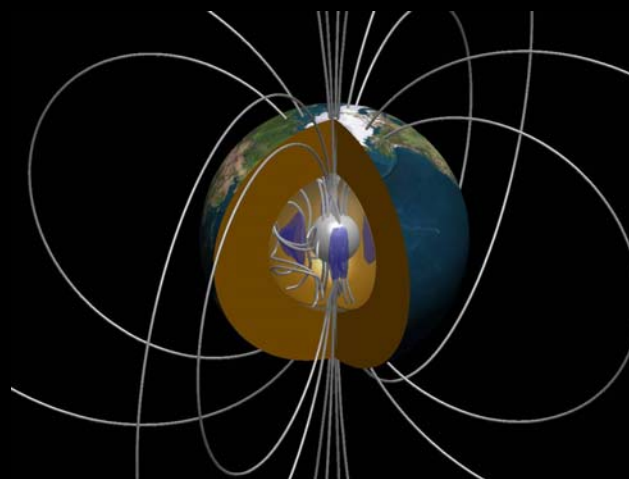


ZEMSKÝ MAGNETISMUS

(stručný přehled)



Martin Chadima

Agico, Brno & Geologický ústav, AV ČR, Praha

Literatura, kontakt a přednášky

- Bucha V. 1975. Geomagnetické pole a jeho přínos k objasnění vývoje Země. Academia, 368 s.
- Krs, M. 1969. Paleomagnetismus. Knihovna ÚÚG, Academia, 208 s.
- Kobr, M. et al. 1997. Petrofyzika. Karolinum, 136 s.
- Gruntorád, J. et al. 1985. Principy metod užitě geofyziky, SNTL
- Mareš, S. et al. 1990. Úvod do užitě geofyziky, SNTL, Praha.
- Lowrie, W. 1997. Fundamentals of Geophysics. Cambridge University Press, 354 s.
- Lanza, R., Meloni, A. 2006. The Earth's Magnetism: An Introduction for Geologist. Springer, 278 s.
- Butler, R. F. 1992. Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geological Terranes. Blackwell Scientific Publications, 319 s.
<http://www.geo.arizona.edu/Paleomag/book/>
- Tauxe, L. 2007. Lectures in Paleomagnetism.
<http://magician.ucsd.edu/~ltauxe/LecturesInPaleomag/index.html>

Martin Chadima (chadima@sci.muni.cz)
AGICO, s.r.o., Brno & Geologický ústav AV ČR, Praha
<http://www.sci.muni.cz/~chadima/geomagnetismus/>

Osnova

- Historický úvod
 - kompas a navigace
 - teorie elektromagnetického pole
 - geomagnetická měření
- Magnetické pole Země
 - hlavní
 - zbytkové
 - externí
- Původ magnetického pole (Geodynamo)
- Inverze magnetického pole
- Měření zemského magnetismu

Historický úvod – kompas a navigace



Historický úvod – kompas a navigace

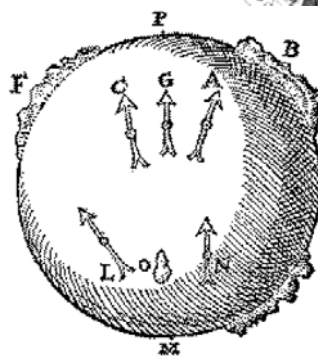
- Antika – staří Řekové pozorovali schopnost magnetovce přitahovat železo (*Magnesia* – řecké město v Malé Asii, blízká naleziště magnetovce)
- 1000 – v Číně vynalezen kompas (magnetovec na plováku v nádobě)
- 12. stol. – kompas pronikl do Evropy
- 13. stol. – využití kompasu v námořní navigaci (V. da Gama, K. Kolumbus, F. Magellan)
- 1544 – **Georg Hartmann** pozoroval iklinaci; byla pozorována i deklinace (kalibrace kompasu pro různá moře)
- 1600 – **William Gilbert** (1600) *De Magnete*
O magnetu, magnetických tělesech a o velkém magnetu Zemi
(*Tractatus sive Physiologia Nova De Magnete, Magneticisque Corporibus et de Magno Magnete Tellure*)
- 1702 – **Edmond Halley**

Historický úvod – kompas a navigace

William Gilbert (1544-1603)

De Magnete

- shrnul předchozí pozorování iklinace a deklinace
- zkoumal permanentní magnetizaci
- demonstroval vlastnosti geomagnetického pole na zmagnetované kouli
- deklinaci vysvětloval nerovnoměrným rozložením hmoty



Historický úvod – kompas a navigace

Edmond Halley (1656-1742)

- na základě vlastních i převzatých měření sestavil mapy deklinací (první použití izochar k zobrazení fyzikálních měření)
- zkoumal severní polární záři
- pozoroval pohyb deviací magnetického pole směrem na západ (Westward drift)



Historický úvod – teorie elektromagnetického pole

- 1777 – **Charles Coulomb** sestrojil torzní váhy; ukázal, že intenzita pole permanentního magnetu klesá se třetí mocninou vzdálenosti
- 1820 – **Hans Christian Ørsted** pozoroval ovlivnění magnetické stříčky elektrickým proudem
- 1820 – **André-Marie Ampère** vysvětlil magnetické pole jako projev elektrického proudu
- 1831 – **Michael Faraday** objevil jev elektromagnetické indukce, vznik elektrického proudu ve vodiči vyvolaný změnou magnetického pole
- 1864 – **James Clerk Maxwell** sjednotil popis elektrického a magnetického pole

Historický úvod – geomagnetická měření

•1832-7 – **Carl Friedrich Gauss** a **Wilhelm Eduard Weber** rozvinuli měření intenzity geomagnetického pole s nazávislou kalibrací přístrojů; propagovali rozvoj celosvětové sítě měření

•1839 – popis geomagnetického pole pomocí kulových harmonických funkcí

•1769-1859 – **Alexander von Humboldt** inspiroval Gausse k výzkumu geomagnetického pole a významně se angažoval v organizaci celosvětové sítě observatoří

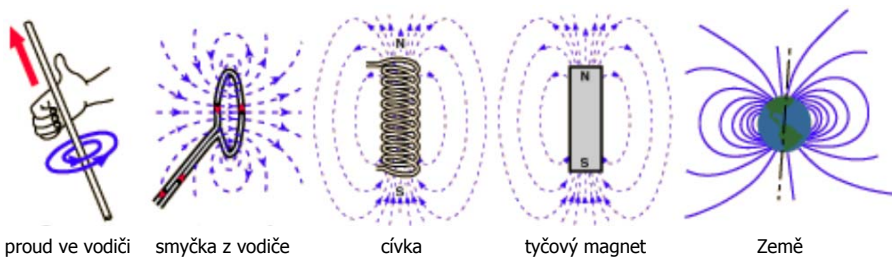
•1798-1804 „velká jihoamerická cesta“

„...objev klesající magnetické síly od pólů k rovníku považuji za nejdůležitější na mé americké cestě...“

Relation Historique du Voyage aux Régions Équinoxiales du Nouveau Continent

Magnetické pole Země

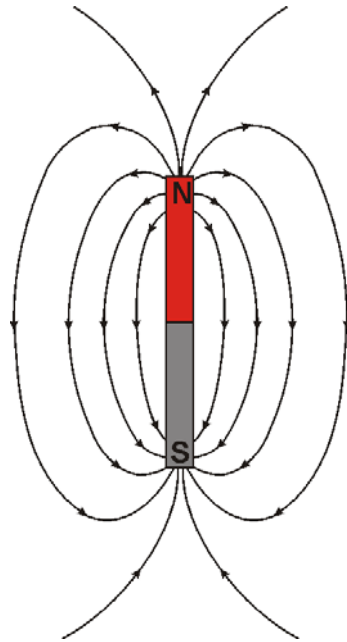
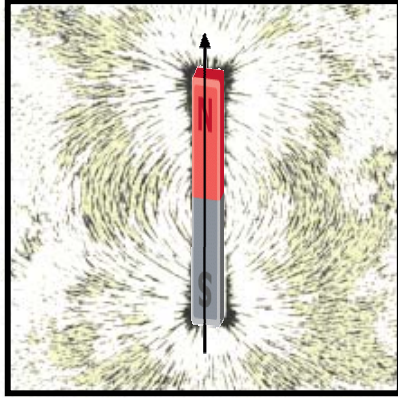
Zdroje magnetického pole



