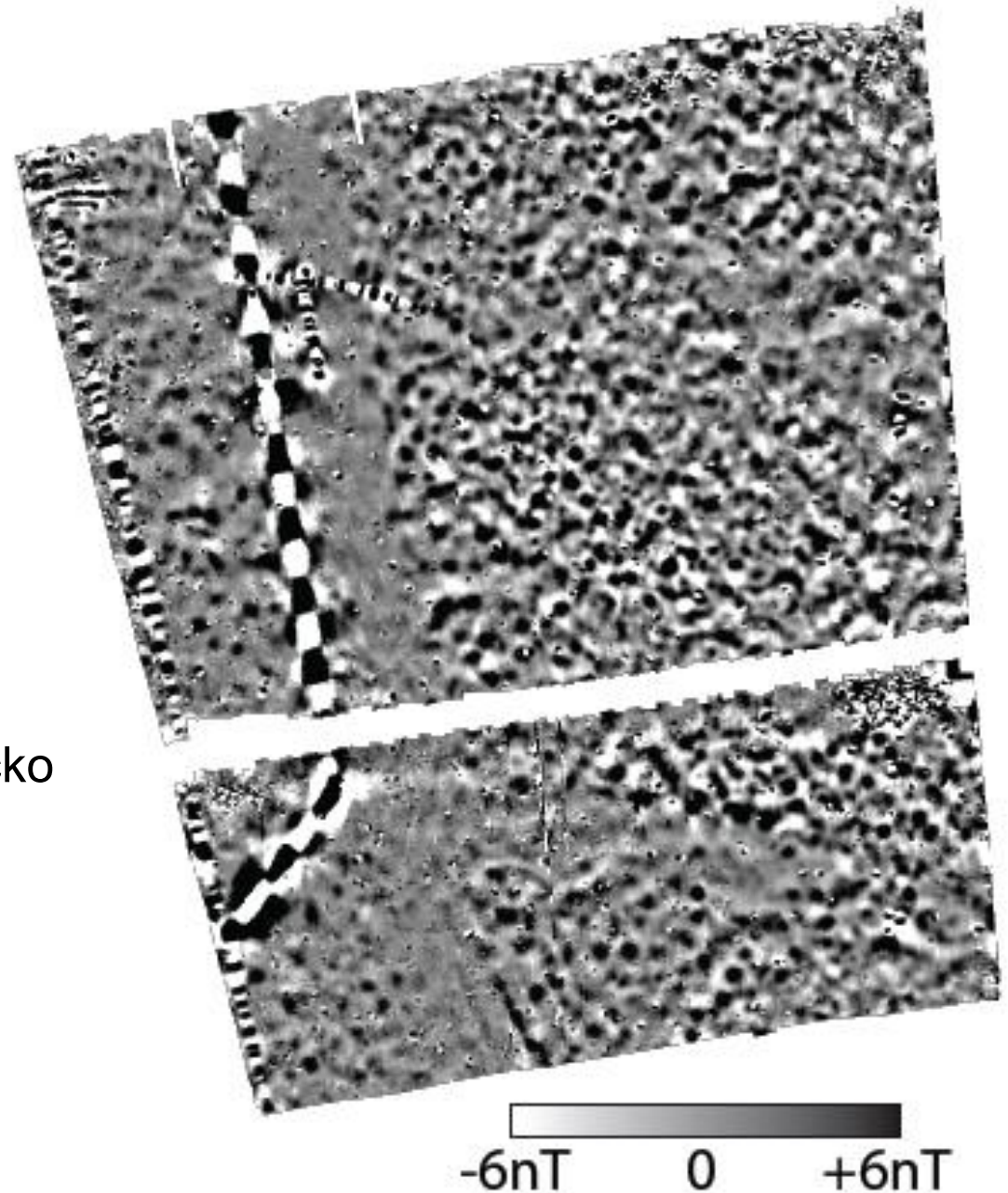


Príklad – typické dipólové anomálie namerané nad objektmi nevybuchnutej munície (železné projektily).

