

GEOMAGNETICKÉ POLE: DRUŽICE VYPRÁVĚJÍ

Jakub Velímský

Katedra geofyziky
Univerzita Karlova v Praze
Matematicko-fyzikální fakulta
E-mail: jakub.velimsky@mff.cuni.cz
WWW: <http://geo.mff.cuni.cz/~velimsky/>



Den s fyzikou, 2.2. 2006

Osnova

Historický úvod

Časové změny geomagnetického pole

Jak vzniká geomagnetické pole?

Magnetické pole v blízkém okolí Země

Elektromagnetická indukce

Satelitní éra

Osnova

Historický úvod

Od starověku k zaoceánským plavbám

De magnete — Gilbert a jeho následovníci

Rozvoj teorie EM pole — od Coulomba k Maxwellovi

Globální geomagnetická měření — Gauss a Humboldt

Časové změny geomagnetického pole

Jak vzniká geomagnetické pole?

Magnetické pole v blízkém okolí Země

Elektromagnetická indukce

Satelitní éra

Od starověku k zaoceánským plavbám

antika již staří Řekové pozorovali schopnost magnetovce přitahovat železo (*Magnetes* — *makedonský kmen; Magnesia* — *řecké město v malé Asii, blízka naleziště magnetovce*)

1000 v Číně vynalezen kompas (magnetovec na plováku v nádobě)

12. stol. kompas pronikl do Evropy (zmiňují např. Alexander Neckam, Petrus Peregrinus)

od 13. stol. využití v námořní navigaci (V. da Gama, K. Kolumbus, F. Magellan)

1544 Georg Hartmann pozoroval inklinaci; 1581 změřena a popsána Robertem Normanem; byla pozorována i deklinace (kalibrace kompasů pro různá moře)

Od starověku k zaoceánským plavbám

antika již staří Řekové pozorovali schopnost magnetovce přitahovat železo (*Magnetes* — *makedonský kmen; Magnesia* — *řecké město v malé Asii, blízka naleziště magnetovce*)

1000 v Číně vynalezen kompas (magnetovec na plováku v nádobě)

12. stol. kompas pronikl do Evropy (zmiňují např. Alexander Neckam, Petrus Peregrinus)

od 13. stol. využití v námořní navigaci (V. da Gama, K. Kolumbus, F. Magellan)

1544 Georg Hartmann pozoroval inklinaci; 1581 změřena a popsána Robertem Normanem; byla pozorována i deklinace (kalibrace kompasů pro různá moře)

Od starověku k zaoceánským plavbám

antika již staří Řekové pozorovali schopnost magnetovce přitahovat železo (*Magnetes* — *makedonský kmen; Magnesia* — *řecké město v malé Asii, blízka naleziště magnetovce*)

1000 v Číně vynalezen kompas (magnetovec na plováku v nádobě)

12. stol. kompas pronikl do Evropy (zmiňují např. Alexander Neckam, Petrus Peregrinus)

od 13. stol. využití v námořní navigaci (V. da Gama, K. Kolumbus, F. Magellan)

1544 Georg Hartmann pozoroval inklinaci; 1581 změřena a popsána Robertem Normanem; byla pozorována i deklinace (kalibrace kompasů pro různá moře)

Od starověku k zaoceánským plavbám

antika již staří Řekové pozorovali schopnost magnetovce přitahovat železo (*Magnetes* — *makedonský kmen; Magnesia* — *řecké město v malé Asii, blízka naleziště magnetovce*)

1000 v Číně vynalezen kompas (magnetovec na plováku v nádobě)

12. stol. kompas pronikl do Evropy (zmiňují např. Alexander Neckam, Petrus Peregrinus)

od 13. stol. využití v námořní navigaci (V. da Gama, K. Kolumbus, F. Magellan)

1544 Georg Hartmann pozoroval inklinaci; 1581 změřena a popsána Robertem Normanem; byla pozorována i deklinace (kalibrace kompasů pro různá moře)

Od starověku k zaoceánským plavbám

antika již staří Řekové pozorovali schopnost magnetovce přitahovat železo (*Magnetes* — *makedonský kmen; Magnesia* — *řecké město v malé Asii, blízka naleziště magnetovce*)

1000 v Číně vynalezen kompas (magnetovec na plováku v nádobě)

12. stol. kompas pronikl do Evropy (zmiňují např. Alexander Neckam, Petrus Peregrinus)

od 13. stol. využití v námořní navigaci (V. da Gama, K. Kolumbus, F. Magellan)

1544 Georg Hartmann pozoroval inklinaci; 1581 změřena a popsána Robertem Normanem; byla pozorována i deklinace (kalibrace kompasů pro různá moře)

Od starověku k zaoceánským plavbám

antika již staří Řekové pozorovali schopnost magnetovce přitahovat železo (*Magnetes* — *makedonský kmen; Magnesia* — *řecké město v malé Asii, blízka naleziště magnetovce*)

1000 v Číně vynalezen kompas (magnetovec na plováku v nádobě)

12. stol. kompas pronikl do Evropy (zmiňují např. Alexander Neckam, Petrus Peregrinus)

od 13. stol. využití v námořní navigaci (V. da Gama, K. Kolumbus, F. Magellan)

1544 Georg Hartmann pozoroval inklinaci; 1581 změřena a popsána Robertem Normanem; byla pozorována i deklinace (kalibrace kompasů pro různá moře)

De magnete — Gilbert a jeho následovníci

1600 William Gilbert: De Magnete

1634 Henry Gellibrand

1702 Edmond Halley



De magnetē — Gilbert a jeho následovníci

1600 William Gilbert: De Magnetē

- ▶ shrnul předchozí pozorování inklinace a deklinace
- ▶ zkoumal permanentní magnetizaci
- ▶ demonstroval vlastnosti geomagnetického pole na zmagnetované kouli (*terrella*)
- ▶ deklinaci vysvětloval nerovnoměrným rozložením hmoty

1634 Henry Gellibrand

1702 Edmond Halley



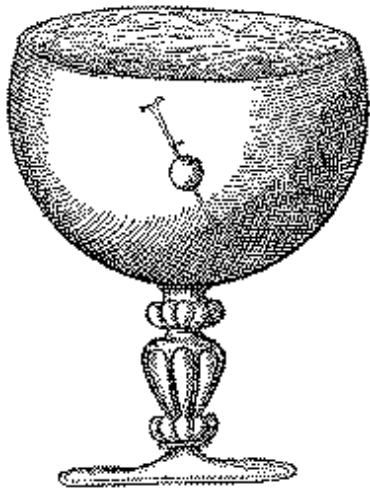
De magnete — Gilbert a jeho následovníci

1600 William Gilbert: De Magnete

- ▶ shrnul předchozí pozorování inklinace a deklinace
- ▶ zkoumal permanentní magnetizaci
- ▶ demonstroval vlastnosti geomagnetického pole na zmagnetované kouli (*terrella*)
- ▶ deklinaci vysvětloval nerovnoměrným rozložením hmoty

1634 Henry Gellibrand

1702 Edmond Halley



De magnete — Gilbert a jeho následovníci

1600 William Gilbert: De Magnete

- ▶ shrnul předchozí pozorování inklinace a deklinace
- ▶ zkoumal permanentní magnetizaci
- ▶ demonstroval vlastnosti geomagnetického pole na zmagetované kouli (*terrella*)
- ▶ deklinaci vysvětloval nerovnoměrným rozložením hmoty



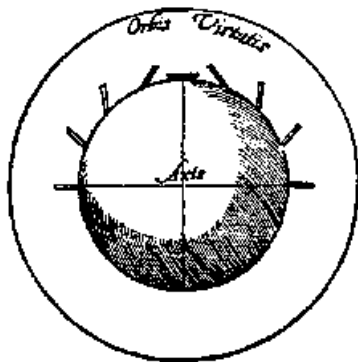
1634 Henry Gellibrand

1702 Edmond Halley

De magnete — Gilbert a jeho následovníci

1600 William Gilbert: De Magnete

- ▶ shrnul předchozí pozorování inklinace a deklinace
- ▶ zkoumal permanentní magnetizaci
- ▶ demonstroval vlastnosti geomagnetického pole na zmagnetované kouli (*terrella*)
- ▶ deklinaci vysvětloval nerovnoměrným rozložením hmoty