Každé magnetizující pole (H) produkuje magnetický tok popsaný siločarami magnetického pole. Hustota magnetického toku se nazývá magnetickou indukcí (B resp. T)

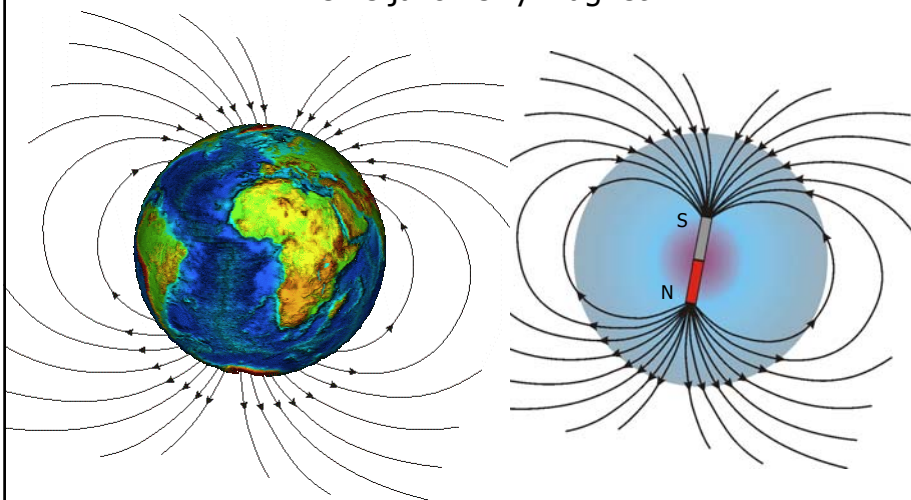
Magnetické pole Země

Magnetický dipól



Magnetické pole Země

Země jako velký magnet



Magnetické pole Země



Magnetické pole Země

- Magnetické pole Země lze matematicky popsat **magnetickým potenciálem** (U , V , ψ)
- **Intenzita magnetického pole** (nebo **magnetická indukce**) v libovolném místě pak odpovídá gradientu potenciálu
- Stupeň namagnetování látky v magnetickém poli popisuje magnetizace

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_i + \mathbf{M}_r \text{ [A/m]}$$

indukovaná magnetizace

remanentní magnetizace

$$\mathbf{M}_i = k \mathbf{H}$$

magnetická susceptibilita

Sférická harmonická analýza (SHA)

Potenciál magnetického pole lze vyjádřit jako:

$$\psi = \frac{a}{\mu_0} \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=0}^l \left(\frac{a}{r}\right)^{i+1} P_l^m(\cos \theta) (g_l^m \cos m\phi + h_l^m \sin m\phi)$$

↖ vzdálenost od středu Země
 ↖ Legendrový funkce kolatitudy
 ↖ Fourierův rozvoj zem. délky

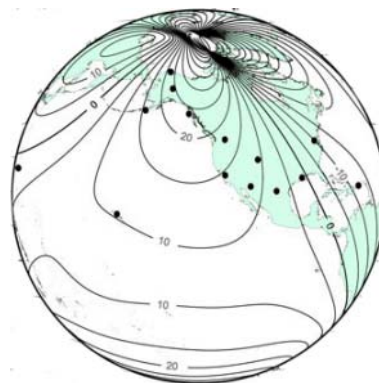
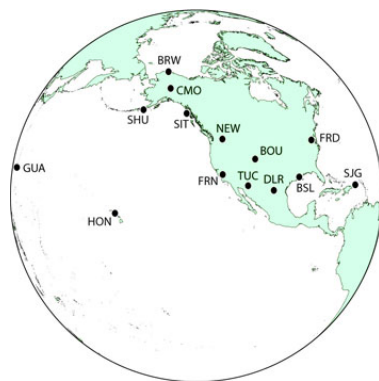
- a – střední poloměr Země (6371 km)
- r, ϕ, θ – sférické koordináty
 - (r – vzdálenost od středu Země, ϕ – zeměpisná délka, θ – kolatituda ($90^\circ - \phi$))
- μ_0 – permeabilita vakua



Carl Friedrich Gauss
1839



Praktické provedení SHA

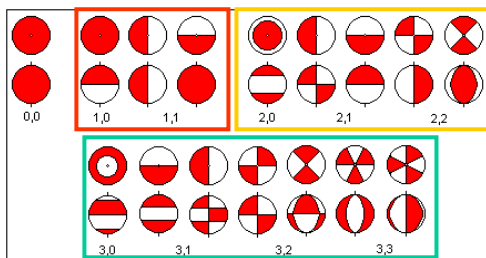


Gaussovy koeficienty SHA

International Geomagnetic Reference Field, 2000 from Olsen et al. (2000)

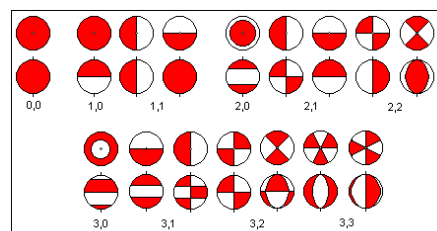
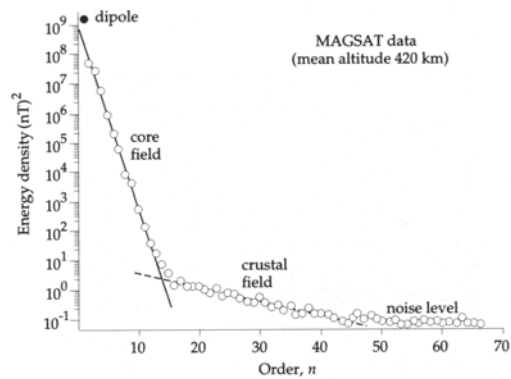
Dipól
Kvadrupól
Oktupól

l	m	g (nT)	h (nT)	l	m	g (nT)	h (nT)
1	0	-29614.72	0	5	0	-216.82	0
1	1	-1727.74	5186.27	5	1	350.96	43.69
2	0	-2267.11	0	5	2	222.36	171.65
2	1	3071.78	-2477.69	5	3	-130.72	-133.88
2	2	1672.18	-457.63	5	4	-168.53	-40.26
3	0	1340.85	0	5	5	-11.83	106.79
3	1	-2289.53	-226.99	6	0	72.34	0
3	2	1252.52	296.26	6	1	67.76	-17.09
3	3	715.1	-492.28	6	2	73.98	63.84
4	0	935.35	0	6	3	-161.06	65.19
4	1	786.71	271.92	6	4	-5.13	-61.34
4	2	250.81	-231.63	6	5	17.03	1.33
4	3	-404.66	118.54	6	6	-90.53	44.11
4	4	109.91	-303.88				



Spherical Harmonics, Nodal Surfaces $n = 0,1,2,3$

Gaussovy koeficienty SHA



Spherical Harmonics, Nodal Surfaces $n = 0,1,2,3$

Magnetické pole Země

Zdroje magnetického pole Země

Interní

- Hlavní, normální pole (Main, Core field)
 - generováno v zemském jádru
- Zbytkové, anomální pole (Crustal field)
 - generováno magnetickými horninami v zemské kůře

