

# Země je veliký magnet

*Alena Janáčková, Praha*

## I. Poznávání zemského magnetismu

Skoro každý člověk zná již od dětství pomůcku pro orientaci v přírodě — kompas. Ne každý si však položí otázku, čím to je, že střílka míří právě k severu. Je dokonce možné, že těch, kteří si takovou nicotnou otázku kladou, s postupujícím technickým rozvojem ubývá. A přece je to jedna z největších záhad naší planety, a nejen jí. I většina ostatních planet má magnetická pole, má je Slunce a ví se i o magnetických polích některých hvězd. Mechanismy, kterými jsou tato pole buzena, jsou stále ještě spíše tušeny než známy, přestože se jejich výzkum v posledních desetiletích rozrostl ve složitou a napínavou vědu.

Působení neznámé síly na magnet provokovalo zájem učenců již ve starověku. Je to patrné například z encyklopedického díla „Naturalis historia“ od C. Plinia Staršího, který žil v 1. století po Kristu. Ostatně samo slovo „magnet“ pochází ze starověku: Magnetit se tehdy nazýval „lapis Magnes“ podle starověkého maloasijského města Magnesie, kde byla jeho naleziště. Přitažlivé působení magnetu znali např. Thales a Hippokrates. Magnetu byly připisovány léčivé účinky, magnetickou střílku však starověk neznal.

Ve středověku jev magnetismu podnítl jedno z prvních velkých děl experimentálního výzkumu, pojednání nazvané „Epistola Petri Peregrini de Maricourt ad Sygarum de Foucancourt, militem, de magnete“. Petrus Peregrinus, který žil ve 13. století, byl francouzský učenec a voják (účastník jedné z křížových výprav). Ve svém „Dopise o magnetu“ poprvé definoval dipolární povahu magnetu, popsal vzájemné působení pólů a přístroje, které umožňují využití magnetu. Vyvrátil představu, že magnetka je přitahována magnetickými horami, jež údajně existují kdesi na severu. Peregrina můžeme pokládat za předchůdce tvůrců moderní vědecké metodologie.

Dalším velkým přírodovědcem, který se věnoval studiu zemského magnetismu, byl W. Gilbert, lékař anglické královny Alžběty I. Napsal a v roce 1600 vydal obsáhlou monografii, jejíž dlouhý název začíná slovy „De magnete“. Jeho úvahy byly založeny na pokusu. Srovnával pole koule vyrobené z magnetitu s magnetickým polem Země. Přestože měl k dispozici poměrně malý počet měření směru zemského pole, učinil naprosto správný závěr: Magnetické pole Země je svým prostorovým uspořádáním analogické poli koule z magnetitu, a tedy „Země sama je veliký magnet“.

---

RNDr. ALENA JANÁČKOVÁ, CSc. (1932), katedra geofyziky MFF UK, 180 00 Praha 8, V Holešovičkách 2.

Zemským magnetismem se zabýval také známý astronom E. Halley. Zorganizoval dvě výzkumné plavby křížem krážem Atlantickým oceánem, aby podrobně prozkoumal, jak se tam mění směr magnetické střelky. V jeho době bylo totiž už dlouho známo, že magnetická střelka nemíří přesně k severu a že se její odchylky od severního směru, dnes nazývané magnetická deklinace, místo od místa mění. Jeho plavby byly možná první výzkumné plavby v dějinách. Halley rozeznal, že některé prvky pole zemského magnetismu se s postupujícím časem posouvají k západu, a z toho s podivuhodnou jasnozřivostí usoudil, že Země má „jádro“, které je nositelem magnetismu, a že toto jádro se opožďuje v rotaci za vnější vrstvou Země. Svoje závěry publikoval v roce 1698, ale nesetkal se tehdy s kladnou odezvou. Dnes je zřejmé, že jeho představy byly velmi blízko pravdě.

Magnetické pole Země bývá nazýváno geomagnetické pole. Budeme pro ně používat zkratky GMP.