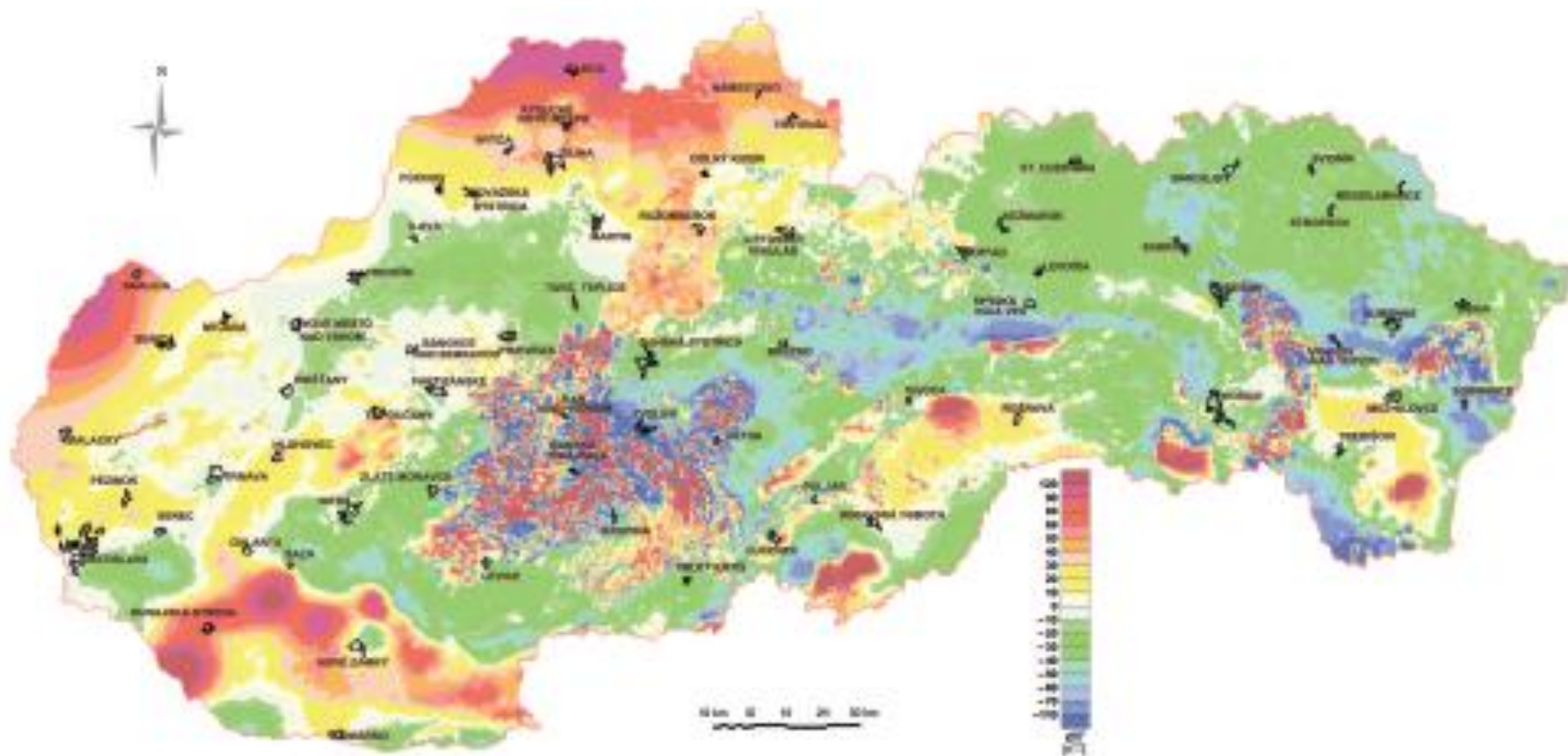
# magnetometria – využitie magnetických vlastností materiálov