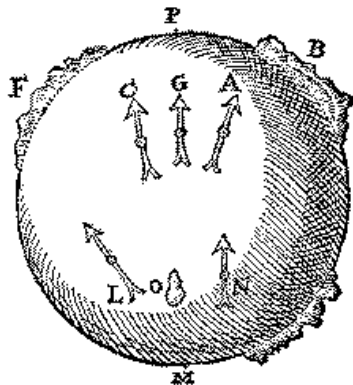
1634 Henry Gellibrand

1702 Edmond Halley

De magnete — Gilbert a jeho následovníci

1600 William Gilbert: De Magnete

- ▶ shrnul předchozí pozorování inklinace a deklinace
- ▶ zkoumal permanentní magnetizaci
- ▶ demonstroval vlastnosti geomagnetického pole na zmagnetované kouli (*terrella*)
- ▶ deklinaci vysvětloval nerovnoměrným rozložením hmoty



1634 Henry Gellibrand

1702 Edmond Halley

De magnete — Gilbert a jeho následovníci

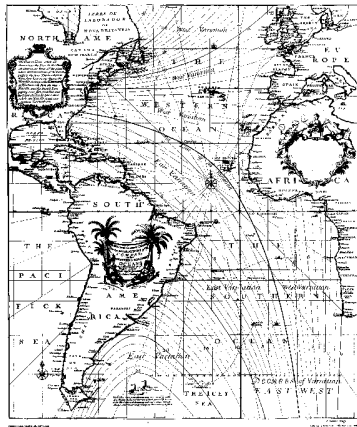
1600 William Gilbert: De Magnete

1634 Henry Gellibrand pozoroval
časové změny deklinace
(*sekulární variace*)

1702 Edmond Halley

De magnete — Gilbert a jeho následovníci

- 1600 William Gilbert: De Magnete
- 1634 Henry Gellibrand
- 1702 Edmond Halley sestavil mapy deklinací na základě vlastních i převzatých měření (*první použití izočar k zobrazení fyzikálních dat*)



Rozvoj teorie EM pole — od Coulomba k Maxwellovi

- 1777 Charles Coulomb
- 1820 Hans Christian Ørsted
- 1820 André-Marie Ampère
- 1831 Michael Faraday
- 1864 James Clerk Maxwell

Rozvoj teorie EM pole — od Coulomba k Maxwellovi

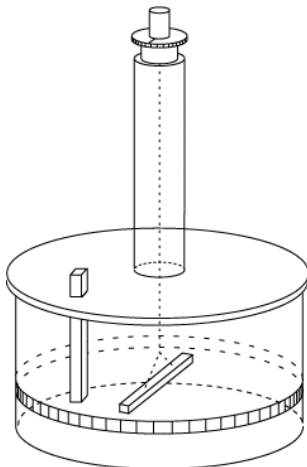
1777 Charles Coulomb sestrojil torzní váhy; ukázal, že intenzita pole permanentního magnetu klesá jako $1/r^3$

1820 Hans Christian Ørsted

1820 André-Marie Ampère

1831 Michael Faraday

1864 James Clerk Maxwell



Rozvoj teorie EM pole — od Coulomba k Maxwellovi

- 1777 Charles Coulomb
- 1820 Hans Christian Ørsted
pozoroval ovlivnění
magnetické střelky elektrickým
proudem (z Voltova
chemického článku)
- 1820 André-Marie Ampère
- 1831 Michael Faraday
- 1864 James Clerk Maxwell



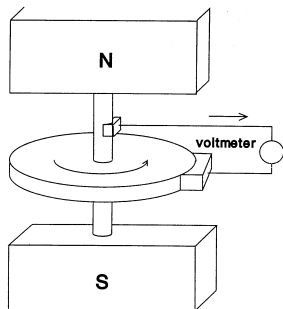
Rozvoj teorie EM pole — od Coulomba k Maxwellovi

- 1777 Charles Coulomb
- 1820 Hans Christian Ørsted
- 1820 André-Marie Ampère vysvětlil magnetické pole jako projev elektrického proudu
- 1831 Michael Faraday
- 1864 James Clerk Maxwell



Rozvoj teorie EM pole — od Coulomba k Maxwellovi

- 1777 Charles Coulomb
- 1820 Hans Christian Ørsted
- 1820 André-Marie Ampère
- 1831 Michael Faraday objevil jev elektromagnetické indukce, tedy vznik elektrického proudu ve vodiči vyvolaný změnou magnetického pole
- 1864 James Clerk Maxwell



Rozvoj teorie EM pole — od Coulomba k Maxwellovi

1777 Charles Coulomb

1820 Hans Christian Ørsted

1820 André-Marie Ampère

1831 Michael Faraday

1864 James Clerk Maxwell sjednotil
popis elektrického a
magnetického pole

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0$$

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho$$

Globální geomagnetická měření — Gauss a Humboldt

1832-7 Carl Friedrich Gauss
a Wilhelm Eduard Weber

1839 C.F. Gauss

1769-1859 Alexander von Humboldt

Globální geomagnetická měření — Gauss a Humboldt

1832-7 Carl Friedrich Gauss
a Wilhelm Eduard Weber



1839 C.F. Gauss

1769-1859 Alexander von Humboldt

Globální geomagnetická měření — Gauss a Humboldt

1832-7 Carl Friedrich Gauss a Wilhelm Eduard Weber

- ▶ rozvinuli měření intenzity geomag. pole s nezávislou kalibrací přístrojů
- ▶ založili *Magnetischer Verein* a propagovali rozvoj celosvětové sítě měření



1839 C.F. Gauss

Globální geomagnetická měření — Gauss a Humboldt

1832-7 Carl Friedrich Gauss a Wilhelm Eduard Weber

- ▶ rozvinuli měření intenzity geomag. pole s nezávislou kalibrací přístrojů
- ▶ založili *Magnetischer Verein* a propagovali rozvoj celosvětové sítě měření



1839 C.F. Gauss

Globální geomagnetická měření — Gauss a Humboldt

1832-7 Carl Friedrich Gauss
a Wilhelm Eduard Weber

1839 C.F. Gauss: *Allgemeine Theorie des Erdmagnetismus*;
sférická harmonická analýza (multipólový rozvoj)
geomagnetického pole:

$$U = a \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n \left\{ [g_n^m \cos(m\varphi) + h_n^m \sin(m\varphi)] \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} + [q_n^m \cos(m\varphi) + s_n^m \sin(m\varphi)] \left(\frac{r}{a}\right)^n \right\} P_n^m(\cos \vartheta)$$

- ▶ více než 98 % pole je vnitřního původu
- ▶ více než 95 % pole je soustředěno v dipólovém členu

1769-1859 Alexander von Humboldt

Globální geomagnetická měření — Gauss a Humboldt

1832-7 Carl Friedrich Gauss
a Wilhelm Eduard Weber

1839 C.F. Gauss: *Allgemeine Theorie des Erdmagnetismus*;
sférická harmonická analýza (multipólový rozvoj)
geomagnetického pole:

$$U = a \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n \left\{ [g_n^m \cos(m\varphi) + h_n^m \sin(m\varphi)] \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} + [q_n^m \cos(m\varphi) + s_n^m \sin(m\varphi)] \left(\frac{r}{a}\right)^n \right\} P_n^m(\cos \vartheta)$$

- ▶ více než 98 % pole je vnitřního původu
- ▶ více než 95 % pole je soustředěno v dipólovém členu

1769-1859 Alexander von Humboldt

Globální geomagnetická měření — Gauss a Humboldt

1832-7 Carl Friedrich Gauss
a Wilhelm Eduard Weber

1839 C.F. Gauss: *Allgemeine Theorie des Erdmagnetismus*;
sférická harmonická analýza (multipólový rozvoj)
geomagnetického pole:

$$U = a \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n \left\{ [g_n^m \cos(m\varphi) + h_n^m \sin(m\varphi)] \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} + [q_n^m \cos(m\varphi) + s_n^m \sin(m\varphi)] \left(\frac{r}{a}\right)^n \right\} P_n^m(\cos \vartheta)$$

- ▶ více než 98 % pole je vnitřního původu
- ▶ více než 95 % pole je soustředěno v dipólovém členu

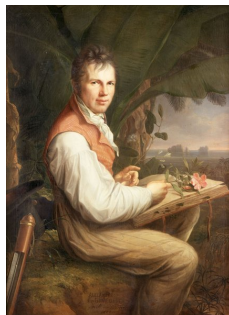
1769-1859 Alexander von Humboldt

Globální geomagnetická měření — Gauss a Humboldt

1832-7 Carl Friedrich Gauss
a Wilhelm Eduard Weber

1839 C.F. Gauss

1769-1859 Alexander von Humboldt
inspiroval Gause k výzkumu
geomagnetického pole
a významně se angažoval
v organizování celosvětové
sítě observatoří (Britské
impérium, Rusko)



Osnova

Historický úvod

Časové změny geomagnetického pole

Archeo- a paleomagnetismus

Paleomagnetismus a desková tektonika

Sekulární variace

Jak vzniká geomagnetické pole?

