

# Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

---

Ray Ladbury

Geodynamo směřuje ke stabilnímu magnetickému poli

*Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 41 (1996), No. 5, 262--265

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/138578>

## Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1996

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

# Geodynamo směřuje ke stabilnímu magnetickému poli

Ray Ladbury

*Simulace na superpočítači ukazují, že pohyby v kapalném jádře Země mohou udržet geomagnetické pole. Geofyzici jsou vzrušeni — a také si trochu oddechli; takovéto „geodynamo“ je jediným přijímaným vysvětlením geomagnetismu již po více než 40 let.*

Zemské magnetické pole je předmětem zájmu alespoň 3000 let a kvantitativního studia více než 400 let. Geologické vzorky nyní rozšířily naši znalost geomagnetismu na miliardy let a družice a stanice zachycují nejjemnější změny velikosti a směru geomagnetického pole. Výzkumy odhalily mnoho spletitých charakteristik geomagnetismu, které musí každý úspěšný model tohoto jevu umět vysvětlit — stabilitu geomagnetického pole v časovém rozsahu zhruba 100 000 let, převážně dipólový charakter pole, odchylku osy dipólu od zemské rotační osy, její časové změny atd. Všechny tyto geomagnetické údaje však jen málo napověděly, jak má model vzniku a udržování geomagnetismu vypadat.

Až v posledním století, a zejména v uplynulých 40 letech, pokročila znalost stavby a složení Země natolik, že umožnila navrhnout přijatelný mechanismus generující geomagnetismus. V tomto mechanismu — nazývaném geodynamo — působí kapalně, elektricky vodivé vnější jádro Země jako dynamo nebo generátor. Díky tomu, že vnější jádro rotuje vzhledem k Zemi, jež sama jako celek rovněž rotuje, a že v něm probíhá vnitřní proudění, protíná tato vnitřní vrstva Země již existující magnetické siločáry, čímž regeneruje geomagnetické pole na úkor kinetické energie kapaliny. Při pokusech pochopit tento kvalitativní mechanismus kvantitativně vzniká bohužel řada potíží. Komplikované nelineární magnetohydrodynamické rovnice, které popisují geodynamo, nemohou být řešeny přesně. Zjednodušené modely geodynamo, které linearizují nebo parametrizují nelineární efekty, poskytly důležité pohledy na jeho chování. Výsledky těchto modelů jsou však zpochybnitelné, částečně proto, že nelineární efekty pocházející z magnetických a dalších členů v rovnicích jsou příliš velké na to, aby mohly být zanedbány. Nízká viskozita kapaliny tvořící vnější jádro způsobuje další potíže, neboť změny, které umožňuje, jsou tak rychlé, že se nedají simulovat ani na nejvýkonnějších superpočítačích. Efekty spjaté s viskozitou také zabraňují laboratorní realizaci magnetického konvekčního dynama, protože v laboratorních měřítkách dominují viskózní vlastnosti nad magnetohydrodynamickými. Navzdory těmto potížím zůstává geodynamo jediným přijímaným mechanismem pro geomagnetismus. Jak říká

---

*Geodynamo Turns Toward a Stable Magnetic Field.* Physics Today 49 (1996), p. 17.

© American Institute of Physics 1996

Přeložili ALENA JANÁČKOVÁ a CTIRAD MATYSKA.

Peter Olson (John Hopkin's University), „konvekčně poháněné geodynamo se rychle stávalo zjevenou pravdou, aniž by někdo skutečně ukázal, že může fungovat.“

A právě to nedávno dokázali Gary Glatzmaier z Národní laboratoře v Los Alamos a Paul Roberts z Kalifornské univerzity v Los Angeles [1]. Vyvinuli dynamicky vnitřně konzistentní třírozměrný počítačový model, který je charakterizován Davidem Stevensonem z Kalifornské techniky jako „doposud nejpůsobivější a neúplnější pokus sestavit dynamický popis vývoje magnetického pole Země zahrnující víceméně realistické vlastnosti jádra“. Přestože je jejich model stále v počátečním stadiu svého vývoje, když na simulaci 40 000 let potřebovali 2 000 hodin času na superpočítači (typu Cray C-90 v Pittsburgském superpočítačovém centru), a třebaže je třeba udělat ještě hodně práce, než budeme vědět, do jaké míry odpovídá jejich simulace geodynamo skutečnému magnetismu Země, vykazuje jejich model chování a charakteristiky, které připomínají chování a charakteristiky zemského magnetického pole. Opravdu: některé prvky chování, zejména samovolné otočení polarity pole, ke kterému došlo po 38 000 letech času simulace, vypadají až krutě zemsky.

