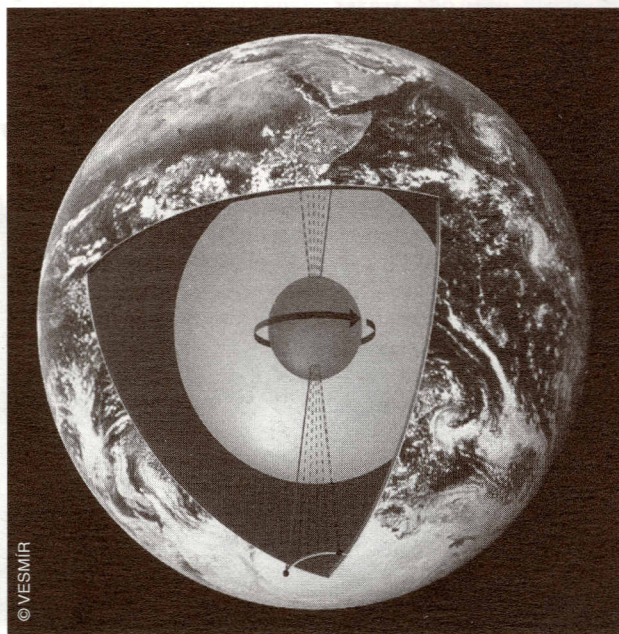


# I. Dynamika středu Země

Vnitřní jádro rotuje rychleji než zemský povrch

RAYMOND JEANLOZ  
BARBARA ROMANOWICZ

Cílem tohoto i dvou následujících článků je popsat dění uvnitř Země z geofyzikálního a geochemického hlediska. Země je stále aktivní, a to nejen na povrchu, ale i uvnitř, v plášti a jádru. Jevy ve velkých hloubkách je možné studovat vyhodnocováním měření prostorových seizmických vln. Prostorové seizmické vlny jsou dvojího typu: vlny P (primární) jsou způsobeny kmitáním hornin ve směru šíření a přicházejí na seizmické stanice první, zatímco vlny S (sekundární), které jsou způsobeny kmitáním v rovině kolmé na směr šíření, přicházejí později. Pro výzkumy nitra Země jsou rozhodující některé vlastnosti seizmických vln. Vlny S dokážou procházet jen pevnými látkami, v plynech a v kapalinách zanikají. Vlny P jsou rychlejší než vlny S a procházejí látkami pevnými, kapalnými i plynými. Oba typy vln se ohýbají, lámou a odrážejí, což umožňuje zjišťovat v Zemi průběh seizmických rychlostí a vytvořit tak přesný model vertikálního rozvrstvení Země. Nejsvrchnější partii Země tvoří litosférické desky, dosahující mocnosti zhruba 100 km a pohybující se horizontálně. Uvnitř litosférických desek leží rozhraní mezi kůrou a svrchním pláštěm, který sahá až do hloubek 670 km. Tato hloubka skrývá několik otázek. Předně se zde mění rychlost seizmických vln, je to také nejspodnější hranice, na které ještě vznikají epicentra zemětřesení. Zatím se neví, co přesně tato bariéra znamená pro klesající



© VESMÍR

„mrtvé“ litosférické desky. Spodní plášť sahá až do hloubky 2 890 km, kde už hraničí s tekutým vnějším jádrem. Právě rozhraní pláště a jádra je považováno za chemicky nejaktivnější oblast v nitru Země. Celé jádro je kovové. Vnější jádro je tekuté a obklopuje vnitřní krystalické jádro (to má poloměr 1 220 km). Při průchodu vnějším jádrem se vlny P poněkud zpomalí a při vstupu do vnitřního jádra jsou schopné generovat ještě vlny typu S. Průchod vln S vnitřním jádrem však dosud nebyl plně prokázán, protože zatím nejsou k dispozici dostatečně citlivé přístroje, které by je zachytily. Jakub Němec

## Rotace středu

Jedním z nejpozoruhodnějších objevů je, že vnitřní jádro pravděpodobně rotuje o 1 až 3 stupně za rok rychleji než zemský povrch. To poskytuje východisko k určení pohybů v kapalně oblasti, v níž se vytváří magnetické pole Země. Je to první známý příklad časového vývoje hlubinné seizmologické struktury.

Už před řadou let se zjistilo, že vnitřním jádrem se vlny nešíří stejnou rychlostí ve všech směrech (mluvíme o akustické anizotropii), ale podél polární osy se seizmické vlny šíří o několik procent rychleji než v rovníkové rovině. Příčina této anizotropie není dosud detailně vysvětlena, zdá se však, že souvisí s hexagonální krystalickou strukturou vnitřního jádra.

Za nejpřijatelnější vysvětlení pozorované anizotropie se pokládá texturace působená konvekci ve vnitřním jádře. Texturace je struktura uspořádaná z krystalů orientovaných jedním směrem. Orientované uspořádání může vést k silné směrové závislosti elastických vlastností. Texturace je běžná v polykrystalických médiích, která byla deformována – např. v ledu uvnitř ledovce. Nedávné experimenty ukazují, že v železe s hexagonální strukturou se při tlacích milionů atmosfér může vyvinout texturace výjimečně silná.

Není jasné, proč by měla být nerovnoměrná rychlost šíření vln ve vnitřním jádře orientována zhruba podél zemské rotační osy. Snad je to ovlivněno způsobem, jímž vnější jádro ztrácí teplo, nebo může jít o důsledek mírné odchylky od sféricity vnitřního jádra způsobené konvekci. Z analýzy časů šíření tisíců vln, které prošly vnitřním jádrem, vyplývá, že směr nejvyšší rychlosti seizmických vln ve vnitřním jádře je odchýlen téměř o 10 stupňů od zemské rotační osy. Takto zjištěný sklon osy anizotropie poskytl možnost, jak sledovat časový vývoj vnitřního jádra. Toho se předloni chopili vědci z Kolumbovy univerzity, kteří analyzovali výběr vysoce kvalitních seizmických záznamů pokrývajících třicetileté časové období. Časovou závislost v dobách šíření seizmických vln procházejících vnitřním jádrem pozorovali zřetelně.