Magnetické pole v blízkém okolí Země

Elektromagnetická indukce

Satelitní éra

Archeo- a paleomagnetismus

- ▶ měření magnetizace hornin a antropogenních materiálů (např. keramiky) spojené s datací
- ▶ jeden z mála fyzikálních zdrojů informací o minulosti Země
- ▶ termoremanentní magnetizace
- ▶ detritická magnetizace

Archeo- a paleomagnetismus

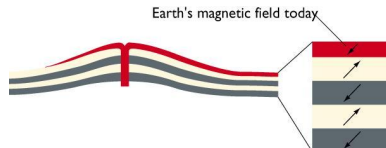
- ▶ měření magnetizace hornin a antropogenních materiálů (např. keramiky) spojené s datací
- ▶ jeden z mála fyzikálních zdrojů informací o minulosti Země
- ▶ termoremanentní magnetizace
- ▶ detritická magnetizace

Archeo- a paleomagnetismus

- ▶ měření magnetizace hornin a antropogenních materiálů (např. keramiky) spojené s datací
- ▶ jeden z mála fyzikálních zdrojů informací o minulosti Země
- ▶ termoremanentní magnetizace
- ▶ detritická magnetizace

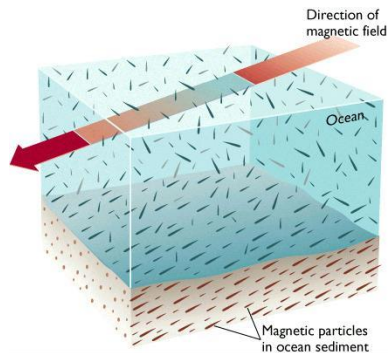
Archeo- a paleomagnetismus

- ▶ měření magnetizace hornin a antropogenních materiálů (např. keramiky) spojené s datací
- ▶ jeden z mála fyzikálních zdrojů informací o minulosti Země
- ▶ **termoremanentní magnetizace**
- ▶ detritická magnetizace



Archeo- a paleomagnetismus

- ▶ měření magnetizace hornin a antropogenních materiálů (např. keramiky) spojené s datací
- ▶ jeden z mála fyzikálních zdrojů informací o minulosti Země
- ▶ termoremanentní magnetizace
- ▶ detritická magnetizace

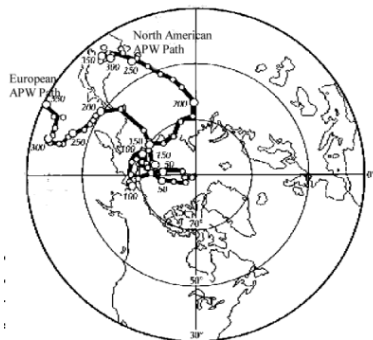


Paleomagnetismus a desková tektonika

- ▶ stejně datované vzorky hornin z různých kontinentů ukazují na různou polohu geomagnetických pólů, tudíž kontinenty musely v historii měnit svou vzájemnou pozici
- ▶ data lze využít k rekonstrukci deskových pohybů
- ▶ paleomagnetické záznamy v okolí oceánských hřbetů svědčí o roztahování oceánského dna a také o inverzích polarity geomagnetického pole

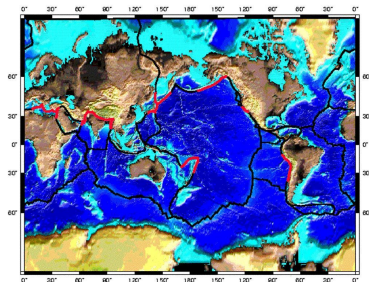
Paleomagnetismus a desková tektonika

- ▶ stejně datované vzorky hornin z různých kontinentů ukazují na různou polohu geomagnetických pólů, tudíž kontinenty musely v historii měnit svou vzájemnou pozici
- ▶ data lze využít k rekonstrukci deskových pohybů
- ▶ paleomagnetické záznamy v okolí oceánských hřbetů svědčí o roztahování oceánského dna a také o inverzích polarity geomagnetického pole



Paleomagnetismus a desková tektonika

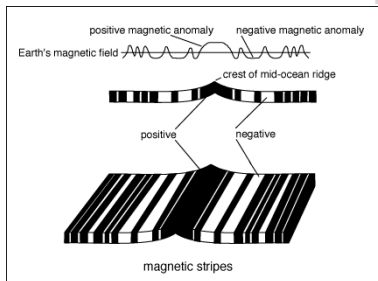
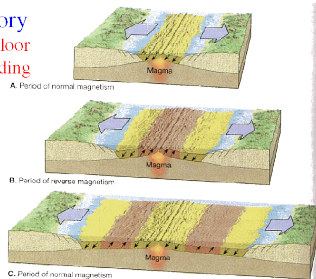
- ▶ stejně datované vzorky hornin z různých kontinentů ukazují na různou polohu geomagnetických pólů, tudíž kontinenty musely v historii měnit svou vzájemnou pozici
- ▶ data lze využít k rekonstrukci deskových pohybů
- ▶ paleomagnetické záznamy v okolí oceánských hřbetů svědčí o roztahování oceánského dna a také o inverzích polarity geomagnetického pole



Paleomagnetismus a desková tektonika

- ▶ stejně datované vzorky hornin z různých kontinentů ukazují na různou polohu geomagnetických pólů, tudíž kontinenty musely v historii měnit svou vzájemnou pozici
- ▶ data lze využít k rekonstrukci deskových pohybů
- ▶ paleomagnetické záznamy v okolí oceánských hřbetů svědčí o roztahování oceánského dna a také o inverzích polarity geomagnetického pole

History Sea-Floor Spreading



Sekulární variace

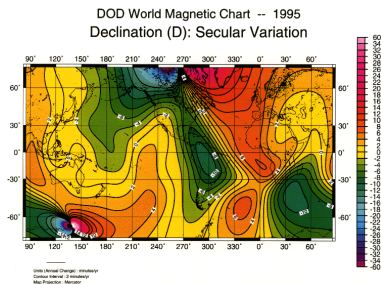
- ▶ geomagnetické impulsy
- ▶ západní drift
- ▶ exkurze a inverze polarity
- ▶ Variace v řádu desítek tisíců let

Sekulární variace

- ▶ geomagnetické impulsy — nejrychlejší jevy, které mají prokazatelně původ v jádře. Nepravidelné (7 od r. 1870, ale žádné v předchozích 150 letech) impulsy trvající zhruba 1 rok.
- ▶ západní drift
- ▶ exkurze a inverze polarity
- ▶ Variace v řádu desítek tisíců let

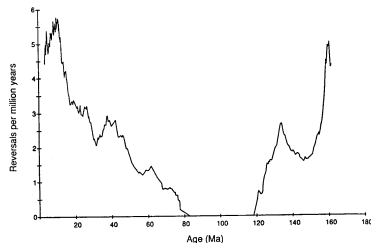
Sekulární variace

- ▶ geomagnetické impulsy
- ▶ západní drift — v časovém horizontu desetiletí až tisíciletí je pozorován posun (nedipólového) pole směrem na západ rychlostí řádově 0.1 stupňů za rok. Není ovšem systematický, ani globální.
- ▶ exkurze a inverze polarity
- ▶ Variace v řádu desítek tisíců let



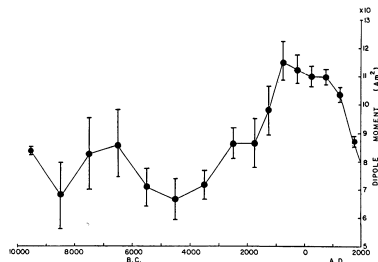
Sekulární variace

- ▶ geomagnetické impulsy
- ▶ západní drift
- ▶ exkurze a inverze polarity — trvají přibližně 1000 až 5000 let. Vyskytují se také chaoticky. Jsou provázeny výrazným poklesem dipólové složky pole, které se v případě inverze zcela převrátí.
- ▶ Variace v řádu desítek tisíců let



Sekulární variace

- ▶ geomagnetické impulsy
- ▶ západní drift
- ▶ exkurze a inverze polarity
- ▶ Variace v řádu desítek tisíců let — dosahují až faktoru 5 a opět vykazují značnou nepravidelnost. Dlouhodobá průměrná hodnota dipólového momentu se odhaduje na 4–6 10^{22} A/m² (současná hodnota je nadprůměrná a klesá).