Externí

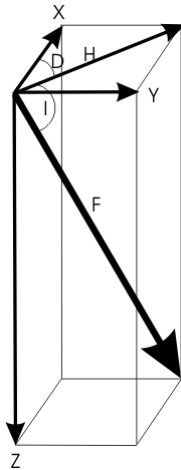
- Sekundární magnetické pole
 - způsobené elektromagnetickou indukcí elektrických proudů, které vzniknou v elektricky vodivé kůře a plášti působením externího magnetického pole
- Externí pole
 - způsobené elektrickými proudy v ionosféře a magnetosféře, které vznikají interakcí částic slunečního větru s magnetickým polem Země

Magnetické pole Země

Variace magnetického pole v čase

- Dlouhodobé (sekulární variace)
 - Detekovány v intervalech delších než 5-10 let
 - Způsobeno vývojem v zemském jádru
 - Vývoj zdroje Hlavního vnitřního pole
- Krátkodobé
 - Detekovány v intervalech zlomků vteřin až několika let
 - Externí původ
 - Magnetické bouře spojené se sluneční aktivitou

Magnetické pole na zemském povrchu



Magnetizace je vektorová veličina, popsána intenzitou a směrem:

F – celková intenzita vektoru magnetického pole

H – horizontální složka vektoru magnetického pole

Z – vertikální složka vektoru magnetického pole

X – složka vektoru ve směru k severu

Y – složka vektoru ve směru k východu

D – magnetická deklinace, definována jako úhel mezi směrem k severu a horizontální komponentou měřenou po směru hodinových ručiček

I – magnetická inklinace, definována jako úhel měřený od horizontály, směrem dolů nabývá pozitivních hodnot

D and I se měří ve stupních, ostatní složky v nanotesla (nT; 1 nT = 10⁻⁹ Tesla).

$$D = \tan^{-1}(Y/X) \quad X = H \cos(D)$$

$$I = \tan^{-1}(Z/H) \quad Y = H \sin(D)$$

$$H = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$$

Magnetické pole na zemském povrchu

Magnetické pole Země je blízké geocentrickému dipólu

Česko

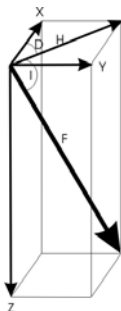
F = 47 000 nT

Z = 43 000 nT

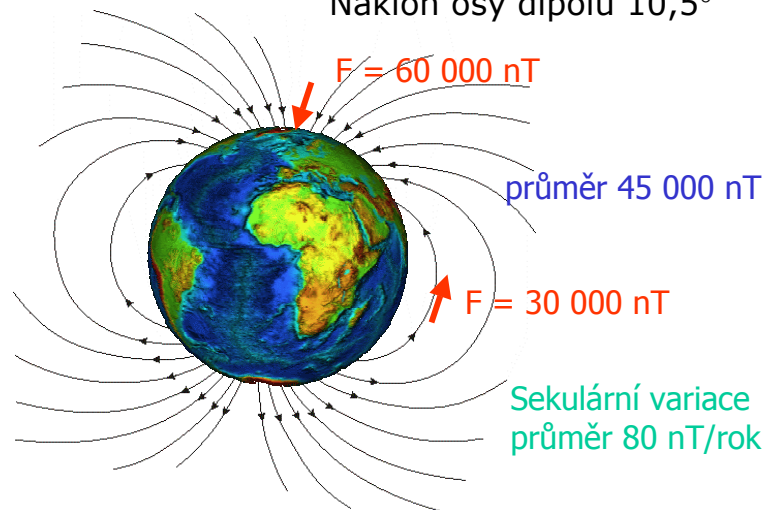
H = 20 000 nT

D = 0°

I = 65°



Náklon osy dipólu 10,5°



Modely magnetického pole Země

International Geomagnetic Reference Field (IGRF) 10th Generation Model

International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA) vydala poslední verzi standardního matematického popisu hlavního zemského magnetického pole
Použití při studiu zemského nitra, kůry, ionosféry a magnetosféry.
Koeficienty až do stupně 13.

World Magnetic Model (WMM)

WMM2005

World Magnetic Model je produktem U.S. National Geophysical Data Center (NGDC) a British Geological Survey (BGS).

WMM se skládá z koeficientů SHA až do 12 stupně (tj. Generováno v jádru), tzn. zahrnuje 168 Gaussových koeficientů.

Použití v navigaci a obraně.

Canadian Geomagnetic Reference Field (CGRF)

On-line kalkulátory magnetického pole



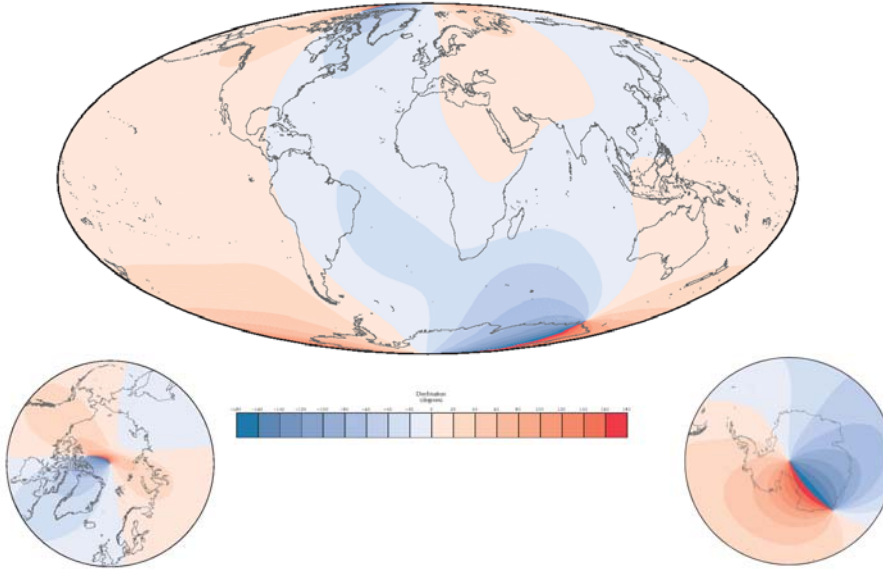
<http://www.ngdc.noaa.gov/geomagmodels/IGRFWMM.jsp>