## II. Geomagnetické práce C. F. Gausse

K poznání GMP podstatně přispěl slavný matematik a fyzik C. F. Gauss. Vypracoval matematický postup, který umožňuje vypočítat geomagnetický vektor v libovolném bodě na Zemi nebo i nad ní, jestliže máme k dispozici určitý konečný počet měření. Výpočet je ovšem tím přesnější, čím větší je počet bodů, v nichž se měřilo, a rozložení měřicích bodů musí být co nejrovnoměrnější. Gaussův postup umožňuje také rozeznat, zdali GMP je buzeno jen uvnitř Země nebo také mimo ni. Tuto práci vydal Gauss v roce 1839 v knize „Allgemeine Theorie des Erdmagnetismus“ (Obecná teorie zemského magnetismu).

Gaussův postup ukázal, že převážná část GMP (asi 90 %) je taková, jako kdyby ji budil tzv. elementární magnetický dipól. Tento pojem si můžeme s trochou nepřesnosti přiblížit představou tyčového magnetu. Dipól je umístěn přibližně ve středu Země a svírá s její osou malý úhel (v současné době je to asi  $11^\circ$ ). Gilbertův výrok, že Země sama je magnet, došel takto matematického potvrzení.

Další a neméně významný Gaussův přínos patří do experimentální oblasti. Do jeho doby se měřil jen směr geomagnetického vektoru, totiž deklinace a inklinace. (Inklinace je sklon vektoru GMP pod horizontální rovinu.) Gauss vyřešil úlohu podstatně složitější, a to měření velikosti vektoru GMP. Působení zemského magnetismu na magnetickou střelku se do té doby měřilo jen *relativně* (větší – menší), a to v jednotkách zcela neočekávaných — v sekundách. Vědělo se, že magnetka, je-li vychýlena z rovnovážné polohy, určené silou zemského magnetismu, kmitá kolem této polohy s frekvencí, která je větší tam, kde je pole silnější. (Velikost magnetické indukce je úměrná dvojnásobku frekvence, je to analogie vztahu mezi dobou kyvu kyvadla a tíhovým polem.)

GMP se tedy dříve měřilo v sekundách. Takto postupoval ještě Alexander von Humboldt, když zkoumal zemský magnetismus na svých výzkumných přírodovědeckých cestách. (Byl to právě on, kdo přinášel Gaussovi takto změřené hodnoty GMP z různých oblastí světa.) Gauss vymyslel způsob, jak *číselně* určit silové působení zemského magnetismu, a to nezávisle na mechanických i magnetických vlastnostech měřicího

magnetu. V souvislosti s touto prací vybudoval první systém fyzikálních jednotek, tzv. Gaussovu absolutní soustavu fyzikálních jednotek, v níž byly všechny fyzikální veličiny vyjádřeny v jednotkách délky, hmotnosti a času. Jednotka pro magnetickou indukci byla na jeho počest nazvána gauss. (Dnes je to tesla.)

### III. Časová proměnlivost geomagnetického pole

GMP je na první dojem mírně nesympatické tím, že se s časem mění, a to způsobem, který dlouho odolával rozumnému utřídění. Je to však právě tato jeho vlastnost, jež je činí mnohonásobně užitečným.

#### a) Rychlé změny GMP

Především se vraťme k možnosti, kterou nadhodil sám Gauss, že by část pole mohla být buzena vně Země. On sám se o tento výpočet nepokusil, ale pozdější autoři to učinili a dodnes činí. (Gaussův postup se totiž stal podkladem pro mezinárodní projekt přesného výpočtu GMP, který se od roku 1965 pravidelně opakuje po 5 letech.)

Jestliže jsou podkladem výpočtu průměrné roční hodnoty pole, ukazuje se, že určitá část pole je buzena vně Země, ale obnáší nanejvýš 2 % celkové hodnoty. Není o mnoho větší než celková chyba pozorování a výpočtu. Přesto víme, že pole vnějších zdrojů skutečně existuje, a to podle jeho nápadných rychlých časových změn. Ty se v ročních průměrech neprojeví. Je to pole elektrických proudů, které tekou v ionizovaných vrstvách vysoké atmosféry (v tzv. ionosféře). Tyto proudy podléhají vnějším vlivům a svými změnami vyvolávají rychlé časové změny neboli variace v GMP.