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

lokalita: Kiel, severné Nemecko

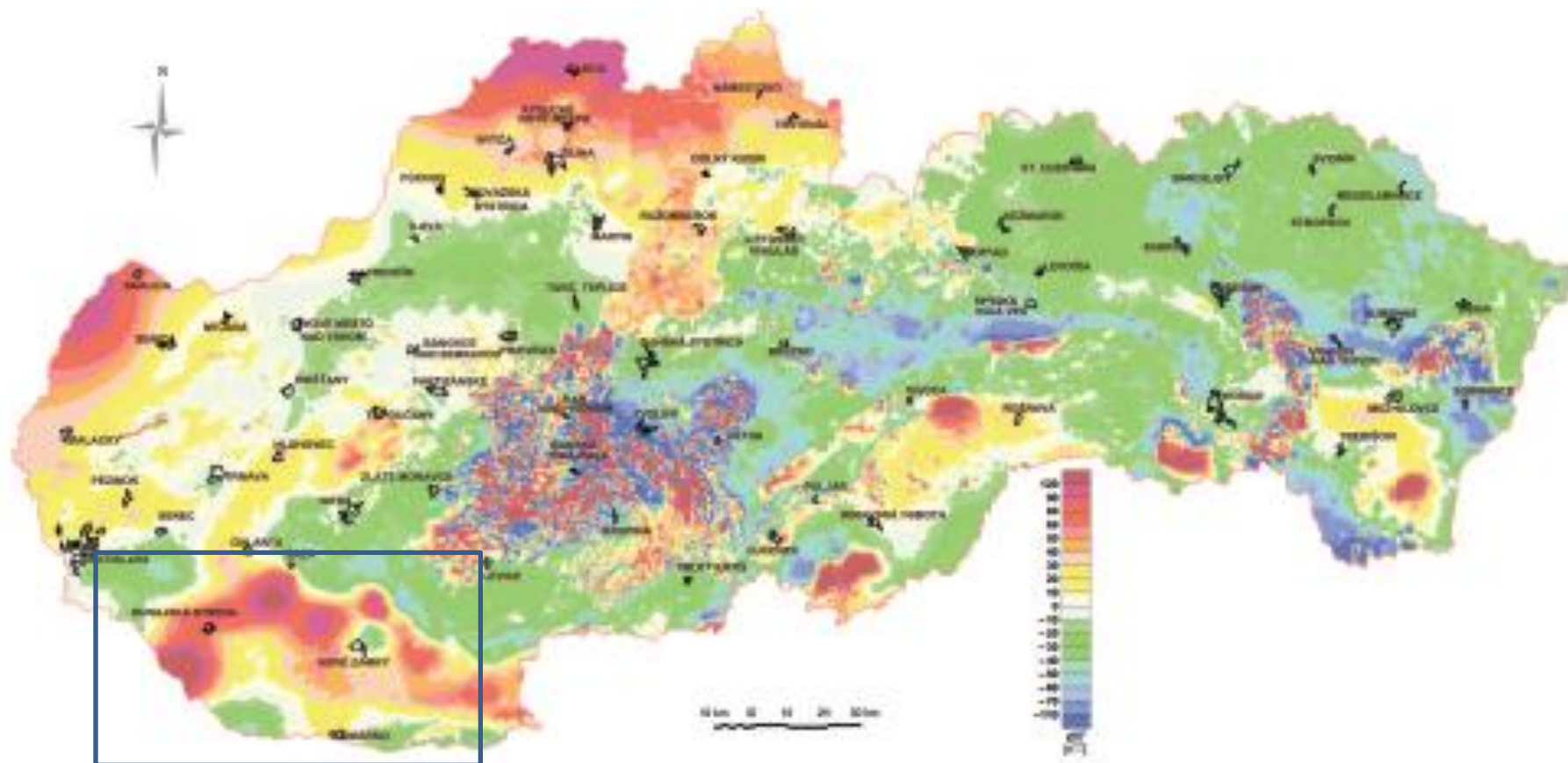