http://www.geomag.bgs.ac.uk/qifs/igrf_form.shtml

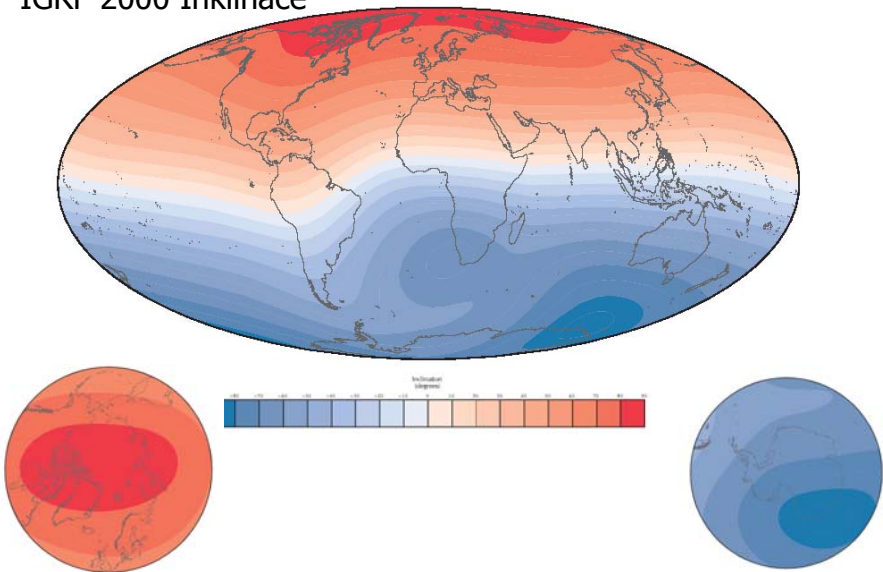
Hlavní pole

IGRF 2000 Deklinace



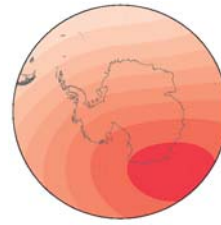
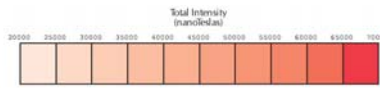
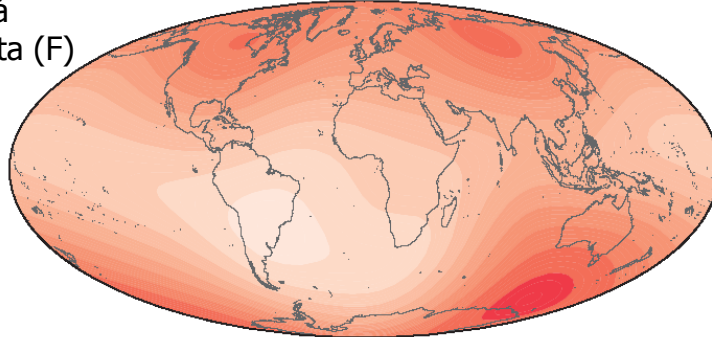
Hlavní pole

IGRF 2000 Inklinace

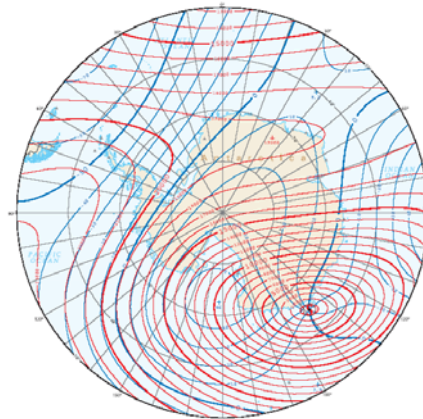
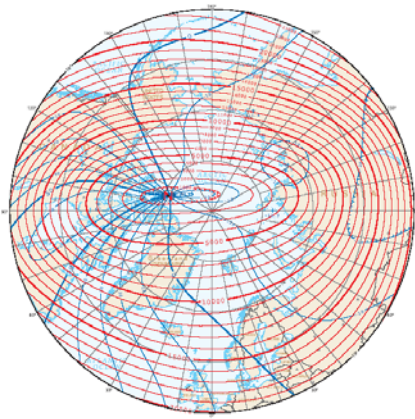


Hlavní pole

IGRF 2000
celková
intenzita (F)



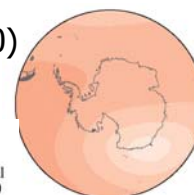
Hlavní pole



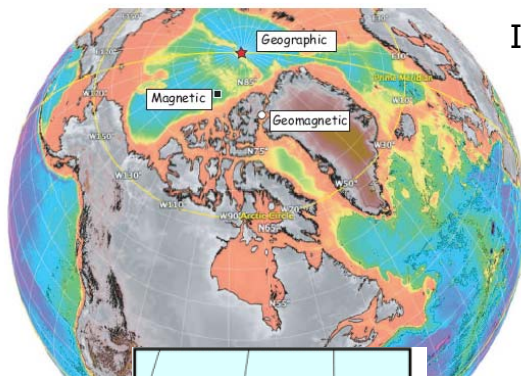
IGRF 2000 magnetické póly (H=0)



North and south magnetic poles. Magnetic poles are defined as the locations at which the horizontal magnetic intensity, computed from the degree and order ten spherical harmonic International Geomagnetic Reference Field 2000 model, is effectively zero at 2000.0.



Hlavní pole



IGRF 2000 Severní pól(y)

•**Severní magnetický pól** – místo, kde magnetické pole směřuje kolmo k Zemi, intenzita horizontální složky je rovna nule. Pól se stále pohybuje.

Year	Latitude (°N)	Longitude (°W)
2001	81.3	110.8
2002	81.6	111.6
2003	82.0	112.4
2004	82.3	113.4
2005	82.7	114.4

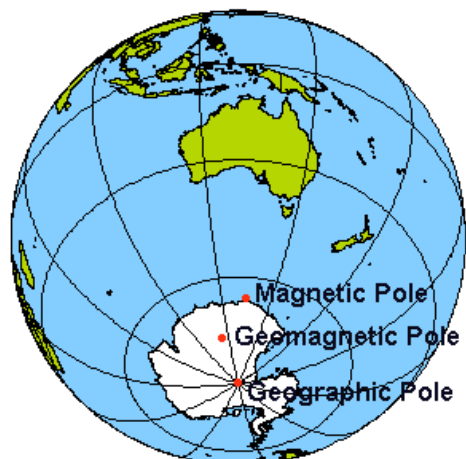
•**Severní geomagnetický pól** – místo, kde zemský povrch protíná osa dipólu. V roce byla jeho poloha přibližně 79.74° N 71.78° W



Denní variace polohy pólu

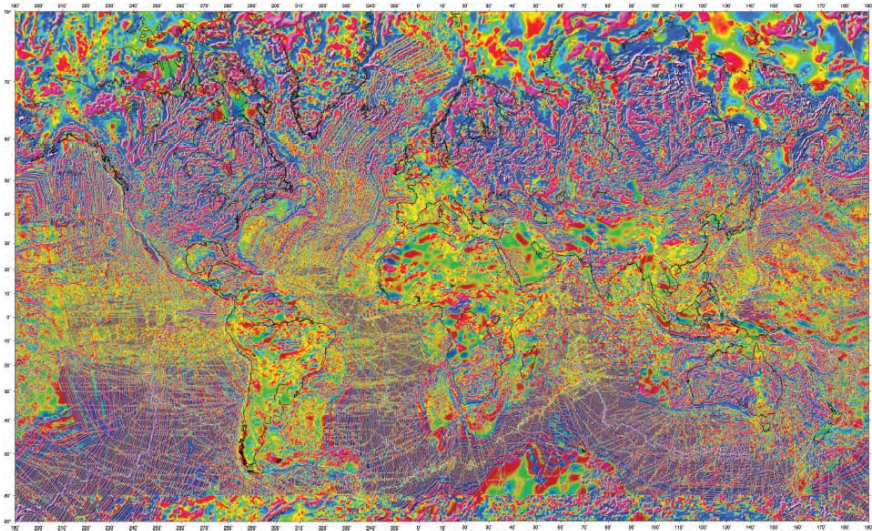
Hlavní pole

IGRF 2000 Jižní pól(y)