### Zjednodušení Země, ale ne příliš

V modelu Glatzmaiera a Robertse pohání konvekci ve vnějším jádře tepelný tok z pevného, elektricky vodivého vnitřního jádra. Kapalně vnější jádro je u hranice s pláštěm shora ohraničeno hladkou, tenkou, pevnou, elektricky vodivou vrstvičkou, která je pevně spojena s nevodivým pláštěm. Celý systém rotuje kolem osy v počátečním, libovolně zvoleném, nenulovém magnetickém poli. Magnetické, viskózní a další momenty mohou způsobit, že vnitřní jádro, vnější jádro a plášť rotují rozdílnými rychlostmi při zachování celkového momentu hybnosti. Úhlové a radiální závislosti odpovídajících proměnných — jako je magnetické pole, proudění hmoty a termodynamické veličiny — jsou rozvíjeny pomocí sférických harmonických funkcí a Čebyševových polynomů.

Glatzmaier a Roberts udělali několik zjednodušujících předpokladů, které jsou běžné při výpočtech dynamiky kapalin. Použili Boussinesqovu aproximaci, která zanedbává disipaci energie viskózními silami a ohmické zahřívání ve vnějším jádře. V magneto-hydrodynamických rovnicích zanedbali relativně malý setrvačný člen, protože to jim umožnilo zvětšit délku časového kroku až na 1 týden. Zanedbali kompoziční vztlak — efekt, ke kterému dochází, když železo vnějšího jádra krystalizuje na rozhraní s vnitřním jádrem, čímž umožňuje lehčím prvkům pohánět konvekci svým vztlakem.

Aby se vykompenzoval scházející kompoziční vztlak a dosáhlo se rozumné konvekce, předpokládá se v modelu poněkud větší tepelný tok z vnitřního jádra, než je pro Zemi reálné. Jako tomu bylo dosud ve všech modelech geodynamo, viskozita vnějšího jádra se uvažuje o několik řádů větší, než je geofyzikální hodnota — to je předpoklad, který je nutný, aby byly numerické výpočty proveditelné. Model Glatzmaiera a Robertse také efektivně tlumí malorozměrové víry, z hlediska výpočetního času velmi náročné, tím, že zvětšuje viskozitu, jakmile rozměr proudění

klesá. Přesto jsou v jejich modelu viskózní síly o šest řádů menší než síla Coriolisova a magnetické síly. Podle názoru mnohých geofyziků je toto jeden z důvodů, proč je model geodynamika Glatzmaiera a Robertse v současnosti nejrealističtější.

Vlivy těchto zdánlivě rozumných předpokladů mohou být zjištěny pouze zkoumáním, jak se model chová, když jsou předpoklady opouštěny; to je strategie, která bude vyžadovat ohromné množství superpočítačového času. V konečných důsledcích však takové studie určí, zdali doposud pozorované chování, podobné chování Země, je výsledkem správného modelu nebo alespoň modelu asymptoticky se blížícího Zemi, nebo je-li spíše výsledkem náhody.

## Stabilita a přepólování

Poté co se Glatzmaierův a Robertsův model dostal z počátečního stavu do statistické rovnováhy, produkoval magnetické pole co do velikosti, radiální a úhlové závislosti velmi podobné zemskému magnetickému poli (přestože v současném poli Země dipólová složka převládá nad zbytkem pole více než v jejich modelu). Magnetický sever byl trochu odkloněn od rotační osy, právě tak jako na Zemi. Vzájemná hra viskózních a magnetických momentů urychlovala rotaci vnitřního jádra a zpomalovala rotaci pláště vzhledem k vnějšímu jádru způsobem, který může být analogický dekádovým variacím délky dne.

Snad nejpozoruhodnější charakteristikou modelového pole byla jeho stabilita. V průběhu většiny ze 40 000 let času simulace (ekvivalentních zhruba trojnásobku času magnetické difuze neboli času, během něhož by zaniklo statické pole) zůstalo pole modelu silné, s průměrnou magnetickou energií zhruba 4 000násobně větší, než je kinetická energie vnějšího jádra.