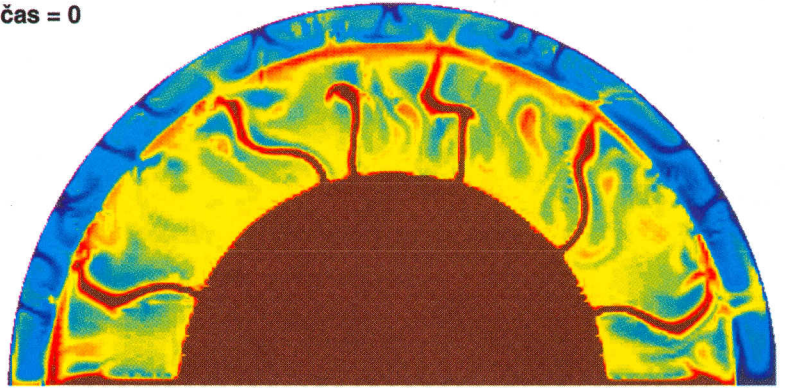
Ve stejné době harvardští geofyzici znovu zpracovávali tomografické obrazy Země. Tomografické studie tohoto typu vedly původně k objevu odchylky osy anizotropie. Předpokládá se, že vnitřní jádro rotuje asi o  $2 \pm 1$  stupně za rok rychleji než zemský povrch. Mnohé aspekty pozorování vyžadují navíc další potvrzení, a tak se sluší brát obě studie s rezervou. Když

Originální text Geophysical Dynamics at the Center of the Earth, Phys. Today 50, 22-27, 1997 přeložil C. Matyska. Redakčně upraveno a kráceno. Pozn. překladatele: Chtěl bych poděkovat RNDr. Ladislavu Hanykovi, RNDr. Aleně Janáčkové, CSc., doc. RNDr. Jiřímu Zahradníkovi, CSc., a Dr. Ing. Radimu Šárovi za pomoc, kterou podstatně přispěli ke srozumitelnosti a střízlivosti textu.

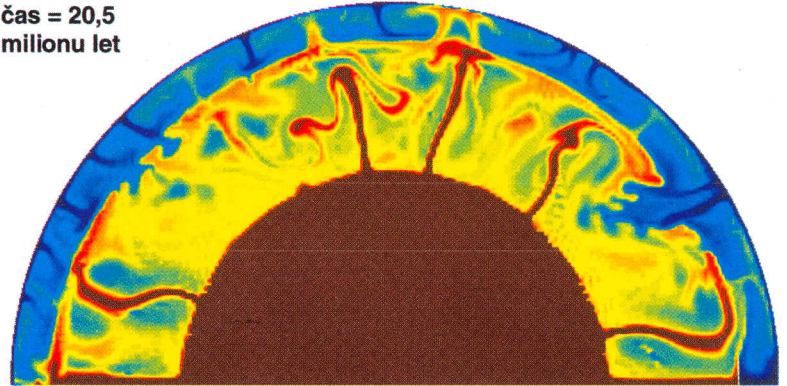
Raymond Jeanloz a Barbara Romanowicz jsou profesory geofyziky na Kalifornské univerzitě v Berkeley.

Rozložení teplot v zemském plášti v časových okamžicích, vzdálených od sebe zhruba 15 milionů let. Výsledky byly získány při počítačových simulacích Hany Čížkové na katedře geofyziky Matematicko-fyzikální fakulty UK. Červená barva označuje teplotu odpovídající rozhraní jádro-plášť, sytě modrá teplotu zemského povrchu. Pozornost byla zaměřena na možnost vzájemného působení rozhraní mezi svrchním a spodním pláštěm se stoupajícími horkými hmotami ve spodním plášti a klesajícími chladnými hmotami v plášti svrchním. Na prvním obrázku je zřetelná akumulace teplých hmot těsně pod rozhraním a studených hmot těsně nad ním. Druhý obrázek představuje průraz rozhraním drobnějšího rozsahu, po němž následoval průraz rozsahu „katastrofického“ (viz třetí obr., pozn. red.: viz rovněž článek Ivo Nováka „Novinky z prekambria, Vesmír 72, 245, 1993/5 a „Plášťový hřib ve střední křídě“, Vesmír 74, 373, 1995/7). Jeho následkem se dostalo obrovské množství horkých hmot těsně k zemskému povrchu a na druhé straně došlo k podchlazení spodních partií pláště. Na rozdíl od následujícího obrázku a obrázku na obálce se v těchto simulacích předpokládá o něco méně stabilní stav pláště, což vedlo i k tomu, že jednotlivé útvary mají menší horizontální rozměry.