Vlivy, které prostřednictvím ionosféry působí na GMP, jsou dvojího druhu. Jednak jsou to trvale se opakující slapové pohyby vysoké atmosféry, působené přitažlivostí Slunce a Měsíce (podobně jako slapy v oceánech), a rovněž periodicky proměnný ohřev denní strany vysoké atmosféry. Tyto vlivy vyvolávají v GMP variace s periodou denní a roční. Za druhé jde o poruchové, málo pravidelné vlivy erupční aktivity na Slunci. Při slunečních erupcích jsou ze Slunce vyvrhovány proudy elektricky nabitých částic. Jakmile se Země dostane do takového proudu, vznikne složité vzájemné působení mezi magnetickým polem Země a rychle letícími nabitými částicemi. Na zemském povrchu v důsledku toho dochází k jevům známým jako magnetické poruchy a bouře. Ve vysokých zeměpisných šířkách bývají doprovázeny polárními zářemi.

Periodické i poruchové rychlé změny GMP umožňují výzkum elektrické vodivosti uvnitř Země. Tento výzkum je založen na jevu elektromagnetické indukce. Rychlé změny magnetického pole vně Země indukují v materiálu Země, jenž je elektricky vodivý, elektrické proudy. Ty mají opět svá magnetická pole, rovněž časově proměnná. Na povrchu Země se měří variace GMP, jež jsou součtem obojích změn, těch primárních — vnějších i sekundárních — indukovaných. Gaussovou metodou se dá zjistit podíl té které složky celkové variace. Poměr indukované složky ke složce primární vypovídá o elektrické vodivosti až do hloubek zhruba 1000 km. Elektrická vodivost je veličina,

kteřá charakterizuje materiál, takže GMP takto přispívá k poznání složení hlubších vrstev Země.

## b) Dlouhodobé změny GMP

Střední roční hodnoty GMP se s časem pomalu, ale systematicky mění. Je to dlouhodobá, tzv. sekulární variace GMP. Projevuje se hlavně v nedipólové části pole, tj. té části, která tvoří odchylky od pravidelného průběhu pole dipólu („magnetu“ ve středu Země). Čáry stejných hodnot (tzv. izočáry) nedipólového pole tvoří na zemské povrchu různě velká oka. Těch největších je šest. Tato oka se po povrchu Země pomalu posouvají, a to převážně k západu. Tento jev, zvaný západní drift, je to, co objevil již Halley koncem 17. století. Průměrná rychlost západního driftu je  $0,2^\circ$  za rok.

## IV. Geomagnetické pole v geologické minulosti

Některé horniny na zemském povrchu jsou silně magnetické (např. magnetit). Kdybychom takovou horninu odmagnetovali (např. vysokou teplotou nebo polem elektrického proudu) a pak čekali, že se působením zemského magnetismu opět zmagnetizuje, nedočkali bychom se. GMP je na to za normálních okolností slabé. A přece byla hornina kdysi zmagnetována právě jím, i když bylo řádově stejně silné jako dnes. K takové zvláštní magnetizaci může dojít za té situace, že hornina vyvře ze Země jako tavenina a potom na zemském povrchu chladne a tuhne. Ve chvíli, kdy zchladne pod určitou kritickou teplotu (Curieovu teplotu), získá od působícího magnetického pole velmi silnou a velmi trvanlivou magnetizaci, jakou by ve stavu pevném nemohla získat. Tato tzv. termoremanentní magnetizace má směr pole, které ji způsobilo.

Stáří horniny, tj. doba, která uplynula od jejího ztuhnutí, se dá zjistit geofyzikálními metodami, které jsou založeny na rychlosti rozpadu radioaktivních izotopů prvků obsažených v hornině. Když změříme v datované hornině směr magnetizace, známe i směr pole, jež působilo v místě naleziště horniny v době, dané stářím horniny. S poměrně velkou přesností se dá speciálními metodami poznat i velikost pole, které vyvolalo termoremanentní magnetizaci. Ve vyvřelých horninách je tedy zapsána historie zemského magnetického pole.

Nejstarší hornina, u které byla zjištěna magnetizace, má věk 3,5 miliardy let. Nejméně tak staré je tedy magnetické pole Země. (Země sama trvá ve své nynější velikosti 4,6 miliard let.)

Výzkumem GMP v geologické minulosti se zabývá odvětví geofyziky nazývané *paleomagnetismus*.

## V. Výsledky paleomagnetismu

Výsledky paleomagnetismu jsou neocenitelnou pomocí při odhalování minulosti Země.

### a) Putování kontinentů

Směr magnetizace horniny umožňuje spočítat, kde byl v době jejího vzniku pól dipólového pole. (K tomu je jen nutno přijmout dosti pravděpodobný předpoklad, že pole bylo i v době vzniku horniny dipólové.) Pól dipólového pole se obecně jmenuje geomagnetický pól, když pak jde o takovýto pól z geologické minulosti, říká se mu paleomagnetický pól.