# magnetometria – využitie magnetických vlastností hornín



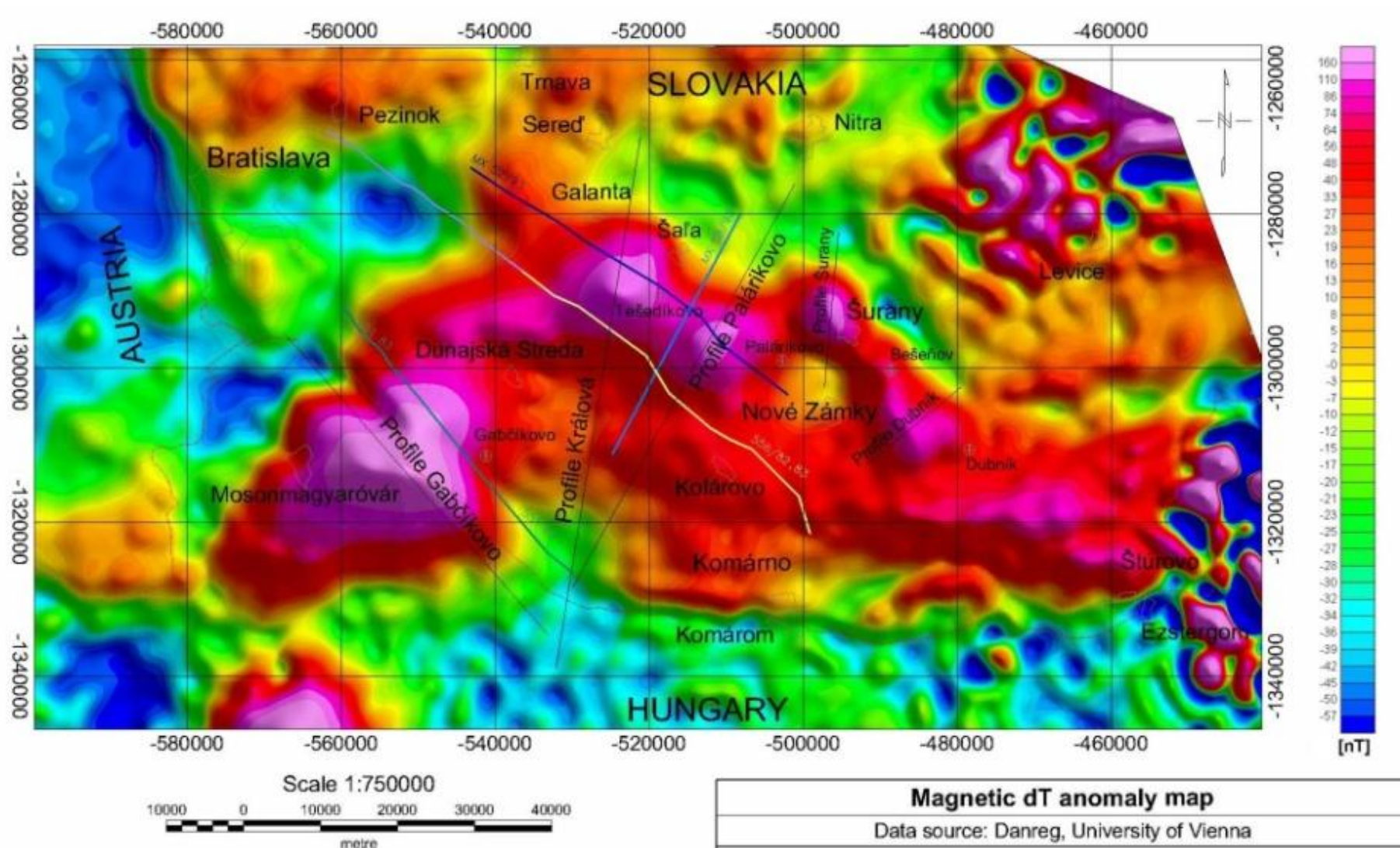
príklad – anomálne magnetické pole (magnetická indukcia) SR