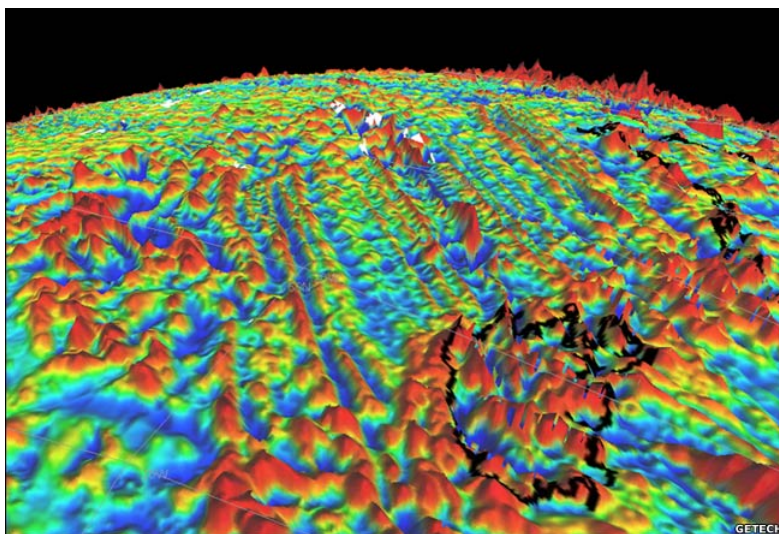
Zbytkové pole

Magnetic Anomaly Map of the World, 2007

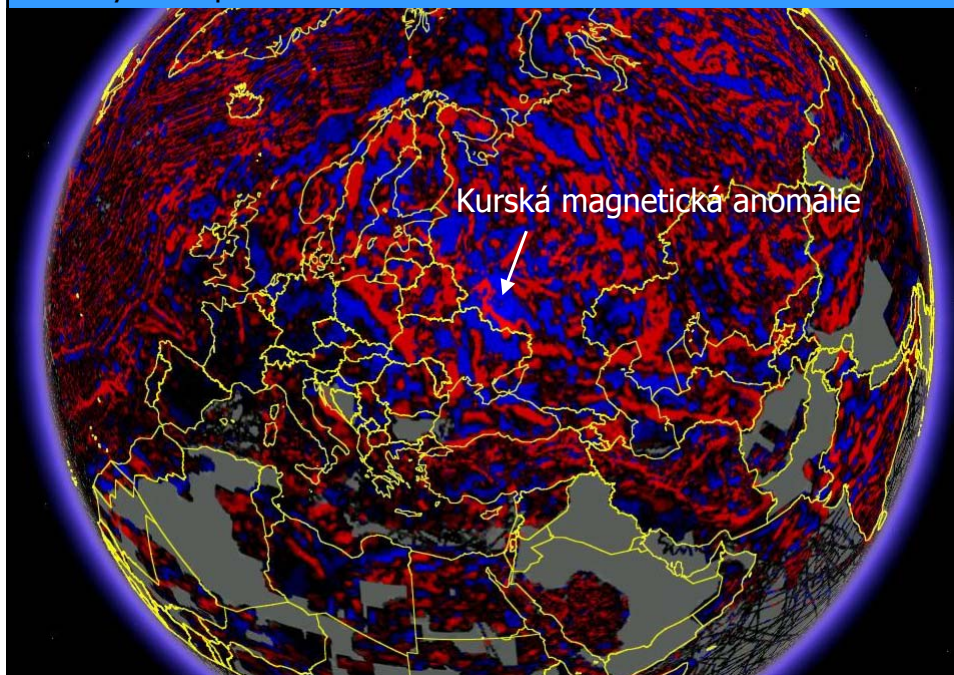


Zbytkové pole

Magnetické anomálie na dně oceánů

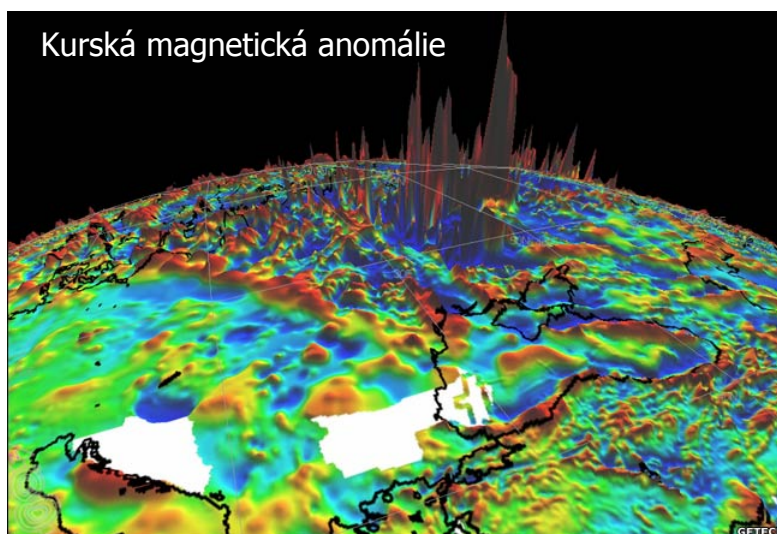


Zbytkové pole



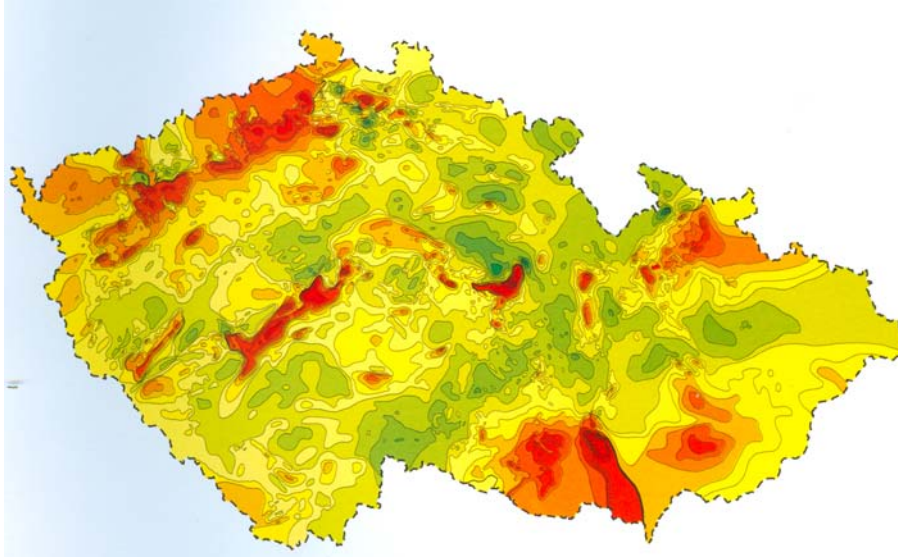
Zbytkové pole

Kurská magnetická anomálie



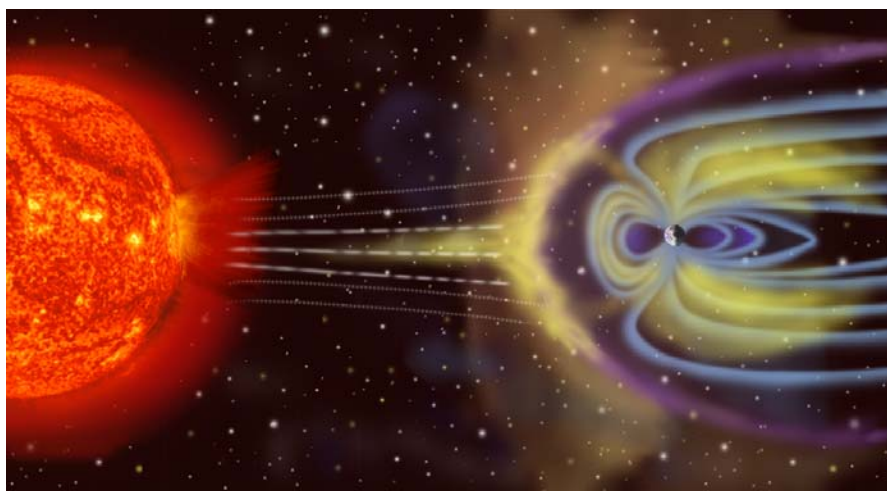
Zbytkové pole

Šalanský (1995): Geomagnetická mapa České republiky



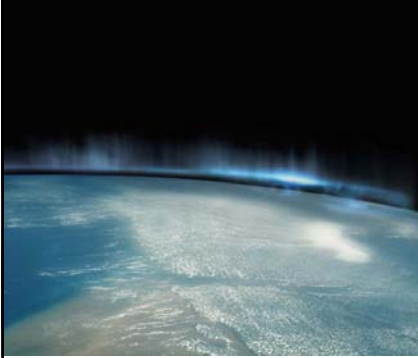
Externí magnetické pole

Magnetosféra

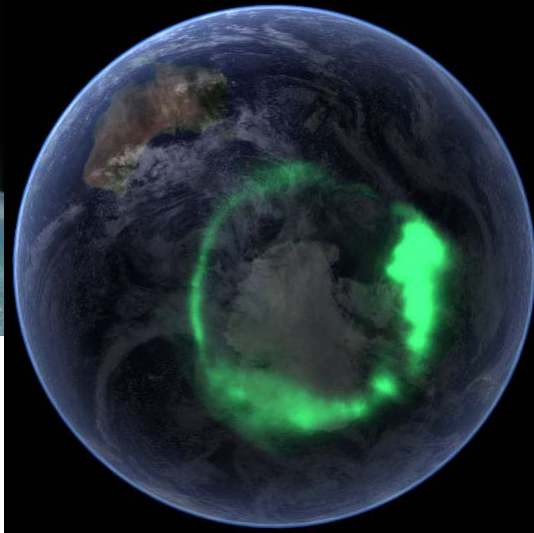


Externí magnetické pole