Horniny vzniklé ve čtvrtohorách (1,5 až 2 miliony let) ukazují, že v tomto období byly paleomagnetické póly stále v blízkosti pólů geografických. Výsledky jsou stejné, ať jde o horninu z kterékoli lokality na Zemi. Jde-li se však dále do minulosti, tzn. do třetihor, druhohor atd., paleomagnetické póly se od geografických systematicky vzdalují, někdy ovšem po značně složitých křivkách. Tyto křivky byly nazvány „dráhy putování pólů“. Když však porovnáme dráhy, které byly určeny horninami z lokalit vzájemně hodně vzdálených, zejména z různých kontinentů, těžko uvěříme, že paleomagnetické póly skutečně „putovaly“. Kdyby tomu tak bylo, musely by dráhy z různých lokalit ukazovat alespoň v hrubých mezích stejnou cestu pólu po povrchu Země. Skutečnost je zcela jiná, dráhy se velmi liší.

Aby nebyla zpochybněna paleomagnetická metoda, byl přijat tento předpoklad: Paleomagnetický pól setrval i ve vzdálenější minulosti v blízkosti pólu zeměpisného, stejně jako později ve čtvrtohorách. Co putovalo, nebyl paleomagnetický pól, nýbrž naleziště hornin. Tato místa se pohybovala jednak vzhledem k rotačnímu pólu Země, jednak vzájemně vůči sobě. Dráhy putování pólů jsou tedy jen zdánlivé. Porovnáním drah z různých kontinentů (nebo i z různých částí jednoho dnešního kontinentu) se dá za uvedeného předpokladu rekonstruovat vzájemný pohyb nalezišť, jakož i jejich pohyb vzhledem k zeměpisnému pólu, tj. změna jejich zeměpisné šířky. (Zeměpisná délka v geologické minulosti se určit nedá.)

Popsaný předpoklad by se mohl jevit i při veškeré své příhodnosti velmi odvážným. Byl však podpořen jiným paleomagnetickým objevem.

### b) Inverze geomagnetického pole. Rozšiřování mořského dna

Paleomagnetická měření ukázala, že velikost GMP byla v minulosti vždy řádově stejná jako v současné době. Polarita pole se však čas od času měnila. To znamená, že ten konec magnetické střílky, který nyní míří k severu, v určitých obdobích mířil k jihu. Změna polarity GMP se nazývá *geomagnetická inverze*.

Období mezi inverzemi jsou různé dlouhá. Poslední inverze proběhla asi před 700 000 let, tj. ve čtvrtohorách. Předtím po dobu zhruba jednoho milionu let mělo GMP opačnou polaritu než dnes. V období druhohor, před 85 miliony let, skončilo velmi

dlouhé období stále stejné polarity. Trvalo asi 40 milionů let a polarita byla tehdy stejná jako dnes.

Průběh inverze vypadá tak, že velikost dipólu poměrně rychle klesá až na úroveň velikosti nedipólové části pole. Později opět vzroste, ale v opačné polaritě. Celý proces trvá tisíce až desetitisíce let.

Jev geomagnetických inverzí přinesl na začátku 60. let objev skutečnosti, která souvisí s dříve zmíněným putováním kontinentů. Při studiu magnetizace hornin oceánského dna bylo zjištěno, že podél tzv. oceánských hřbetů (jakým je např. známý středoatlantický hřbet) se táhnou pásy magnetických anomálií se střídavou polaritou magnetizace. Pásy jsou vždy po obou stranách hřbetu. Měřeními stáří zkoumaných hornin se dále zjistilo, že horniny ležící v ose hřbetu jsou nejmladší, se vzdáleností od hřbetu na obě strany stáří hornin vzrůstá. Střídání polarity anomálních pásů je svědectvím o proběhlých inverzích GMP. Závislost stáří hornin na vzdálenosti od hřbetu je dokladem o tom, že ve hřbetu vzniká nová zemská kůra z materiálu, který přichází z hloubky v roztaveném stavu, na povrchu pak tuhne a přitom získává termoremanentní magnetizaci od právě působícího pole. Tento děj probíhá stále, takže zemská kůra, která vzniká ve středu hřbetu, je stále odsouvána do stran dalšími a dalšími výlevy nového materiálu. Pružové magnetické anomálie na oceánských dnech jsou tedy záznamem jevu, který nazýváme rozšiřování mořského dna. Při něm se velké bloky pevné svrchní vrstvy Země neboli litosféry posouvají po plastičtější vrstvě zvané astenosféra. Kontinenty, součásti těchto bloků, zvaných též desky, tedy skutečně putují po zemském povrchu. Rozšiřování litosféry v místech oceánských hřbetů je na jiných místech zemského povrchu kompenzováno vzájemným podsouváním (subdukcí) oceánských desek do hloubky pod desky sousední. Zóny subdukce se vyznačují častým výskytem zemětřesení.