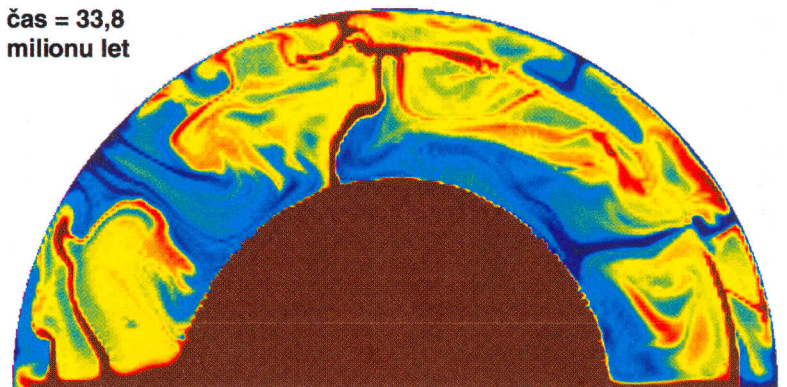
čas = 0



čas = 20,5  
milionu let

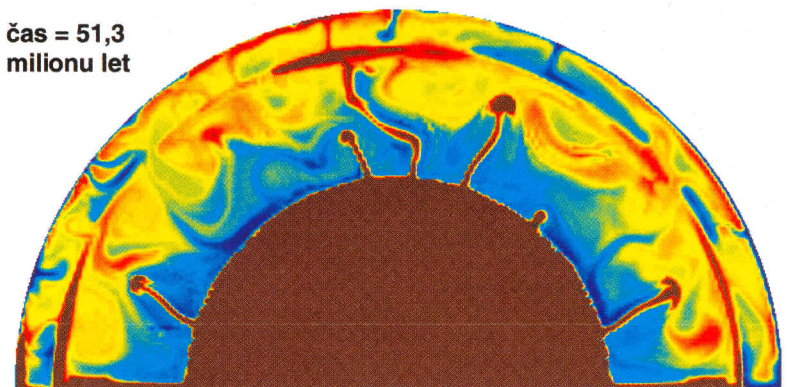


čas = 33,8  
milionu let



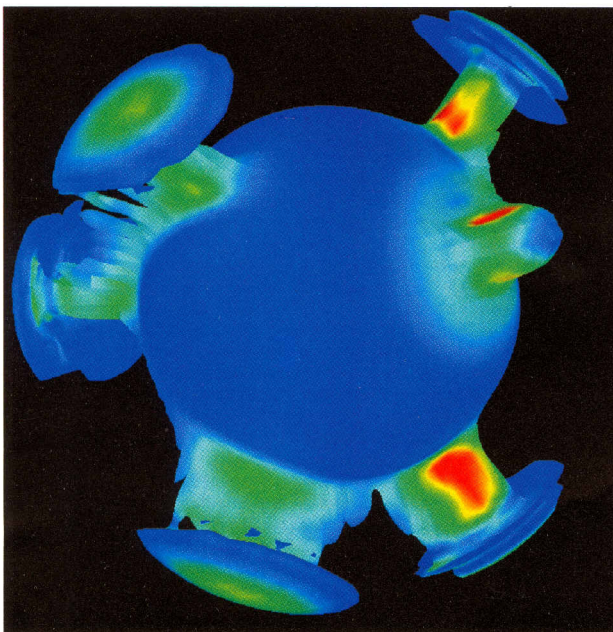
Ukázka plášťových hřibů (horkých útvarů), které získali S. Zhang a D. A. Yuen při simulacích v Superpočítačovém středisku Univerzity v Minnesotě. „Dvojitý klobouk“ hřibů je způsoben tím, že se při simulacích předpokládala existence výrazného fázového přechodu, „odpovědného“ za existenci rozhraní mezi svrchním a spodním pláštěm. Zpětná přeměna energie pohybu na teplo (disipace) v místech, kde jsou velké změny v rozložení rychlosti proudění, může vést i k značnému přehřátí „nohy hřibu“.

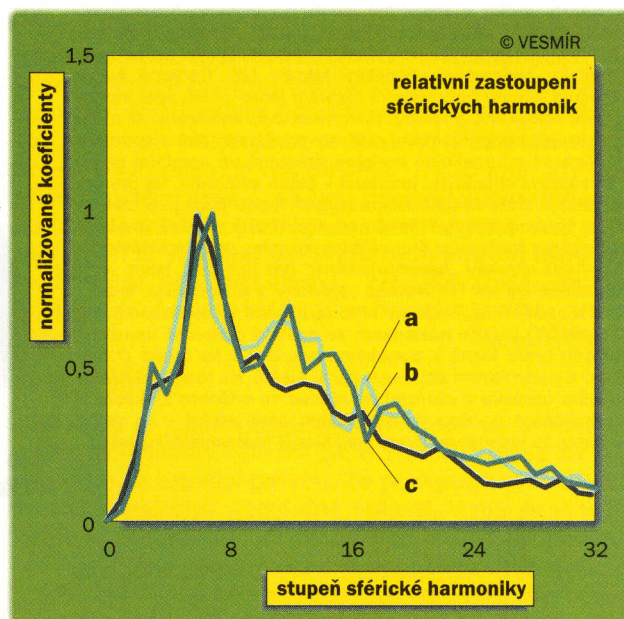
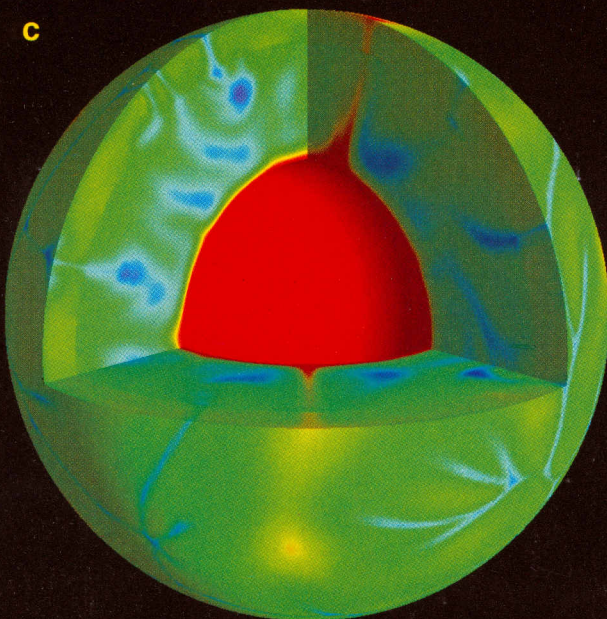
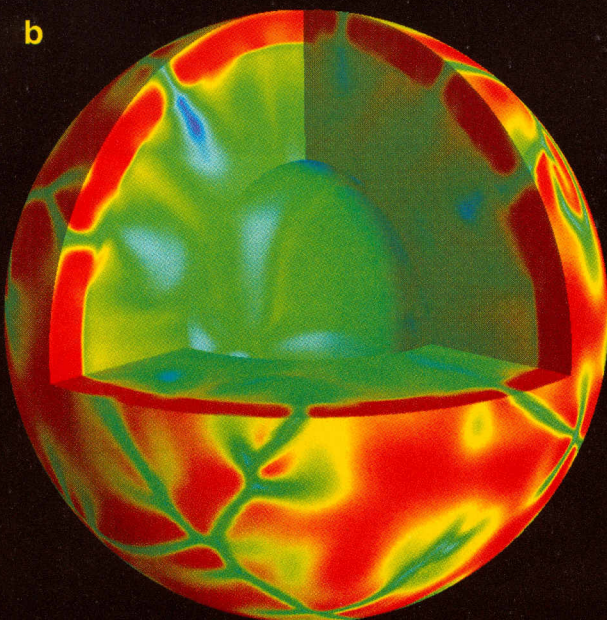
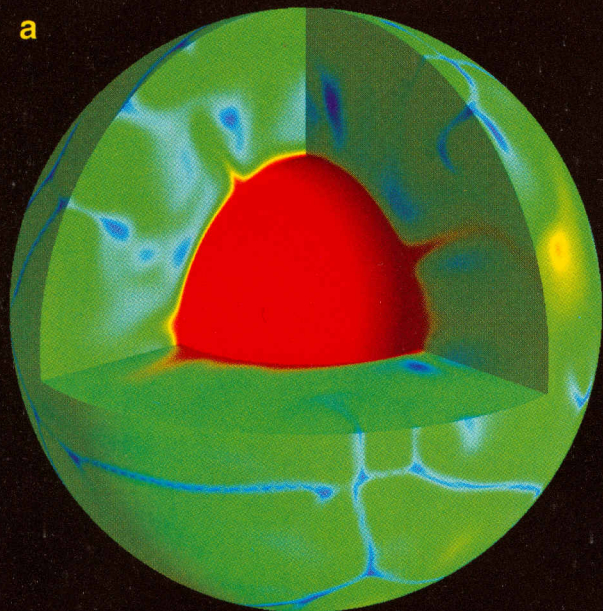
čas = 51,3  
milionu let