Osnova

Historický úvod

Časové změny geomagnetického pole

Jak vzniká geomagnetické pole?

Poznatky ze seismologie

Teorie vzniku geomagnetického pole

Základy teorie geodynamika

Počítačová éra

Magnetické pole v blízkém okolí Země

Elektromagnetická indukce

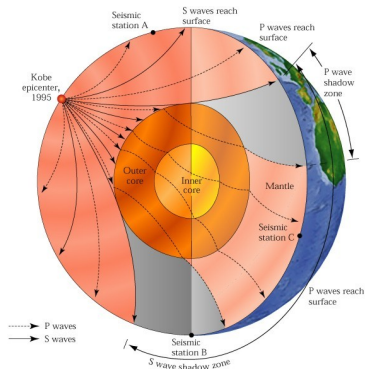
Satelitní éra

Poznatky ze seismologie

1906 Richard Dixon Oldham

1915 Beno Gutenberg

1935 Inge Lehmannová

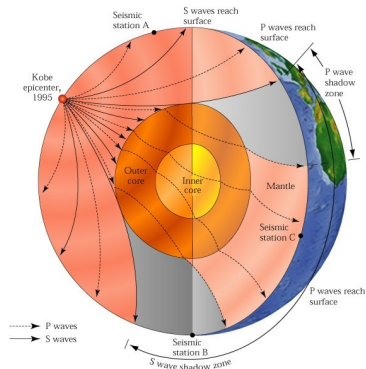


Poznatky ze seismologie

1906 Richard Dixon Oldham
z pozorování seismických vln
odvodil existenci kapalného
zemského jádra

1915 Beno Gutenberg

1935 Inge Lehmannová

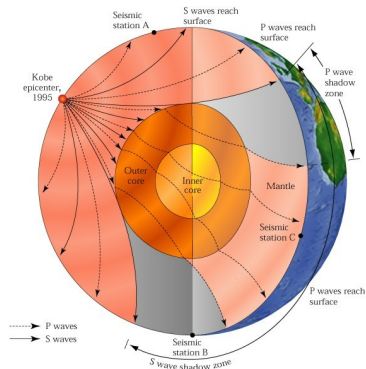


Poznatky ze seismologie

1906 Richard Dixon Oldham

1915 Beno Gutenberg stanovil
poloměr jádra

1935 Inge Lehmannová

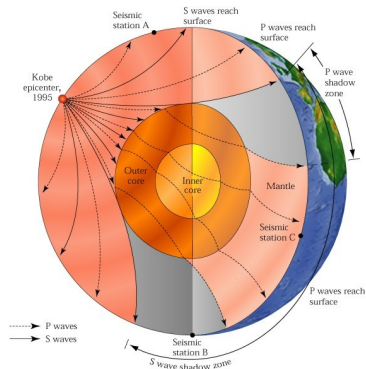


Poznatky ze seismologie

1906 Richard Dixon Oldham

1915 Beno Gutenberg

1935 Inge Lehmannová objevila
pevné vnitřní jádro



Teorie vzniku geomagnetického pole

- od 16. stol Země jako permanentní magnet
- 1950 projev rotace feromagnetické Země
- od 1920 geodynamo

Teorie vzniku geomagnetického pole

od 16. stol Země jako permanentní magnet

- ▶ nevysvětluje sekulární variace (časovou proměnlivost) vnitřního pole
- ▶ teplota vnitřku Země přesahuje Curieovu teplotu železa

1950 projev rotace feromagnetické Země

od 1920 geodynamo

Teorie vzniku geomagnetického pole

od 16. stol Země jako permanentní magnet

- ▶ nevysvětluje sekulární variace (časovou proměnlivost) vnitřního pole
- ▶ teplota vnitřku Země přesahuje Curieovu teplotu železa

1950 projev rotace feromagnetické Země

od 1920 geodynamo

Teorie vzniku geomagnetického pole

od 16. stol Země jako permanentní magnet

- ▶ nevysvětluje sekulární variace (časovou proměnlivost) vnitřního pole
- ▶ teplota vnitřku Země přesahuje Curieovu teplotu železa

1950 projev rotace feromagnetické Země

od 1920 geodynamo

Teorie vzniku geomagnetického pole

od 16. stol ~~Země jako permanentní magnet~~

1950 projev rotace feromagnetické Země (Arthur Schuster, 1912; Patrick Blackett)

- ▶ měření v hlubokých dolech neukázala závislost na hloubce (a úhlové hybnosti)
- ▶ nedostatečná intenzita

od 1920 geodynamo

Teorie vzniku geomagnetického pole

od 16. stol ~~Země jako permanentní magnet~~

1950 projev rotace feromagnetické Země (Arthur Schuster, 1912; Patrick Blackett)

- ▶ měření v hlubokých dolech neukázala závislost na hloubce (a úhlové hybnosti)
- ▶ nedostatečná intenzita

od 1920 geodynamo

Teorie vzniku geomagnetického pole

od 16. stol ~~Země jako permanentní magnet~~

1950 projev rotace feromagnetické Země (Arthur Schuster, 1912; Patrick Blackett)

- ▶ měření v hlubokých dolech neukázala závislost na hloubce (a úhlové hybnosti)
- ▶ nedostatečná intenzita

od 1920 geodynamo

Teorie vzniku geomagnetického pole

- od 16. stol ~~Země jako permanentní magnet~~
1950 ~~projev rotace feromagnetické Země~~
od 1920 geodynamo

- ▶ geomagnetické pole dynamicky generované konvekcí vodivého materiálu ($\text{Fe}+\dots$) v kapalném vnějším jádře
- ▶ demonstrováno homopolárním dynamem

Teorie vzniku geomagnetického pole

od 16. stol ~~Země jako permanentní magnet~~
1950 ~~projev rotace feromagnetické Země~~
od 1920 geodynamo

- ▶ geomagnetické pole dynamicky generované konvekcí vodivého materiálu ($\text{Fe}+\dots$) v kapalném vnějším jádře
- ▶ demonstrováno homopolárním dynamem

Základy teorie geodynamy

- 1919 Joseph Larmor
matematický popis geodynamy
- 1933 Cowlingův teorém
- 1950 Walter Elsasser
- 1964 Stanislav Braginskij

Základy teorie geodynamy

- 1919 Joseph Larmor uvažoval, že vhodná konfigurace proudění v jádře může generovat geomagnetické pole
matematický popis geodynamy
- 1933 Cowlingův teorém
- 1950 Walter Elsasser
- 1964 Stanislav Braginskij

Základy teorie geodynamy

1919 Joseph Larmor

matematický popis geodynamy vede na složité nelineární rovnice:

$$\operatorname{div} \mathbf{v} = 0$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = P_m \Delta \mathbf{v} - \mathbf{v} \cdot \operatorname{grad} \mathbf{v} - P_m \operatorname{grad} \Pi + \frac{P_m^2 R_a}{P_r} T \mathbf{e}_z$$

$$- \frac{2 P_m}{E} \mathbf{e}_z \times \mathbf{v} + \frac{2 P_m}{E} (\operatorname{rot} \mathbf{B}) \times \mathbf{B}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{P_m}{P_r} \Delta T - \mathbf{v} \cdot \operatorname{grad} T$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \Delta \mathbf{B} + \operatorname{rot} (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