Interakce magnetosféry a slunečního větru



Aurora borealis
Aurora australis

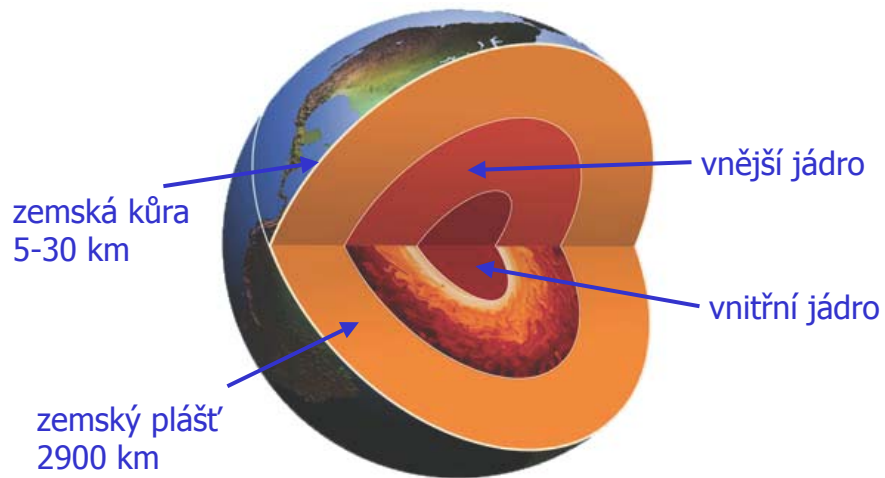


Externí magnetické pole

Severní (jižní) polární záře

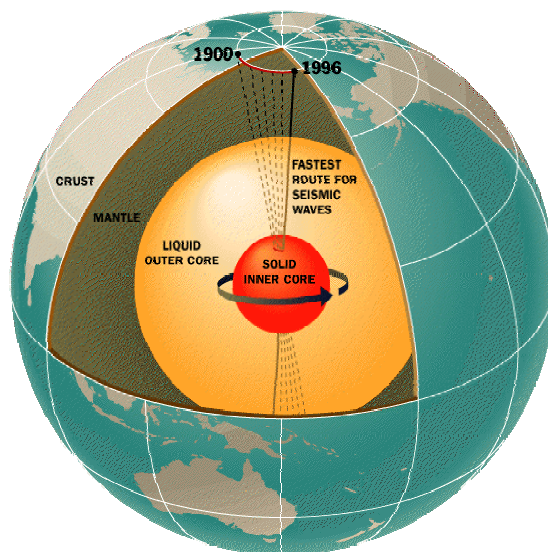


Anatomie Země

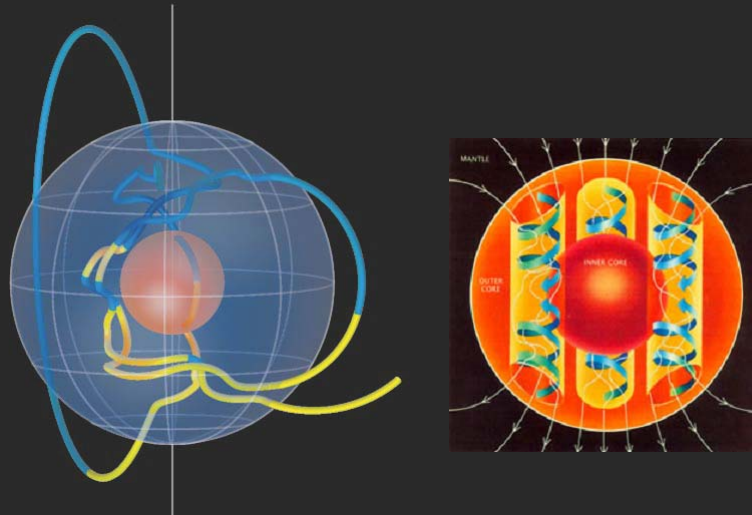


- vnější jádro tavenina železa
- více než 7 krát objem Měsíce
- na povrchu Země by tvořilo vrstvu vyšší než 300 km

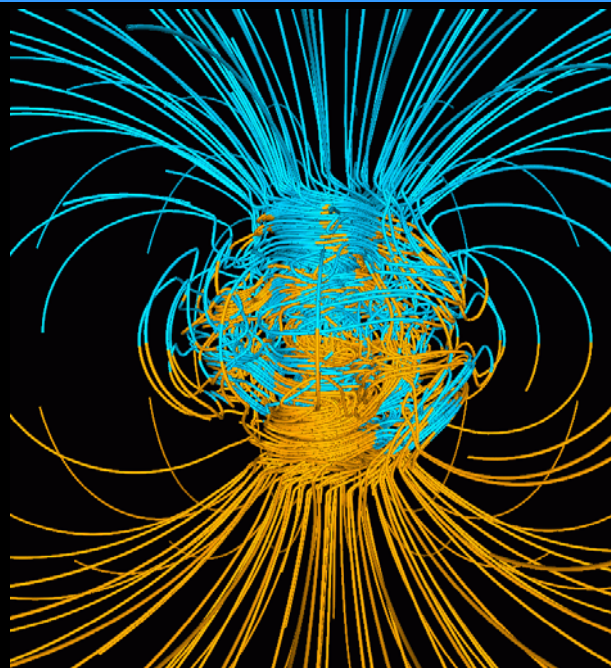
Rozdílná rychlost rotace vnitřního jádra



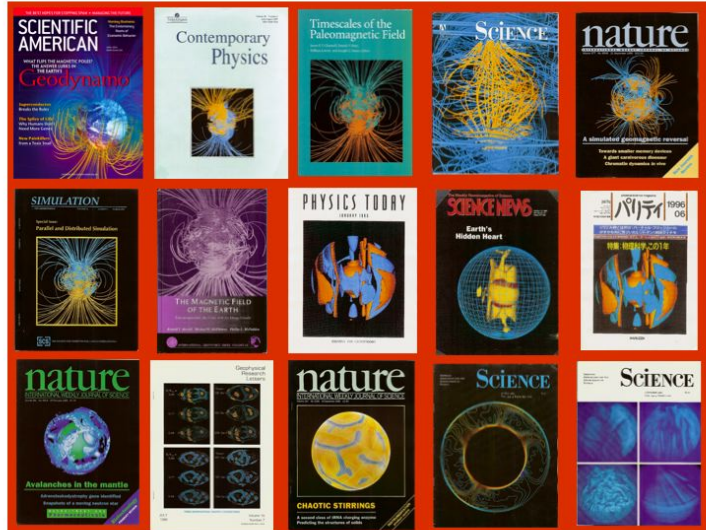
Magnetické siločáry uvnitř a v okolí zemského jádra