teplota  
povrchu

teplota rozhraní  
jádro – plášť





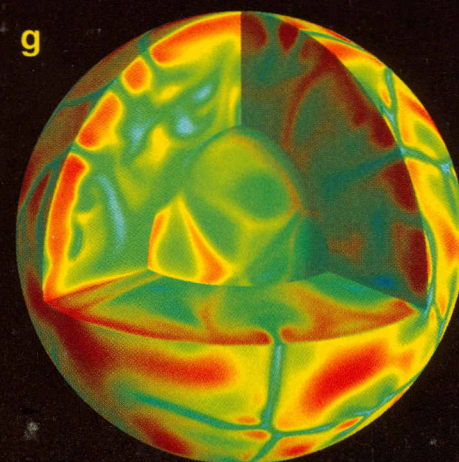
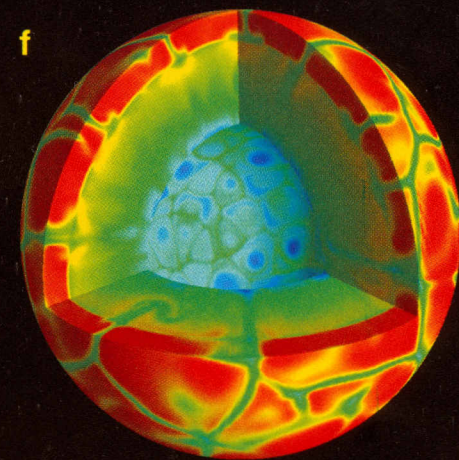
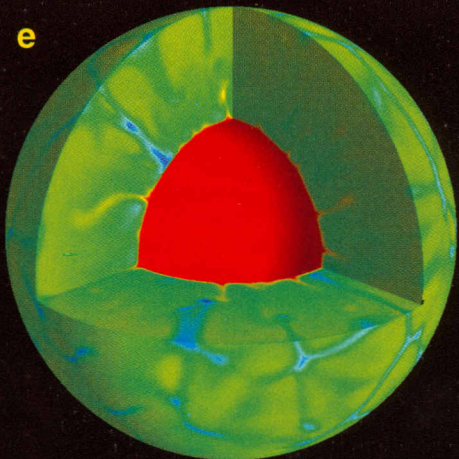
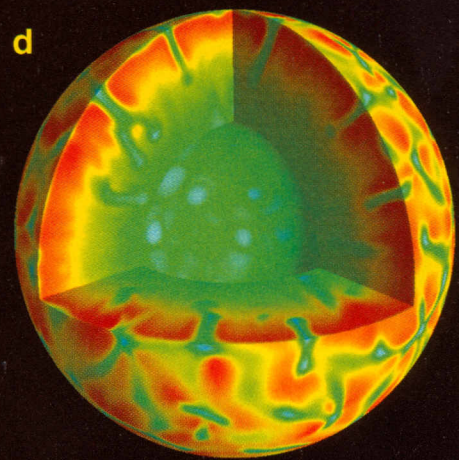
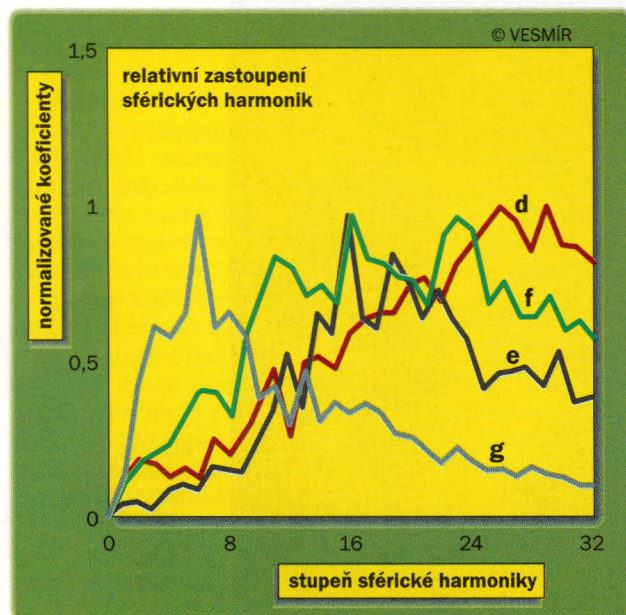
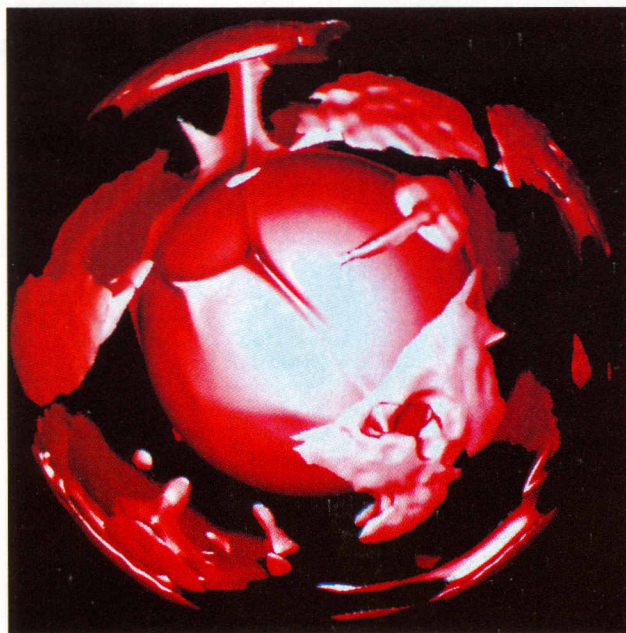
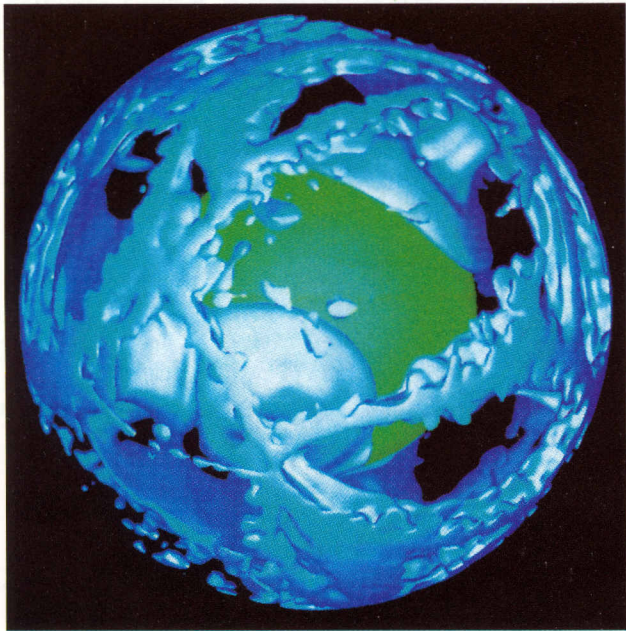
Obrázky a – g na této dvoustraně ukazují teplotní anomálie z počítačových simulací H. P. Bunga a J. Baumgardnera v Národní laboratoři v Los Alamos. Anomálie jsou počítány jako odchylky získané teploty od referenčního sféricky symetrického rozložení teploty, ke kterému by došlo, pokud by byl plášť homogenní a adiabatický. Modrá zachycuje relativně chladné a červená relativně teplé oblasti, přičemž svrchních 200 km zemského pláště je odstraněno. Pro tyto simulace je charakteristický sestup chladných hmot ve formě dlouhých desek, které jsou (víceméně pasivně) doplněny horkými hmotami. Nejsou zde tak výrazné horké „plášťové hříby“ stoupajícího materiálu, protože skupina v Los Alamos předpokládala, že hlavním hnacím mechanismem konvekce v plášti jsou rozptýlené radioaktivní zdroje tepla, zatímco hříby jsou typické útvary při silném zahřívání od jádra.

Na obr. a – c je situace, která by nastala, kdyby viskozita spodního pláště byla výrazně vyšší než viskozita pláště svrchního. Na obr. a se připouští, že 15 % uvolňovaného tepla pochází z jádra, přičemž hmoty mohou zcela volně procházet rozhraním mezi spodním a svrchním pláštěm. Na obr. b se tepelný tok z jádra zcela zanedbává, uvažuje se však fázový přechod mezi svrchním a spodním pláštěm. Na obr. c se uvažuje jak