1933 Cowlingův teorém

1950 Walter Elsasser

1964 Stanislav Bračinskij

Základy teorie geodynamy

1919 Joseph Larmor

matematický popis geodynamy

1933 Cowlingův teorém: konfigurace proudění schopná generovat geomagnetické pole nemůže být osově symetrická

1950 Walter Elsasser

1964 Stanislav Braginskij

Základy teorie geodynamy

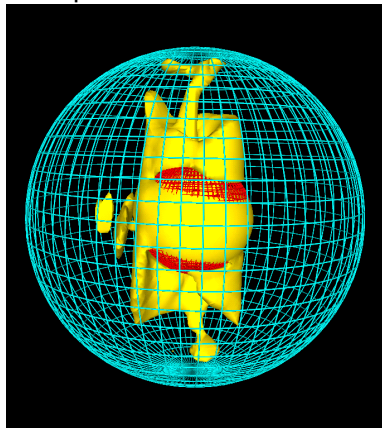
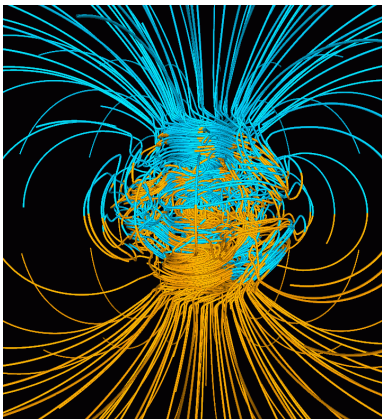
- 1919 Joseph Larmor
matematický popis geodynamy
- 1933 Cowlingův teorém
- 1950 Walter Elsasser a další se pokoušeli nalézt obecné řešení problému
- 1964 Stanislav Braginskij

Základy teorie geodynamy

- 1919 Joseph Larmor
matematický popis geodynamy
- 1933 Cowlingův teorém
- 1950 Walter Elsasser
- 1964 Stanislav Braginskij představil „téměř symetrické dynamo“

Počítačová éra

- 1995 Glatzmeier a Roberts představili numerický model geodynamama; mimo jiné dokázali reprodukovat sekulární variaci a inverze geomagnetického pole



Osnova

Historický úvod

Časové změny geomagnetického pole

Jak vzniká geomagnetické pole?

Magnetické pole v blízkém okolí Země

Časové změny vnějšího geomagnetického pole

Magnetosféra

Ionosféra

Elektromagnetická indukce

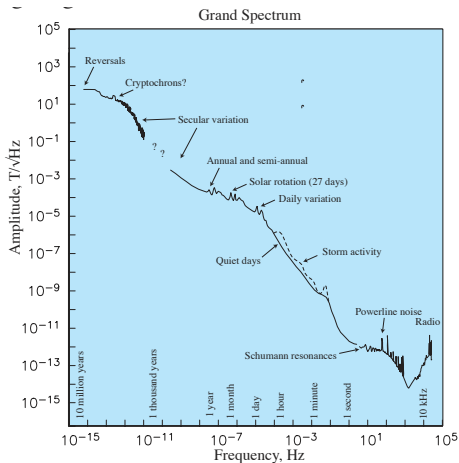
Satelitní éra

Časové změny vnějšího geomagnetického pole

- ▶ změny geomagnetického pole s charakteristickými časy 1 rok a kratšími jsou vnějšího původu
- ▶ rozhodujícím činitelem je Slunce: intenzita slunečního větru (proudu nabitých částic) a střídání dne a noci

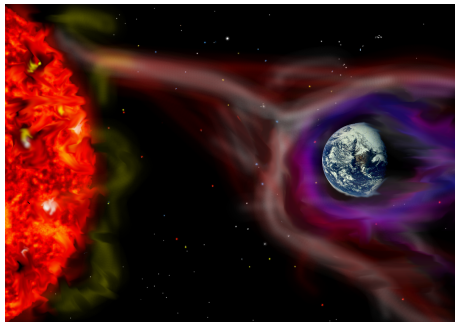
Časové změny vnějšího geomagnetického pole

- ▶ změny geomagnetického pole s charakteristickými časy 1 rok a kratšími jsou vnějšího původu
- ▶ rozhodujícím činitelem je Slunce: intenzita slunečního větru (proudu nabitých částic) a střídání dne a noci



Časové změny vnějšího geomagnetického pole

- ▶ změny geomagnetického pole s charakteristickými časy 1 rok a kratšími jsou vnějšího původu
- ▶ rozhodujícím činitelem je Slunce: intenzita slunečního větru (proudu nabitých částic) a střídání dne a noci



Magnetosféra

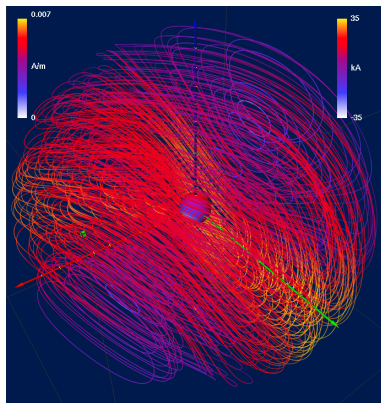
- ▶ nabité částice ze slunečního větru jsou zachyceny geomagnetickým polem
- ▶ vznik magnetosférických proudů — prstencový rovníkový proud, $2R$ — $7R$ od středu Země
- ▶ geomagnetické bouře — vybuzení magnetosférických proudů vyvolané změnami slunečního počasí

Magnetosféra

- ▶ nabité částice ze slunečního větru jsou zachyceny geomagnetickým polem
- ▶ vznik magnetosférických proudů — prstencový rovníkový proud, $2R$ — $7R$ od středu Země
- ▶ geomagnetické bouře — vybuzení magnetosférických proudů vyvolané změnami slunečního počasí

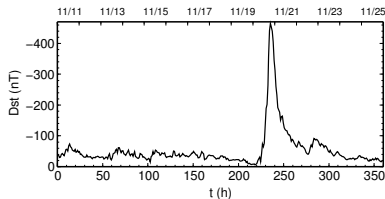
Magnetosféra

- ▶ nabité částice ze slunečního větru jsou zachyceny geomagnetickým polem
- ▶ vznik magnetosférických proudů — prstencový rovníkový proud, $2R$ — $7R$ od středu Země
- ▶ geomagnetické bouře — vybuzení magnetosférických proudů vyvolané změnami slunečního počasí



Magnetosféra

- ▶ nabité částice ze slunečního větru jsou zachyceny geomagnetickým polem
- ▶ vznik magnetosférických proudů — prstencový rovníkový proud, $2R$ — $7R$ od středu Země
- ▶ geomagnetické bouře — vybuzení magnetosférických proudů vyvolané změnami slunečního počasí



Ionosféra

- ▶ proudy vyvolané pravidelným ohříváním a ochlazováním ionosféry na denní a noční straně
- ▶ periodický charakter ($T = 1/n$ dní, $n = 1, 2, \dots$), sezónní variace
- ▶ charakterizovány dvěma proudovými smyčkami cca 110 km nad povrchem Země na denní straně

Ionosféra

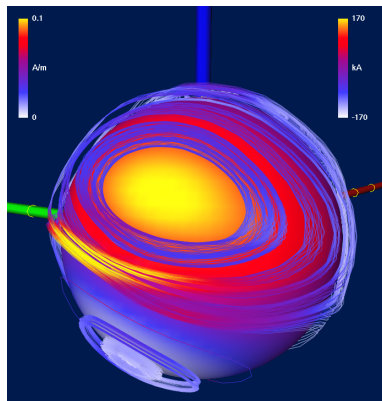
- ▶ proudy vyvolané pravidelným ohříváním a ochlazováním ionosféry na denní a noční straně
- ▶ periodický charakter ($T = 1/n$ dní, $n = 1, 2, \dots$), sezónní variace
- ▶ charakterizovány dvěma proudovými smyčkami cca 110 km nad povrchem Země na denní straně

Ionosféra

- ▶ proudy vyvolané pravidelným ohříváním a ochlazováním ionosféry na denní a noční straně
- ▶ periodický charakter ($T = 1/n$ dní, $n = 1, 2, \dots$), sezónní variace
- ▶ charakterizovány dvěma proudovými smyčkami cca 110 km nad povrchem Země na denní straně

Ionosféra

- ▶ proudy vyvolané pravidelným ohříváním a ochlazováním ionosféry na denní a noční straně
- ▶ periodický charakter ($T = 1/n$ dní, $n = 1, 2, \dots$), sezónní variace
- ▶ charakterizovány dvěma proudovými smyčkami cca 110 km nad povrchem Země na denní straně



Osnova

Historický úvod

Časové změny geomagnetického pole

Jak vzniká geomagnetické pole?