Glatzmaier – Robertsova počítačová simulace geodynamika

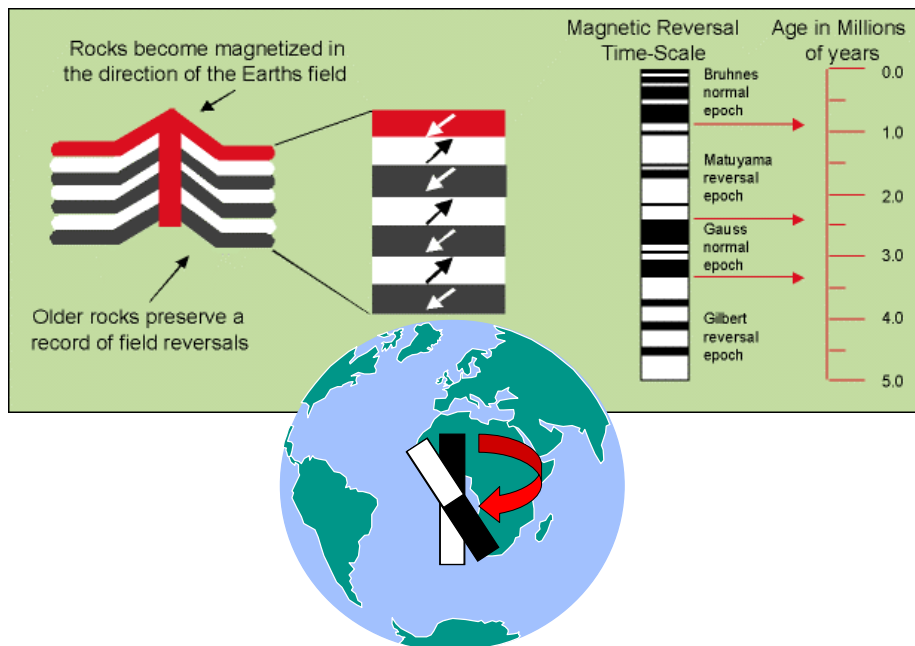


Glatzmaier – Robertsova počítačová simulace geodynamama

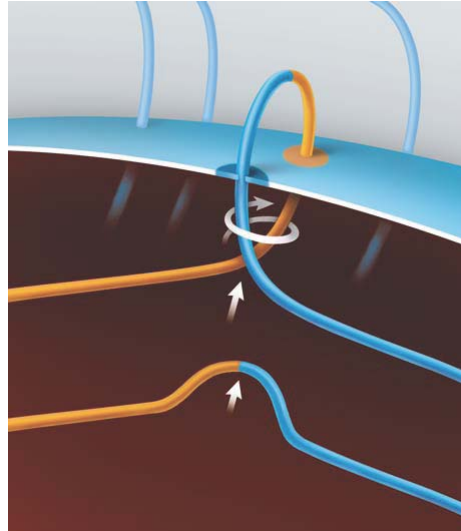
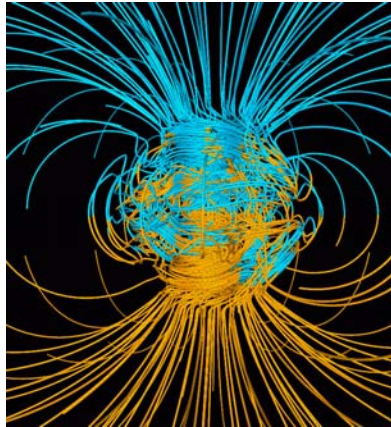


<http://www.es.ucsc.edu/~glatz/geodynamo.html>

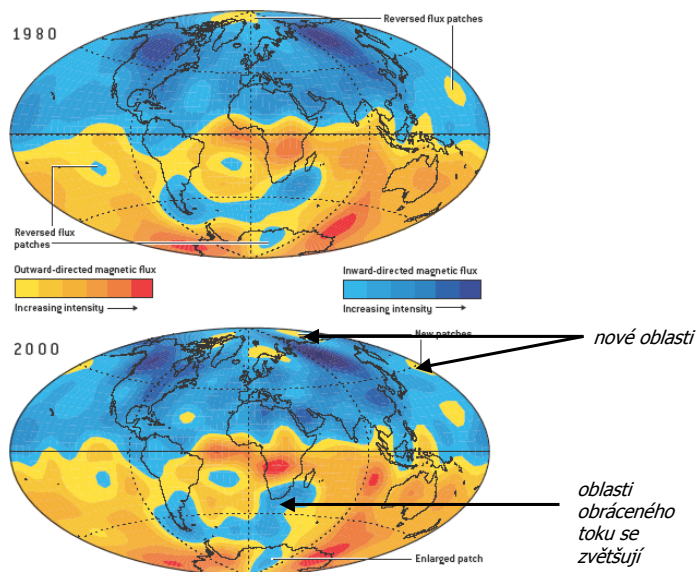
Magnetické přepólování Země



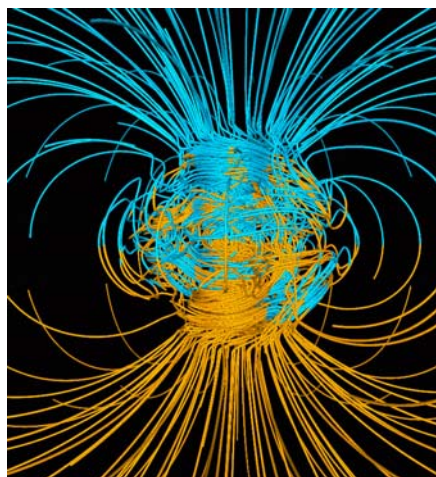
Oblasti obráceného toku



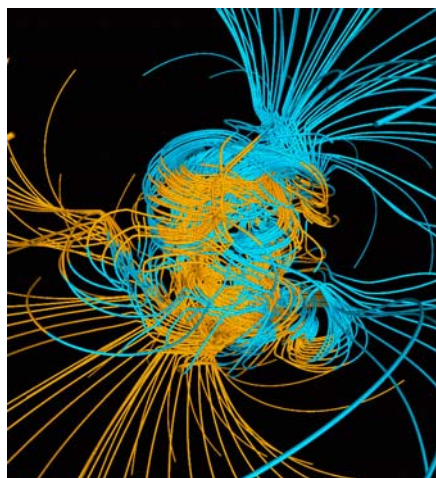
Magnetické pole na rozhraní pláště a jádra



Model inverze magnetického pole

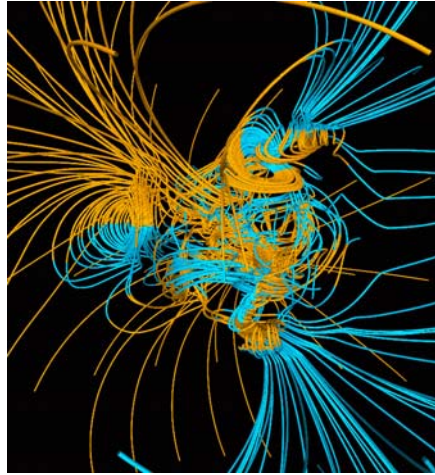


Model inverze magnetického pole



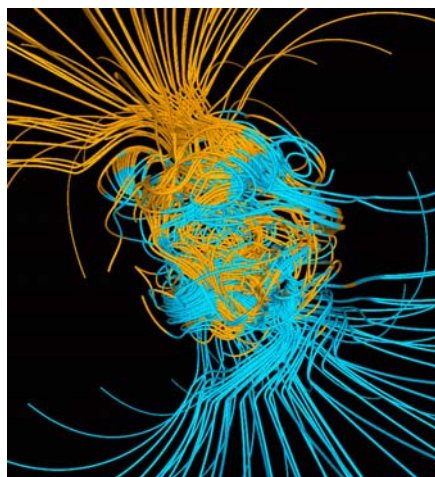
500 let před středem intervalu
přepólování