výše uvedený tepelný tok z jádra, tak i fázový rozhraní. Barevná spektra anomálií na schématu nahoře nám říkají, že většina „výkonu“ anomálií je zachycena pomocí sférických harmonických funkcí nízkého řádu, což znamená, že jde především o značně velké útvary globálního charakteru.

Obr. d – f zachycují situaci, kdy má celý plášť stejnou viskozitu. Na obr. d se nepředpokládá žádný tepelný tok z jádra a žádné fázové rozhraní v plášti. Obr. e se od předchozího liší tím, že se připouští, aby 35 % uvolňovaného tepla pocházelo z jádra. Povšimněme si, že v tomto případě se na dně pláště okamžitě vytvoří hraniční vrstva, která se stává zárodkem horkých „hříbků“ tryskajících vzhůru. Obr. f se pak od obr. d liší přidáním fázového rozhraní v hloubce 670 km. To vede k vytvoření relativně teplého svrchního pláště a relativně chladného spodního pláště. (Připomeňme znovu, že jde o anomálie teploty, tj. o odchylky teploty od referenčního průběhu charakteristického pro sféricky symetrický model.) Obr. g se od obr. d liší výrazným zvýšením viskozity ve spodním plášti. Přítomnost vyšších sférických harmonických funkcí v průběhu spektrálních výkonů (viz grafy, v nichž se písmena a – g vztahují k stejné označeným počítačovým simulacím vlevo a vpravo) ukazuje, že při simulacích konvekce v plášti s konstantní viskozitou se vytvářejí řady drobnějších útvarů. Skutečně velké útvary jsou vytvořeny pouze v modelech se zvýšenou viskozitou spodního pláště. Tento výsledek je důležitý pro porovnávání s tomografickými modely spodního pláště, které odpovídají situaci, kdy hlavní spektrální výkon je soustředěn do nejnižších řádů.