Magnetické pole v blízkém okolí Země

Elektromagnetická indukce

Hlubkové sondování Země

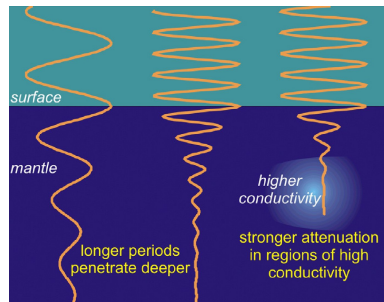
Satelitní éra

Hlubkové sondování Země

- ▶ časové změny vnějšího geomagnetického pole
- ▶ sekundární proudy
- ▶ informace o elektrické vodivosti v Zemi
- ▶ rozložení teploty, obsah vody, chemické a mineralogické složení Země

Hlubkové sondování Země

- ▶ časové změny vnějšího geomagnetického pole vyvolávají podle Faradayova zákona indukované sekundární elektrické proudy v Zemi, především v kůře a plášti
- ▶ sekundární proudy
- ▶ informace o elektrické vodivosti v Zemi
- ▶ rozložení teploty, obsah vody, chemické a mineralogické složení Země



Hloubkové sondování Země

- ▶ časové změny vnějšího geomagnetického pole
- ▶ tyto sekundární proudy podle Ampèrova zákona opět vytvářejí magnetické pole
- ▶ informace o elektrické vodivosti v Zemi
- ▶ rozložení teploty, obsah vody, chemické a mineralogické složení Země

Hlubkové sondování Země

- ▶ časové změny vnějšího geomagnetického pole
- ▶ sekundární proudy
- ▶ porovnáním signálů odpovídajících primárním a sekundárním proudům můžeme získat informace o elektrické vodivosti v Zemi
- ▶ rozložení teploty, obsah vody, chemické a mineralogické složení Země

Hlubkové sondování Země

- ▶ časové změny vnějšího geomagnetického pole
- ▶ sekundární proudy
- ▶ informace o elektrické vodivosti v Zemi
- ▶ znalost elektrické vodivosti pomáhá zpřesnit informace o dalších geofyzikálních parametrech, jako je rozložení teploty, obsah vody, chemické a mineralogické složení Země

Osnova

Historický úvod

Časové změny geomagnetického pole

Jak vzniká geomagnetické pole?

Magnetické pole v blízkém okolí Země

Elektromagnetická indukce

Satelitní éra

Měření geomagnetického pole na družicích
Satelity vyprávějí

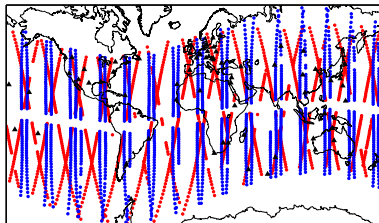
Měření geomagnetického pole na družicích

- ▶ pozemní geomagnetické observatoře
- ▶ pro geofyzikální výzkum jsou vhodné družice na nízkých oběžných drahách

Měření geomagnetického pole na družicích

- ▶ pozemní geomagnetické observatoře
 - + dlouhodobé časové řady z jednoho místa
 - drahý provoz
 - nestejnorodá kvalita dat
 - nedokonalé a nerovnoměrné pokrytí (především oceány a jižní polokoule)
- ▶ pro geofyzikální výzkum jsou vhodné družice na nízkých oběžných drahách

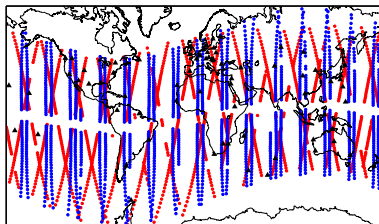
30.11. 2001, 73 pozemních stanic, Ørsted a CHAMP



Měření geomagnetického pole na družicích

- ▶ pozemní geomagnetické observatoře
 - + dlouhodobé časové řady z jednoho místa
 - drahý provoz
 - nestejnorodá kvalita dat
 - nedokonalé a nerovnoměrné pokrytí (především oceány a jižní polokoule)
- ▶ pro geofyzikální výzkum jsou vhodné družice na nízkých oběžných drahách

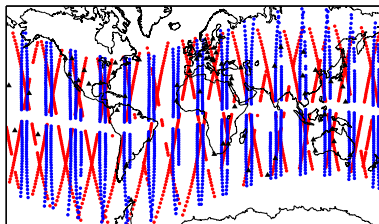
30.11. 2001, 73 pozemních stanic, Ørsted a CHAMP



Měření geomagnetického pole na družicích

- ▶ pozemní geomagnetické observatoře
 - + dlouhodobé časové řady z jednoho místa
 - drahý provoz
 - nestejnorodá kvalita dat
 - nedokonalé a nerovnoměrné pokrytí (především oceány a jižní polokoule)
- ▶ pro geofyzikální výzkum jsou vhodné družice na nízkých oběžných drahách

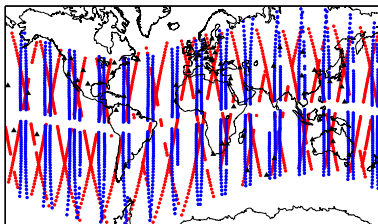
30.11. 2001, 73 pozemních stanic, Ørsted a CHAMP



Měření geomagnetického pole na družicích

- ▶ pozemní geomagnetické observatoře
 - + dlouhodobé časové řady z jednoho místa
 - drahý provoz
 - nesterjnorodá kvalita dat
 - nedokonalé a nerovnoměrné pokrytí (především oceány a jižní polokoule)
- ▶ pro geofyzikální výzkum jsou vhodné družice na nízkých oběžných drahách

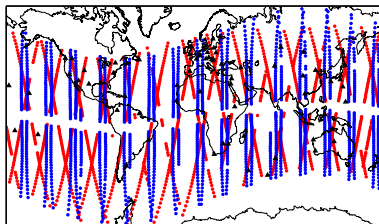
30.11. 2001, 73 pozemních stanic, Ørsted a CHAMP



Měření geomagnetického pole na družicích

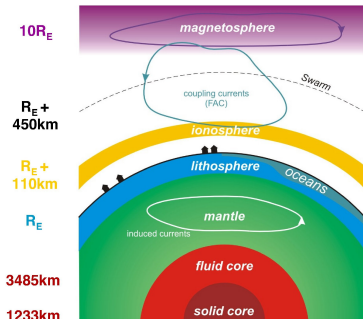
- ▶ pozemní geomagnetické observatoře
 - + dlouhodobé časové řady z jednoho místa
 - drahý provoz
 - nestejnorodá kvalita dat
 - nedokonalé a nerovnoměrné pokrytí (především oceány a jižní polokoule)
- ▶ pro geofyzikální výzkum jsou vhodné družice na nízkých oběžných drahách

30.11. 2001, 73 pozemních stanic, Ørsted a CHAMP



Měření geomagnetického pole na družicích

- ▶ pozemní geomagnetické observatoře
- ▶ pro geofyzikální výzkum jsou vhodné družice na nízkých oběžných drahách
 - 1979–80 MAGSAT
 - 1999– Ørsted
 - 2000– CHAMP
 - 2009– SWARM (3 družice)
 - ▶ rovnoměrné pokrytí přesnými měřeními



Měření geomagnetického pole na družicích

- ▶ pozemní geomagnetické observatoře
- ▶ pro geofyzikální výzkum jsou vhodné družice na nízkých oběžných drahách

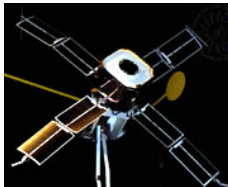
1979–80 MAGSAT

1999– Ørsted

2000– CHAMP

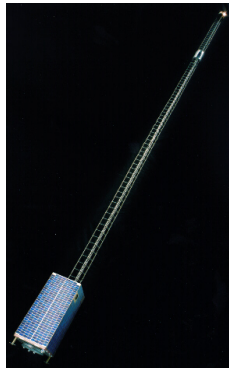
2009– SWARM (3 družice)