# magnetometria – využitie magnetických vlastností hornín

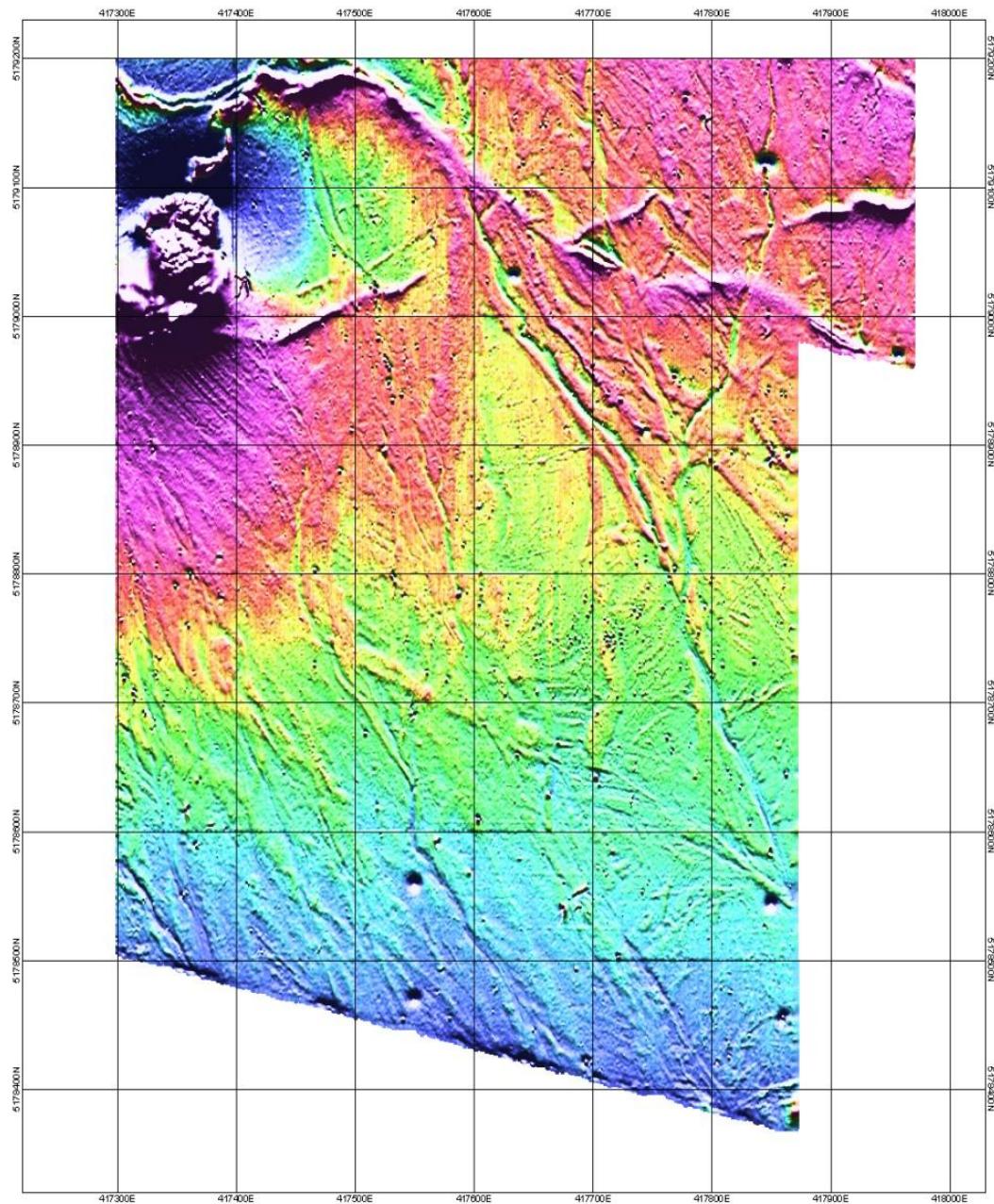


príklad – anomálne magnetické pole (magnetická indukcia) SR –  
- detail v obdĺžniku bude zobrazený na ďalšom snímku

# 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),

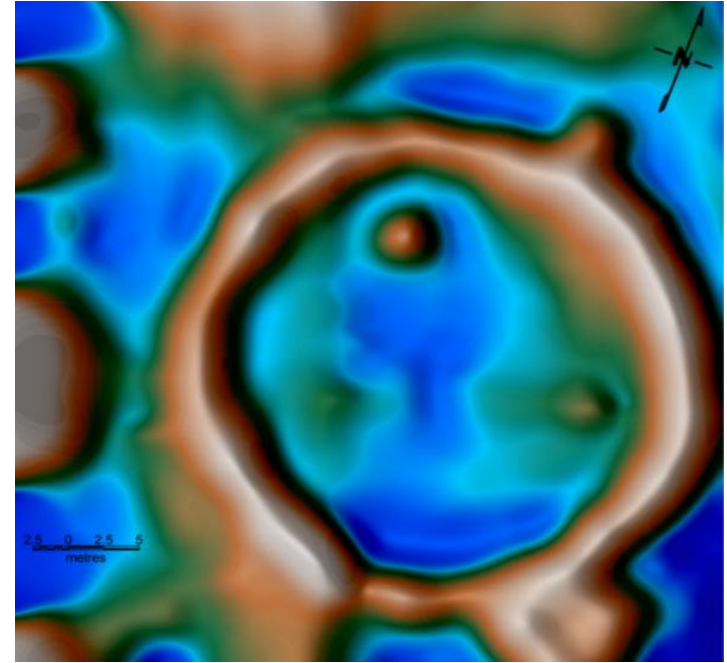
lokalita Chevallier ranch,  
Montana, USA

# magnetometria – využitie magnetických vlastností hornín

letecká snímka – letné obdobie



anomálne magnetické pole



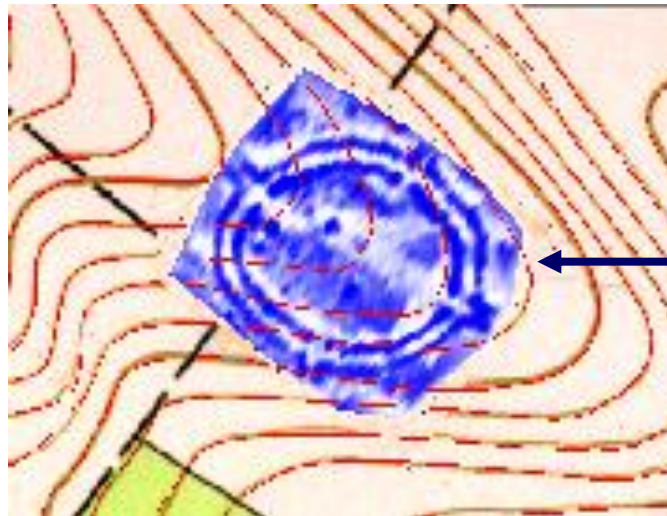
**BRANČ, okr. Nitra, obdobie: doba bronzová – 18. stor. p.n.l.**

# 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).