Model inverze magnetického pole



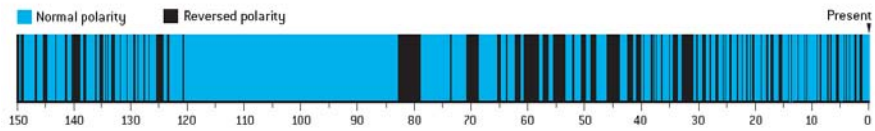
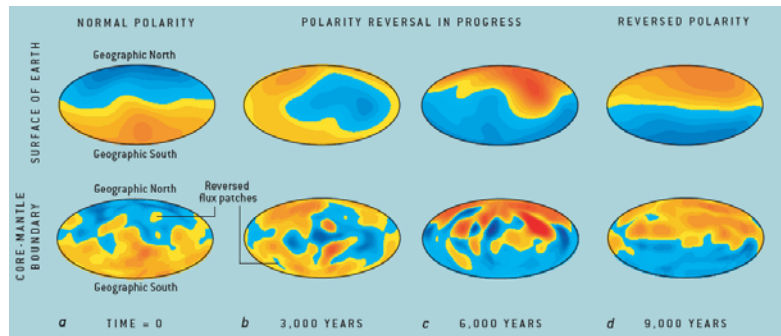
střed intervalu přepólování

Model inverze magnetického pole



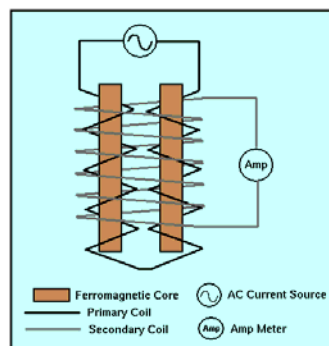
500 let po středu intervalu
přepólování

Inverze magnetického pole



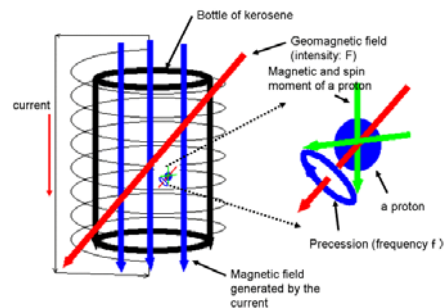
Měření magnetického pole Země

Fluxgate magnetometer



směrové měření

Proton precession magnetometer



absolutní měření

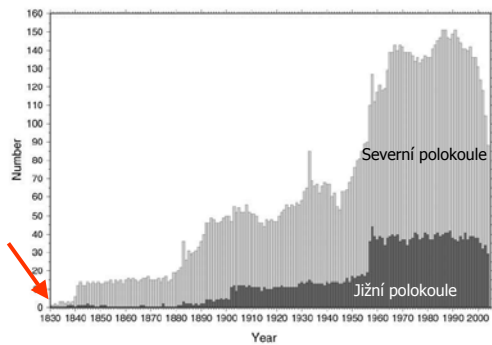
Měření magnetického pole



Pozemní geomagnetické observatoře

- nerovnoměrné pokrytí
- převažují kontinenty
- hlavně na severní polokouli

Gauss 1832



Měření magnetického pole

Pozemní geomagnetické observatoře



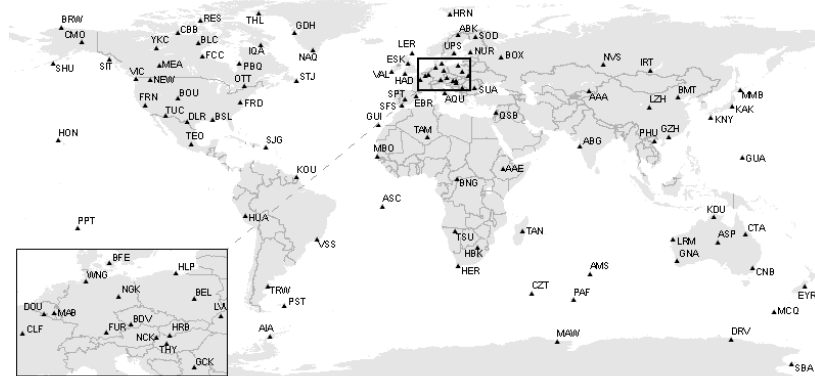
Měření magnetického pole

Projekt INTERMAGNET

International Real-time Magnetic Observatory Network

<http://www.intermagnet.org/>

- 114 geomagnetických observatoří
- 42 zemí
- v ČR geomagnetická observatoř Budkov u Prachatic, BOV (provozuje Geofyzikální ústav, AV ČR)

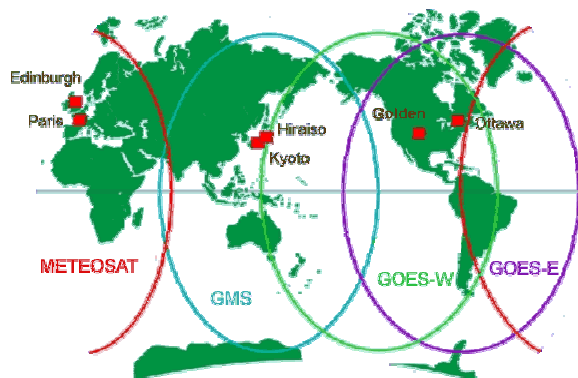


Měření magnetického pole

Projekt INTERMAGNET

International Real-time Magnetic Observatory Network

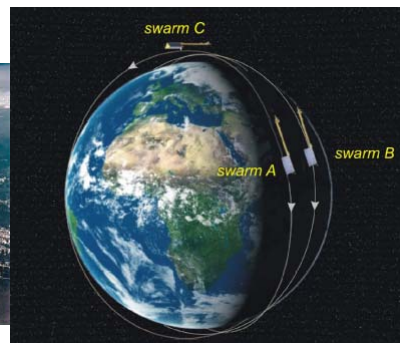
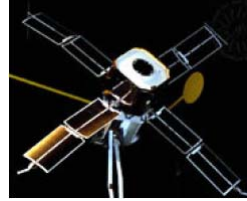
- Sběr dat pomocí družic, telefon, počítačová síť
- Max. do 72 hodin
- Geomagnetic Information Nodes



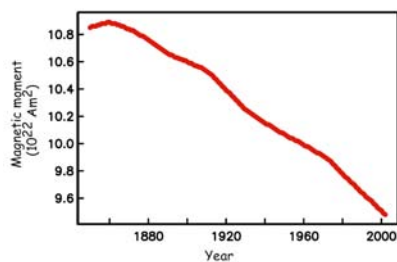
Měření magnetického pole

Družice

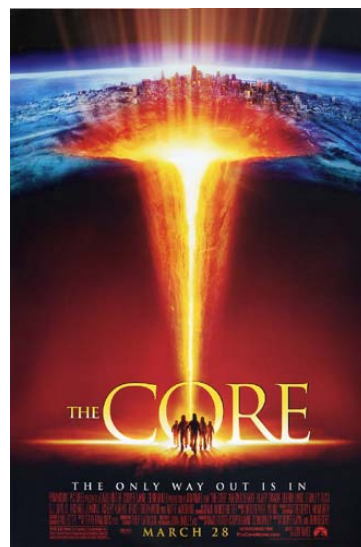
- 1979-80 MAGSAT
- 1999- Ørsted
- 2000- CHAMP
- 2009- SWARM (3 družice)
 - rovnoměrné pokrytí přesnými měřeními



Intenzita magnetického pole slábne



- Od prvního změření absolutní intenzity magnetického pole Gaussem v roce 1839 intenzita klesla o 10%
- To je asi dvacetkrát rychleji než by pole zesláblo, kdyby ztratilo svůj zdroj energie



The Core (2003)