- ▶ rovnoměrné pokrytí přesnými měřeními



Měření geomagnetického pole na družicích

- ▶ pozemní geomagnetické observatoře
- ▶ pro geofyzikální výzkum jsou vhodné družice na nízkých oběžných drahách
 - 1979–80 MAGSAT
 - 1999– Ørsted
 - 2000– CHAMP
 - 2009– SWARM (3 družice)
 - ▶ rovnoměrné pokrytí přesnými měřeními



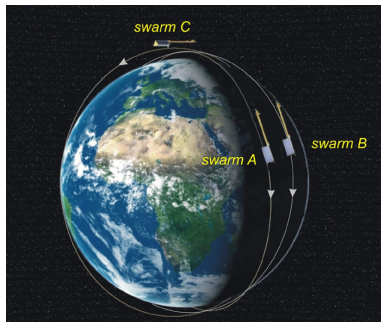
Měření geomagnetického pole na družicích

- ▶ pozemní geomagnetické observatoře
- ▶ pro geofyzikální výzkum jsou vhodné družice na nízkých oběžných drahách
 - 1979–80 MAGSAT
 - 1999– Ørsted
 - 2000– CHAMP
 - 2009– SWARM (3 družice)
 - ▶ rovnoměrné pokrytí přesnými měřeními



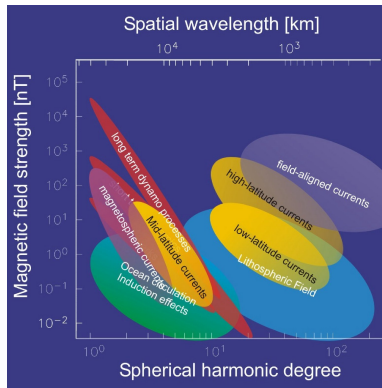
Měření geomagnetického pole na družicích

- ▶ pozemní geomagnetické observatoře
- ▶ pro geofyzikální výzkum jsou vhodné družice na nízkých oběžných drahách
 - 1979–80 MAGSAT
 - 1999– Ørsted
 - 2000– CHAMP
 - 2009– SWARM (3 družice)
 - ▶ rovnoměrné pokrytí přesnými měřeními



Měření geomagnetického pole na družicích

- ▶ pozemní geomagnetické observatoře
- ▶ pro geofyzikální výzkum jsou vhodné družice na nízkých oběžných drahách
 - 1979–80 MAGSAT
 - 1999– Ørsted
 - 2000– CHAMP
 - 2009– SWARM (3 družice)
 - ▶ rovnoměrné pokrytí přesnými měřeními

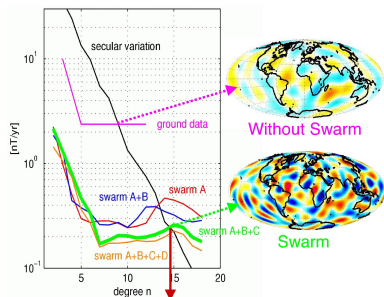


Satelity vyprávějí

- ▶ o geodynamu
- ▶ o magnetizaci litosféry
- ▶ o vodivosti pláště

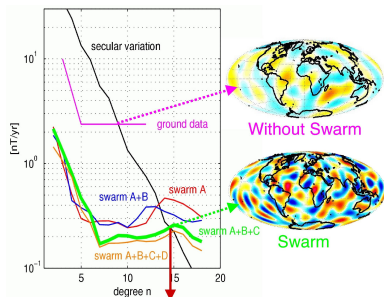
Satelity vyprávějí

- ▶ o geodynamu
 - ▶ zpřesní znalost hlavního pole a sekulární variace
 - ▶ tyto údaje lze přepočítat na povrch jádra a odvodit z nich např. rozložení rychlostí na tomto rozhraní
 - ▶ hraniční podmínky jsou klíčové pro numerické řešení geodynamu, pochopení a modelování sekulární variace, inverzí, toroidálních kmitů, geomagnetických impulsů a dalších jevů v jádře
- ▶ o magnetizaci litosféry
- ▶ o vodivosti pláště



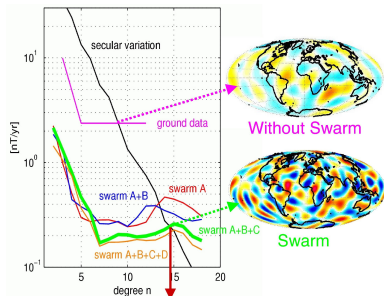
Satelity vyprávějí

- ▶ o geodynamu
 - ▶ zpřesní znalost hlavního pole a sekulární variace
 - ▶ tyto údaje lze přepočítat na povrch jádra a odvodit z nich např. rozložení rychlostí na tomto rozhraní
 - ▶ hraniční podmínky jsou klíčové pro numerické řešení geodynamu, pochopení a modelování sekulární variace, inverzí, toroidálních kmitů, geomagnetických impulsů a dalších jevů v jádře
- ▶ o magnetizaci litosféry
- ▶ o vodivosti pláště



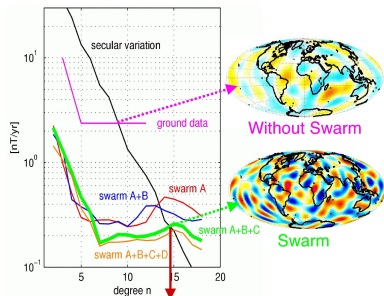
Satelity vyprávějí

- ▶ o geodynamu
 - ▶ zpřesní znalost hlavního pole a sekulární variace
 - ▶ tyto údaje lze přepočítat na povrch jádra a odvodit z nich např. rozložení rychlostí na tomto rozhraní
 - ▶ hraniční podmínky jsou klíčové pro numerické řešení geodynamu, pochopení a modelování sekulární variace, inverzí, toroidálních kmitů, geomagnetických impulsů a dalších jevů v jádře
- ▶ o magnetizaci litosféry
- ▶ o vodivosti pláště



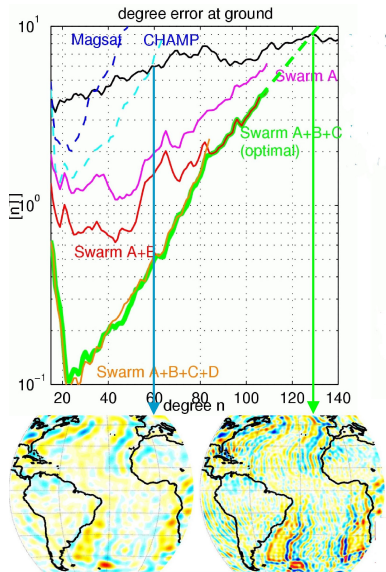
Satelity vyprávějí

- ▶ o geodynamu
 - ▶ zpřesní znalost hlavního pole a sekulární variace
 - ▶ tyto údaje lze přepočítat na povrch jádra a odvodit z nich např. rozložení rychlostí na tomto rozhraní
 - ▶ hraniční podmínky jsou klíčové pro numerické řešení geodynamu, pochopení a modelování sekulární variace, inverzí, toroidálních kmitů, geomagnetických impulsů a dalších jevů v jádře
- ▶ o magnetizaci litosféry
- ▶ o vodivosti pláště



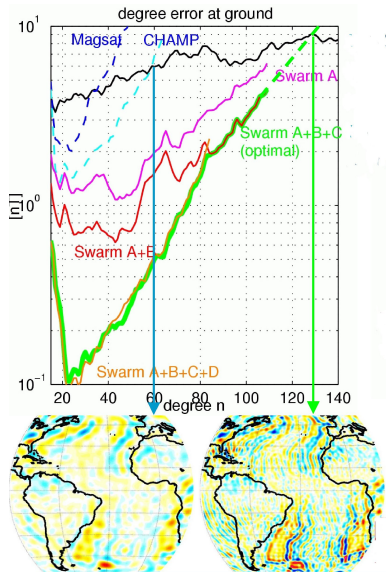
Satelity vyprávějí

- ▶ o geodynamu
- ▶ o magnetizaci litosféry
 - ▶ prostorové rozlišení až 360 km (očekává se od SWARMu)
 - ▶ plynule naváže na měření z letadel
 - ▶ pomůže pochopit tektonické a geologické souvislosti
- ▶ o vodivosti pláště