Uvedené obrázky jsou příkladem tzv. parametrických studií. V nich se zkoumá možný vliv jednotlivých veličin, jejichž velikost dobře neznáme, jako je poměr viskozity spodního a svrchního pláště nebo poměr tepla přicházejícího z jádra k teplu uvolňovanému v plášti.

Trochu jiné zobrazení z obdobných simulací, provedených skupinou (P. J. Tackley a spol.) z Kalifornské techniky, je převzato z *Nature* 361, 700, 1993. Povšimněme si rozdílu mezi horkými útvary (hnědočervený obrázek), stoupajícími vzhůru a chladnými, klesajícími dovnitř pláště (modrý obrázek). Zatímco horké útvary vytvářejí typické hříby rostoucí od rozhraní s jádrem, řada studených útvarů tvoří tenké desky. V místech, kde se desky protínají, vznikají velké sloupky chladné hmoty, která se dole rozlévá do stran.



však dva nezávislé soubory dat, zkoumané dvěma různými vědeckými skupinami, vedou ke stejnému základnímu závěru o rotaci vnitřního jádra Země, o něčem to svědčí.

### Meteorologie kapalného jádra

Seizmologická pozorování mohou sledovat pohyby spodku vnějšího jádra v časovém úseku několika let. Doplnují tím odhady pohybu a vnějšího povrchu jádra, které jsou odvozeny z časových změn magnetického pole na zemském povrchu a poskytují tak nový pohled na „meteorologii“ celého vnějšího jádra, kde se vytváří geomagnetické pole. Hydrodynamiku vnějšího jádra popisují stejné rovnice jako proudění hmot v atmosféře. V jádře však nelze zanedbat vliv magnetického pole; rovnice, které ho popisují, jsou proto spráženými s rovnicemi hydrodynamiky.

Rozměrová analýza ukazuje, že určování pohybu kapalného jádra v ročních intervalech odpovídá meteorologickým pozorováním v hodinových intervalech. Časové měřítko týkající se pozorování kapalného jádra je úzce spjato s hlavními poznatky v teoretickém chápání dynamiky jádra. Konkrétně, Glatzmeier a Roberts numericky simulovali magnetohydrodynamické dynamo, které vytváří magnetické pole Země. Jedním z prvních úspěchů bylo, že v jejich modelových výpočtech došlo k převrácení polarity magnetického pole za dobu odpovídající 30 000 let. V nedávné práci, dosud nepublikované, získali Glatzmeier a Roberts další modelové inverze, následující zhruba po 120 000 a 220 000 letech. K převrácení polarity zemského magnetického pole dochází obvykle několikrát během každého milionu let. Vzhledem k tomu, že magnetohydrodynamický systém je nelineární, není možné určit *a priori* okamžik přepólování, přestože jde o proces plně určený rovnicemi. Přepólování je tak vlastně reakcí na nahromadění jednotlivých vnitřních činitelů. Zajímavým výsledkem magnetohydrodynamických výpočtů je potvrzení rychlejší rotace vnitřního jádra proti zemskému plášti. Detailní rozbor příčin tohoto rozdílu rotací, pokud k němu opravdu dochází, je složitý. Je tomu tak proto, že toky kapaliny a magnetické pole vnějšího jádra jsou úzce sprážené. Nicméně, jedním z účinků zemské rotace je roztočení kapaliny vnějšího jádra během jejího pohybu od pláště k polárním oblastem vnitřního jádra. Siločáry magnetického pole ve zkapalněném kovu vnějšího jádra jsou tak taženy těmito pohyby, a protože procházejí i kovovým vnitřním jádrem, výsledkem je rozdíl rotací, jehož vypočtená hodnota je asi dva až tři stupně za rok.

Zopakujeme: vypočtené magnetohydrodynamické výsledky se shodují s pozorováním. Tato předpověď předcházela seizmologické práci. Je to jeden z prvních případů, kdy simulace procesů probíhajících hluboko v jádře mohou být přímo konfrontovány s nezávislými pozorováními. Zabudujeme-li při modelování do teorie nějaké klíčové předpoklady, např. o chování turbulencí ve vnějším jádře, zvyšuje pak evidentní shoda mezi teorií a pozorováním naši důvěru v tyto předpoklady. Další předpovědi modelu geodynamika je, že pohyby vnitřního jádra by měly být poněkud trhavé v časovém měřítku staletí, či snad dokonce i kratších období, což by mohlo být porovnáváno se seizmologickými a geomagnetickými pozorováními v nastávajících letech.

Čím více se počítačové simulace shodují s realitou, tím větší je naděje, že budou odhaleny klíčové aspekty dlouhodobého geologického vývoje jádra. V Glatzmeierově a Robertsově modelu, který se výborně shoduje s pozorovanými pohyby vnitřního já-

dra, vycházejí např. větší ztráty tepla v jádře jeho odvodem do pláště, než se usuzuje ve většině nedávných studií o termální historii Země. Je to důležité, protože tepelný tok z jádra do pláště pomáhá pohánět deskovou tektoniku, vulkanismus, zemětřesení a další geologické procesy. Zvýšený tepelný tok rozhraním mezi jádrem a pláštěm naznačuje, že jádro ovlivňuje geologický vývoj naší planety mnohem více, než se dříve předpokládalo.