## VI. Závěr

Výzkum zemského magnetismu přinesl cenné poznatky o Zemi a jejím vývoji. Nejsložitější geomagnetický problém — původ geomagnetického pole — je řešen řadou špičkových vědeckých týmů a je již do velké míry osvětlen, nedá se však říci, že by byl vyřešen. Je všeobecná shoda o tom, že zemský magnetismus pochází z oblasti tzv. zemského jádra, které je uvnitř Země od hloubky 2900 km a jehož vnější vrstva je podle výsledků seismologie kapalná. Materiál této části Země je elektricky vysoce vodivý. V této vodivé kapalině probíhají určité pohyby. Energie pro ně se patrně uvolňuje při pomalém tuhnutí kapalně vrstvy jádra. Tato vrstva podle současných představ tuhne odspoda v důsledku pomalého chladnutí Země.

Předpokladem pro možnost děje, kterým se vznik GMP vysvětluje a který byl nazván „zemské magnetické dynamo“, je původní existence nějakého, byť velmi slabého magnetického pole v prostoru Země. Takovým původním slabým polem může být např. magnetické pole Slunce nebo Galaxie. Tím se ovšem problém jen odsouvá a neřeší, avšak fyzikální otázka se tím stává spíše filozofickou a na tomto místě nemůže být řešena.

Vzájemné působení pohybů vodivé kapaliny a magnetického pole za příznivých okolností může, jak bylo teoreticky prokázáno, původní slabé pole zesilovat a udržovat. Protože geomagnetické pole existuje, a to již velmi dlouho, a protože jiného vysvětlení není, přijímá se představa zemského magnetického dynama. Vyhovuje po mnoha stránkách. Rovnice, kterými se pohyby i elektromagnetické pole v jádře řídí, připouštějí inverze pole, vysvětlují, proč je zemský dipól svým směrem blízky zemské rotační ose, a přijatelně se jimi dá vysvětlit i západní drift nedipólového pole.

## L i t e r a t u r a

- [1] JACOBS, J. A.: *Reversals of the Earth's Magnetic Field*. Bristol, Adam Hilger 1984.
- [2] PARKINSON, W. D.: *Introduction to Geomagnetism*. Scottish Academic Press, Edinburgh and London, 1983.
- [3] CHAPMAN, S., BARTELS, J.: *Geomagnetism*. Oxford, Clarendon Press, 1940.

# Pulzní metoda jaderné magnetické rezonance a její užití v MR tomografii

*Jiří English, Praha*

## 1. Úvod

Metoda jaderné magnetické rezonance (NMR) je jednou z nejdůležitějších experimentálních metodik v oblasti radiofrekvenční spektroskopie kondenzovaných látek.

Pod pojmem spektroskopie rozumíme obvykle metody studia vlastností a struktury látek prostřednictvím jejich interakce s elektromagnetickým polem. Historicky nejstarší oblastí spektroskopie byla spektroskopie v oboru viditelného světla. S rozšiřováním okruhu zájmů moderních přírodních věd se rozšiřoval jak frekvenční rozsah užívaného elektromagnetického záření, tak i množina experimentálních metodik zařaditelných do kategorie spektroskopických metod. V současné době hovoříme například o spektroskopii jaderné, spektroskopii rentgenovské, spektroskopii v oblasti ultrafialového a viditelného záření, spektroskopii infračervené a spektroskopii radiofrekvenční.

---

Doc. RNDr. JIŘÍ ENGLISH, CSc. (1943), katedra fyziky nízkých teplot MFF UK Praha, V Holešovičkách 2, 180 00 Praha 8.