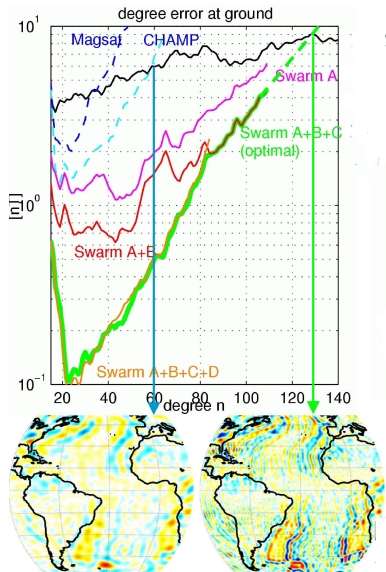
Satelity vyprávějí

- ▶ o geodynamu
- ▶ o magnetizaci litosféry
 - ▶ prostorové rozlišení až 360 km (očekává se od SWARMu)
 - ▶ plynule naváže na měření z letadel
 - ▶ pomůže pochopit tektonické a geologické souvislosti
- ▶ o vodivosti pláště



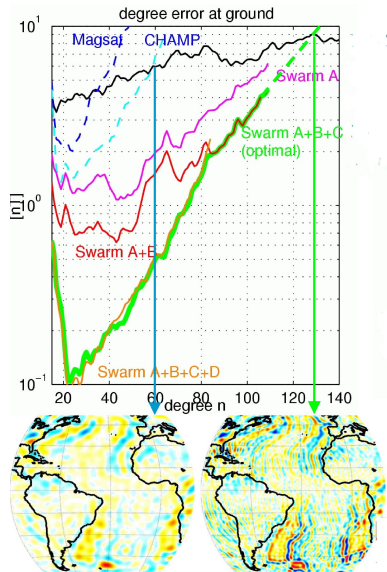
Satelity vyprávějí

- ▶ o geodynamu
- ▶ o magnetizaci litosféry
 - ▶ prostorové rozlišení až 360 km (očekává se od SWARMu)
 - ▶ plynule naváže na měření z letadel
 - ▶ pomůže pochopit tektonické a geologické souvislosti
- ▶ o vodivosti pláště



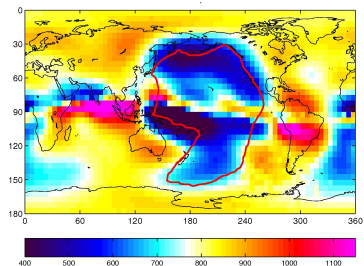
Satelity vyprávějí

- ▶ o geodynamu
- ▶ o magnetizaci litosféry
 - ▶ prostorové rozlišení až 360 km (očekává se od SWARMu)
 - ▶ plynule naváže na měření z letadel
 - ▶ pomůže pochopit tektonické a geologické souvislosti
- ▶ o vodivosti pláště



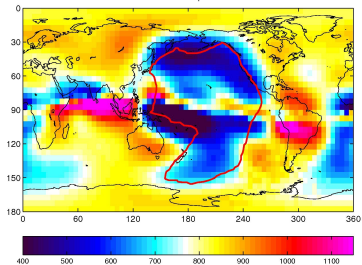
Satelity vyprávějí

- ▶ o geodynamu
- ▶ o magnetizaci litosféry
- ▶ o vodivosti pláště
 - ▶ z pozemních dat jsme schopni získat pouze hloubkovou závislost
 - ▶ družice umožní získat 3-D obraz vodivosti v plášti



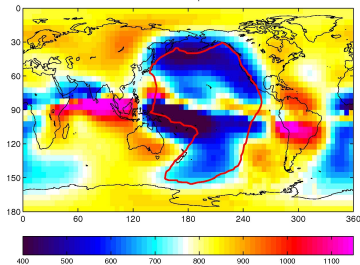
Satelity vyprávějí

- ▶ o geodynamu
- ▶ o magnetizaci litosféry
- ▶ o vodivosti pláště
 - ▶ z pozemních dat jsme schopni získat pouze hloubkovou závislost
 - ▶ družice umožní získat 3-D obraz vodivosti v plášti



Satelity vyprávějí

- ▶ o geodynamu
- ▶ o magnetizaci litosféry
- ▶ o vodivosti pláště
 - ▶ z pozemních dat jsme schopni získat pouze hloubkovou závislost
 - ▶ družice umožní získat 3-D obraz vodivosti v plášti



Poděkování

- ▶ většina ilustrací převzata ze stránek:
- ▶ navštivte stránky Katedry geofyziky MFF UK
<http://geo.mff.cuni.cz/>

Poděkování

- ▶ většina ilustrací převzata ze stránek:
- ▶ navštivte stránky Katedry geofyziky MFF UK
<http://geo.mff.cuni.cz/>

Poděkování

- ▶ většina ilustrací převzata ze stránek:
 - ▶ The Great Magnet, The Earth (<http://www.phy6.org/Education/Intro.html>)
 - ▶ stránky družice Ørsted (<http://web.dmi.dk/fsweb/projects/oersted/>)
 - ▶ stránky družice CHAMP (<http://isdc.gfz-potsdam.de/champ/>)
 - ▶ stránky projektu SWARM (<http://www.esa.int/esaLP/LPswarm.html>)
 - ▶ od Ctirada Matysky a dalších
- ▶ navštivte stránky Katedry geofyziky MFF UK <http://geo.mff.cuni.cz/>

Poděkování

- ▶ většina ilustrací převzata ze stránek:
 - ▶ The Great Magnet, The Earth
(<http://www.phy6.org/Education/Intro.html>)
 - ▶ stránky družice Ørsted
(<http://web.dmi.dk/fsweb/projects/oersted/>)
 - ▶ stránky družice CHAMP (<http://isdc.gfz-potsdam.de/champ/>)
 - ▶ stránky projektu SWARM
(<http://www.esa.int/esaLP/LPswarm.html>)
 - ▶ od Ctirada Matysky a dalších
- ▶ navštivte stránky Katedry geofyziky MFF UK
<http://geo.mff.cuni.cz/>

Poděkování

- ▶ většina ilustrací převzata ze stránek:
 - ▶ The Great Magnet, The Earth (<http://www.phy6.org/Education/Intro.html>)
 - ▶ stránky družice Ørsted (<http://web.dmi.dk/fsweb/projects/oersted/>)
 - ▶ stránky družice CHAMP (<http://isdc.gfz-potsdam.de/champ/>)
 - ▶ stránky projektu SWARM (<http://www.esa.int/esaLP/LPswarm.html>)
 - ▶ od Ctirada Matysky a dalších
- ▶ navštivte stránky Katedry geofyziky MFF UK <http://geo.mff.cuni.cz/>

Poděkování

- ▶ většina ilustrací převzata ze stránek:
 - ▶ The Great Magnet, The Earth
(<http://www.phy6.org/Education/Intro.html>)
 - ▶ stránky družice Ørsted
(<http://web.dmi.dk/fsweb/projects/oersted/>)
 - ▶ stránky družice CHAMP (<http://isdc.gfz-potsdam.de/champ/>)
 - ▶ stránky projektu SWARM
(<http://www.esa.int/esaLP/LPswarm.html>)
 - ▶ od Ctirada Matysky a dalších
- ▶ navštivte stránky Katedry geofyziky MFF UK
<http://geo.mff.cuni.cz/>

Poděkování

- ▶ většina ilustrací převzata ze stránek:
 - ▶ The Great Magnet, The Earth (<http://www.phy6.org/Education/Intro.html>)
 - ▶ stránky družice Ørsted (<http://web.dmi.dk/fsweb/projects/oersted/>)
 - ▶ stránky družice CHAMP (<http://isdc.gfz-potsdam.de/champ/>)
 - ▶ stránky projektu SWARM (<http://www.esa.int/esaLP/LPswarm.html>)
 - ▶ od Ctirada Matysky a dalších
- ▶ navštivte stránky Katedry geofyziky MFF UK <http://geo.mff.cuni.cz/>

Poděkování

- ▶ většina ilustrací převzata ze stránek:
- ▶ navštivte stránky Katedry geofyziky MFF UK
<http://geo.mff.cuni.cz/>

Poděkování

- ▶ většina ilustrací převzata ze stránek:
- ▶ navštivte stránky Katedry geofyziky MFF UK
<http://geo.mff.cuni.cz/>