Jediná výjimka ze stability modelu se objevila v průběhu jiného procesu, extrémně podobného chování Země: Během let 33 000 až 38 000 podíl dipólového pole při simulaci zeslábl, magnetická energie poklesla čtyřikrát, kinetická energie vnějšího jádra se zdvojnásobila a nakonec se náhle otočila polarita pole. Přestože jediný jev nemůže spolehlivě osvětlit mechanismus magnetického přepólování, chování Glatzmaierova a Robertsova modelu posílilo výsledky z předchozích studií dvourozměrného modelu dvou Britů, Rainera Hollerbacha, nyní na Univerzitě v Glasgowě, a Chrise Jonese z Univerzity v Exeteru [2], které ukazovaly na důležitost elektricky vodivého vnitřního jádra při udržování stability geodynamika.

Pole simulované Glatzmaierem a Robertsem má jednu polaritu ve vnějším jádře (a v plášti) a opačnou, indukovanou polaritu ve vnitřním jádře. Protože vnější jádro je kapalné, rychle se vyvíjí a jeho magnetická polarita by se přesmykla v časovém měřítku několika set let, kdyby nebylo brzdícího vlivu magnetického pole pevného jádra, které se vyvíjí v měřítkách odpovídajících difuznímu času vnitřního jádra — okolo 1 600 let. Modelové pole se může úspěšně přepólovat jen tehdy, pokud je magnetohydrodynamika vnějšího jádra dostatečně dlouho příznivá tomu, aby se pole vnitřního jádra

mohlo utlumit. Ačkoliv je zatím nemožné provést kvantitativní srovnání s časovými měřítky geomagnetických přepólování pozorovaných v paleomagnetických záznamech (řádově 10 000 až 100 000 let), kvalitativně je stabilizující efekt vodivého vnitřního jádra zcela zřejmý. Vodivá vrstvička u rozhraní jádro–plášť patrně stabilizuje mnohem méně.

## Tříbení

Práce Glatzmaiera a Robertse otevírá mnohem více cest k dalšímu pokroku, než jich uzavírá. Jeremy Bloxham z Harvardu připomíná: „Nyní, když víme, že geodynamo je proveditelné, potřebujeme mít k dispozici několik různých modelů, abychom zjistili, které faktory jsou nejdůležitější.“ P. Olson doufá, že detailní pozorování modelových a laboratorních experimentů konvekce vodivých kapalin v magnetických polích osvětlí skutečný fyzikální mechanismus geodynamo.

Glatzmaier a Roberts v současnosti sledují vývoj realističtější neboussinesqovské verze svého modelu v konfiguraci s obrácenou polaritou. Přidali kompoziční konvekci, zredukovali tepelný tok z vnitřního jádra na geofyzikální hodnotu a studují také vliv horizontálně závislého tepelného toku u rozhraní jádra s pláštěm. Více než 10 000 let po přepólování vypadá model v konfiguraci s obrácenou polaritou stabilně a jeho pole má nyní o trochu větší převahu dipólové složky, než je tomu u Země. Doufají, že vyvinou takovou verzi svého modelu, která by jim umožnila plně využít mimořádné rychlosti a výkonu masivně paralelního superpočítače a sledovat vývoj modelu rychleji.

Přesto ti, kteří doufají v rychlé vyřešení podstaty geomagnetismu, budou asi nadále žít ve zklamání. David Stevenson z Kalifornské techniky doufá, že během tří až pěti let bude možné pozorovat milion let vývoje modelu, který zahrnuje kompoziční vztlak a nepoužívá Boussinesqovu aproximaci. Takový model umožní zkoumat, zda amplituda pole je určena energetickými limity nebo vyvažováním Coriolisovy a Lorenzovy síly. Po deseti letech bude prostor parametrů modelu dostatečně prozkoumán, aby se dala posuzovat adekvátnost současných modelů geodynamo. Sám Stevenson předpovídá: „Musíme se na to dívat jako na dlouhodobý projekt.“

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

- [1] G. A. GLATZMAIER, P. H. ROBERTS: *Phys. Earth Planet. Inter.* 91 (1995), 63; G. A. GLATZMAIER, P. H. ROBERTS: *Nature* 377 (1995), 203.
- [2] R. HOLLERBACH, C. A. JONES: *Nature* 365 (1993), 541.