### Vzájemné působení jádra a pláště

Roste počet důkazů, že kovové jádro Země a kamenný (nebo keramický) plášť, který ho obklopuje, se velmi silně ovlivňují. Seizmologie např. zjišťuje, že spodních 200 km pláště je jednou z nejvíce heterogenních oblastí planety: Rozptyl a další jevy spjaté se silnými laterálními (horizontálními) změnami fyzikálních vlastností způsobují, že tato oblast je pro geofyzikální pozorování poněkud kalná. Z laboratorních experimentů též víme, že za vysokých tlaků a teplot, odpovídajících rozhraní mezi jádrem a pláštěm, bouřlivě reagují oxidy hlubokého pláště v kontaktu s kapalnými slitinami železa. Tyto experimenty naznačují, že v průběhu geologických dob se kamenný plášť pomalu rozpouští do kapalného kovu vnějšího jádra.

Příčina rozpouštění se zdá být spojena se zásadní změnou charakteru kyslíkových vazeb za vysokých tlaků. Zatímco za nízkých tlaků kyslík vytváří nevodivé směsi (typu keramiky), za vysokých tlaků se může stát složkou vytvářející kovové slitiny. Produkty chemických reakcí mezi pláštěm a vnějším jádrem, kdy se elektricky izolující oxidy setkávají s kovovými slitinami, mohou dobře vysvětlit seizmologicky pozorovanou různorodost poblíž jejich rozhraní. Možný výskyt kovových slitin u dna pláště je obzvláště důležitý, protože kov vede teplo mnohem lépe než oxidy. Rozložení úniku tepla z jádra může tedy být prostorově velmi různorodé, což může určovat rozložení konvekčních proudů v zemském plášti.

### Skvrny na dně pláště

Snad nejpodivnější anomálie pozorované u rozhraní mezi jádrem a pláštěm jsou tenké oblasti, o mocnosti menší 40 km, v nichž jsou rychlosti seizmických vln lokálně o 10 nebo i více procent nižší. Oblasti s tak velkým poklesem rychlostí nebyly pozorovány nikde jinde v plášti. I kdybychom předpokládali, že tam dochází k chemické reakci nebo kontaminaci jádrem, zdá se, že vysvětlení těchto velkých poklesů seizmických rychlostí vyžaduje i mohutné místní tavení uvnitř nejspodnějších partií pláště.

Taková výrazná různorodost, s lokálními horkými a částečně roztavenými oblastmi ve spodním plášti, je kromě jiného ukázkou vysoce dynamické termální a chemické hraniční vrstvy u svrchní hranice jádra. Existuje hypotéza, že „horké skvrny“ na zemském povrchu – skupiny vulkánů, jako je řetězec Havajských ostrovů, o nichž se má za to, že představují stoupající výrony horkého materiálu v plášti – se mohou nacházet především nad skvrnami ultranízkých rychlostí u rozhraní mezi jádrem a pláštěm.

Existují navíc dobré důkazy o lokální silné seizmické anizotropii právě nad jádrem. Přítomnost tenkých vrstev materiálu s nízkými akustickými rychlostmi, ať už je způsobena natavením nebo kontaminací jádrem (anebo obojím), by mohla vysvětlit anizotropii u dna pláště.

Seizmologická pozorování rozhraní jádro-plášť dokládají termální a chemický vliv kovového jádra na kamenný plášť, což by mohlo být důležité pro porozumění rozsáhlým geologickým jevům v minulosti.

Existují důkazy o masivních vulkanických erupcích, jejichž rozsah řádově předčil cokoliv, co se na Zemi událo během nedávné geologické historie. Modelové studie naznačují, že takové superudálosti by mohly být povrchovou ukázkou dynamických nestabilit vy-

buzených u rozhraní mezi jádrem a pláštěm. Je-li tomu tak, pak současná pozorování seizmických heterogenit a anizotropie těsně nad jádrem mohou poskytnout první snímky nestabilit vznikajících hluboko v Zemi. □

#### ODKUD VÍME, CO JE UVNITŘ?

O podstatě hlubokého nitra Země se dozvídáme především ze seizmologických, geomagnetických a dalších geofyzikálních pozorování. Shrňme některé argumenty a charakteristiky hlavních rysů jádra:

● **Vnější jádro je roztavené.** Svědčí o tom tři důkazové linie, přičemž první dvě jsou seizmologické. Zaprvé, vlny typu S šířící se dolů pláštěm nepronikají do jádra, čímž dokumentují nedostatek pevnosti ve vnějším jádře. Naopak vlny typu P, které dosáhnou rozhraní plášť-jádro, generují kompresní vlny v jádře, které pak mohou generovat jak vlny P, tak i vlny S, jakmile dosáhnou pláště na opačné straně jádra. Výsledné vlny jsou zaznamenávány na zemském povrchu. Druhá, doplňující důkazová linie pochází ze spektra tzv. vlastních kmitů Země, vznikajících velkými zemětřeseními. Pozorované frekvence mohou být vysvětleny pouze za předpokladu, že vnější jádro má nulovou pevnost. I když je určování vlastností Země ze spektra vlastních kmitů samo o sobě úlohou s nejednoznačným řešením, existují dodatečné informace spolehlivě ukazující, že vnější jádro je kapalné. Konečně geodetická pozorování nutací (kolébání rotační osy Země) jsou nejlépe vysvětlena za předpokladu, že vnější jádro je kapalina, která není více vazká než voda za pokojové teploty a tlaku. Nedávná pozorování rotace vnitřního jádra jsou s tak malou viskozitou slučitelná. Ve vazbě mezi kapalným vnějším jádrem a krystalickým vnitřním jádrem převažují spíše geomagnetické síly nad viskózními.

● **Vnitřní jádro je krystalické.** Jediný důkaz, že vnitřní jádro není kapalné, pochází z pozorovaného spektra seizmických vlastních kmitů, které nemohou být vysvětleny bez předpokladu pevnosti vnitřního jádra. Spektrum vlastních kmitů také ukazuje, že hustota vnitřního jádra je asi o 500 kg/m<sup>3</sup> větší než hustota vnějšího jádra. Anizotropie vln s elastickými vlastnostmi navíc podporuje představu, že vnitřní jádro má krystalickou strukturu.

Žádné smykové vlny šířící se vnitřním jádrem nebyly dosud spolehlivě pozorovány, ale výpočty založené na známé struktuře Země ukazují, že amplitudy takových vln jsou pro současná pozorování příliš malé.

● **Geomagnetické pole pochází z jádra.** Sférická harmonická analýza časově průměrovaného geomagnetického pole na zemském povrchu i nad ním dokázala, že více než 98 procent povrchového pole pochází ze zdrojů hluboko uvnitř planety. Díky jedné z Gaussových raných aplikací sférické harmonické analýzy se o tom vědělo už v 19. století. Geomagnetické bouře, způsobené náhlými změnami v aktivitě slunečního větru, dočasně zvyšují vnější geomagnetické pole a mohou redukovat příspěvek z vnitřku až na 90 procent. Roční i desetileté variace geomagnetického pole ukazují, že plášť má nízkou elektrickou vodivost. To je v souladu se seizmologickými a dalšími údaji, které dokládají, že plášť je tvořen především nevodivými silikátovými a oxidovými horninami. Seizmologické vlastnosti jádra jsou naopak slučitelné se složením z takřka čistého železa, což naznačuje, že geomagnetické pole je primárně produkováno magnetohydrodynamickými procesy v elektricky vodivé kapalně vnějšího jádra.

Desetiletá až staletá měření časově proměnného geomagnetického pole mohou být použita k odhadům rychlosti kapaliny na povrchu vnějšího jádra. Globální pozorování časových změn se provádějí několik staletí. Z nich se dají odvodit rychlosti proudění u vnějšího povrchu jádra asi 1–10 km/rok. Pro srovnání, rychlosti proudění v „pevných“ částech Země – plášti, vnitřním

jádře a v povrchových tektonických deskách – se udávají v centimetrech za rok.

● **Jádro je slitinou železa.** Laboratorní měření ukazují, že hustoty a rychlosti elastických vln prvků a planetárního materiálu se systematicky mění s atomovou hmotností (u složených materiálů s průměrnou atomovou vahou). Seizmologické modely hustoty a rychlostí elastických vln pak ukazují, že průměrné atomové číslo jádra je asi 25, což je blízko atomovému číslu železa.

Jediným známým mechanismem, který je schopen produkovat geomagnetické pole, je magnetohydrodynamika, jež vyžaduje přítomnost elektricky vodivé kapaliny. Za odpovídajícího tlaku a hustoty to může být kapalina pouze z kovu, např. roztavená slitina železa. Má se za to, že v jádře převažuje železo, které je o několik řádů hojnějším prvkem sluneční soustavy než jeho sousedé v periodické tabulce prvků. V rámci studií hvězdné nukleosyntézy je tato hojnost dobře pochopitelná. Není věrohodné, že by velmi vzácné prvky jako vanad nebo chrom vytvářely velké části naší planety. Jsou zde však také meteority. Většinou jsou kamenné, ale přibližně jeden z deseti je kovový, a to ze slitiny železa s niklem. Protože meteority jsou považovány za vzorky materiálu, který zbyl po formaci planet, zdá se nejpřirozenější, že jádro je slitinou železa. Výpočty a pozorování však prokazují, že hustota jádra je asi o 10 procent menší než hustota čistého železa (nebo železa s niklem) za tlaků a teplot jádra. Identifikace lehčí příměsi je vysoce problematická. K favoritům patří síra, kyslík a vodík. Všechny odpovídají fyzikálnímu pozorování vnitřku Země. Kterému z nich dát přednost? To záleží na konkrétním modelu původu a rané geologické historii jádra. Kyslík a vodík např. vytvářejí slitinu s železem pouze za vysokých tlaků, takže se mohly stát významnými příměsmi pouze tehdy, pokud infiltrovaly kov jádra až poté, když Země dosáhla podstatné části své dnešní velikosti a měla už ve svém středu jádro. Pokud laboratorní měření a geofyzikální pozorování opravdu vypovídají o tom, že jádro a plášť spolu chemicky reagují, pak je jádro v průběhu geologické historie čím dál tím více kontaminováno kyslíkem. Skok v hustotách na rozhraní mezi vnitřním a vnějším jádrem naznačuje, že se zde při krystalizaci též diferencoval materiál, kdy vnitřní jádro je tvořeno pouze čistým železem, zatímco lehčí příměsi zůstávají ve vnějším jádře. V každém případě je však případný vzrůst vnitřního jádra při chladnutí železa doprovázen poklesem gravitační energie, což může být jedním z hlavních mechanismů umožňujících pohánění geodynamika ve vnějším jádře i konvekce v plášti.

● **Teplota jádra je asi 5 000 K.** Teplota na rozhraní mezi krystalickým vnitřním jádrem a kapalným vnějším jádrem je evidentně blízko teploty tání materiálu jádra za odpovídajícího tlaku. Hustotní profil Země, získaný ze spektra vlastních kmitů, zachycuje radiální změny hustoty, a tedy i tlaku v jejím nitru. Ve středu pevného vnitřního jádra je tlak o velikosti 3,6 milionu atmosfér, který klesá na 1,4 milionu atmosfér na povrchu kapalného vnějšího jádra.

Laboratorní experimenty za vysokých tlaků a teplot ukazují, že železo a věrohodné slitiny železa se taví za teplot okolo 4 000 až 6 000 K při tlacích, jaké jsou v jádře. Ačkoliv jsou kvantitativní výsledky v detailech mezi různými laboratoři a různými metodami (někdy i mezi různými metodami v jedné laboratoři) dosud odlišné, panuje obecná shoda, že u vnějšího povrchu jádra je teplota 3 500 až 4 500 K a ve středu Země vzrůstá na 5 000 až 6 000 K. Hlavní zdroj nejistoty ohledně teplot jádra plyne z nejistoty týkající se jeho složení. □