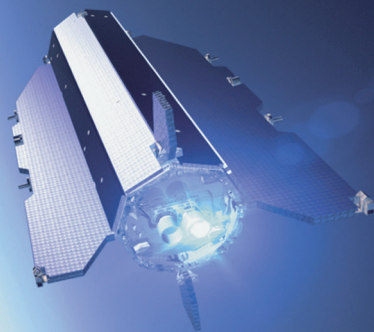


družice a gravitační pole Země



AKADEMIE VĚD
ČESKÉ REPUBLIKY

věda 3
kolem
nás
co to je...

Astronomický ústav Akademie věd České republiky (www.asu.cas.cz) je jednou z nejstarších vědeckých institucí v českých zemích. Je přímým pokračovatelem klementinské hvězdárny. Od roku 1898 v Ondřejově postupně vyrůstala hvězdárna, jejíž historické kopule slouží v současné době jako muzea a každý víkend od května do září je možné využít nabídky prohlídek pro veřejnost.

V současné době se pracovníci Astronomického ústavu AV ČR věnují především výzkumu Slunce, meteorů, asteroidů, hvězd, galaxií a extragalaktických objektů a zabývají se relativistickou astrofyzikou a dynamikou přirozených a umělých těles sluneční soustavy. Zkoumají se tak tělesa a jevy od bezprostředního okolí Země až po vzdálený vesmír. V závislosti na počasí se denně několik přístrojů na observatoři v Ondřejově využívá pro různé druhy pozorování. Astronomický ústav AV ČR disponuje největším dalekohledem v České republice s průměrem zrcadlového objektivu 2 metry, který se používá pro spektroskopii hvězd, hlavně těsných dvojhvězd. Další přístroje jsou zejména 65cm dalekohled pro fotometrii asteroidů, vícekanálový spektrograf pro sledování slunečních erupcí, dalekohledy sluneční patrolní služby, sluneční radioteleskop, fotografický zenitový dalekohled, robotický dalekohled pro zaznamenávání optických protějšků gama záblesků či kamery pro sledování přeletu bolidů.

Sluneční oddělení se zaměřuje jak na aktivní, tak klidné procesy ve sluneční atmosféře. Aktivní procesy ovlivňují celý meziplanetární prostor včetně Země a jejího okolí (tzv. kosmické počasí). Na observatoři v Ondřejově probíhá pozorování Slunce v optickém a rádiovém oboru elektromagnetického záření a tato pozorování jsou doplněna v rámci mezinárodní spolupráce daty z družic poskytujících informace o slunečním záření v ultrafialové, rentgenové a gama oblasti spektra. Zkoumají se zde sluneční erupce a protuberance, struktura a dynamika sluneční atmosféry a také heliosféra a kosmické počasí. Numericky se modelují procesy ve slunečních erupcích a protuberancích. Studují se oblasti na Slunci v různých výškách v atmosféře, aby bylo možné porozumět interakcím mezi pohybem plazmatu a magnetickým polem. Sledují se dynamické jevy ve slunečním větru, zejména stavba a šíření koronálních výronů hmoty a s nimi spojených magnetických oblaků a interakce slunečního větru s tělesy sluneční soustavy.

V Oddělení meziplanetární hmoty probíhá výzkum malých těles sluneční soustavy, zvláště meteoroidů a asteroidů. Oddělení se zabývá studiem interakcí meziplanetárních těles různých velikostí se zemskou atmosférou, pozorováním meteorů a pracuje se zde na interpretacích pozorování. K tomu se využívá Evropská bolidová síť, kterou před mnoha lety Astronomický ústav založil a organizuje. Podílí se také na obdobném projektu bolidové sítě v Austrálii. Obě tyto sítě přinášejí veřejnosti viditelné výsledky – tzv. meteority s rodokmenem. Pozorovaná data jsou použita ke studiu fyzikálních procesů během průniku meteoroidu do zemské atmosféry, což zahrnuje záření, ionizaci a fragmentaci meteoroidů. Určují se fyzikální vlastnosti a chemické složení různých typů meteoroidů, jejich původ a rozložení ve sluneční soustavě, jejich vztah ke kometám, asteroidům a meteoritům. Za pomoci dalekohledu o průměru 65 cm je prováděn výzkum asteroidů, zvláště jejich binárnosti, rotačních a objemových parametrů.

Úvod

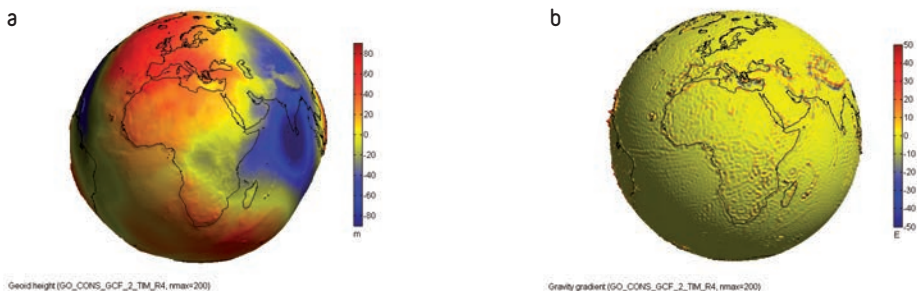
Země je kulatá. Chvilí lidstvu trvalo, než na to přišlo, jenže pak to zase zapomnělo (jako řadu jiných věcí – tak trochu marnost nad marností), a tak bylo co znovu objevovat.

Země není kulatá. Je to koule jen v prvním přiblížení k pravdě. Ve druhém přiblížení je to rotační elipsoid (splácly na pólech díky rotaci Země, ale byla doba, kdy vážně uvažovali, že Země je jak vejce). Největší rozdíl mezi koulí a rotačním elipsoidem je asi 20 km. Ve skutečnosti je Země geoid: plocha konstantního tíhového potenciálu. Je to plocha, kterou by zaujala voda, kdyby na Zemi nic než voda nebylo. Tvar plochy geoidu odráží nepravidelnosti v gravitačním poli Země, je tedy dán rozmístěním a různými hustotami hmot uvnitř zemského tělesa. Rozdíly mezi geoidem a rotačním elipsoidem jdou do desítek metrů. Největší „prohlubeň“ v geoidu vůči referenčnímu (vztažnému) rotačnímu elipsoidu je v Indickém oceánu, asi 100 m. Nikde však nenastává, že by plocha geoidu nebyla vypuklá a vypadala tak, jak se pro názornost (s přehnanými převýšeními) obvykle znázorňuje na obrázcích a animacích (obr. 1a, b, animace: http://www.asu.cas.cz/~bezdek/Veda_kolem_nas/). Uvědomme si, že porovnááme desítky metrů s poloměrem zeměkoule, což je přibližně 6378 km!

Jiná kosmická tělesa jsou na tom podobně, žádné není ideální koule. Planety typu Jupitera jsou víceméně plynné a poddajné, mohou tedy být i velmi zploštělé na pólech (pokud rychle rotují). Planety typu Země (Mars, Venuše a Merkur) jsou méně tvárné. Jejich tvar je vyjádřen obdobou geoidu v případě Země. Měsíc, Mars a Merkur jsou v tomto směru „divočejší“, rozečkanější než Země.

Jak takové věci můžeme tvrdit s jistotou? Jak víme, jak moc a kde je Země šišatá? Je to doopravdy změřeno nebo jde o nějaké hypotézy? A co z toho plyne?

Pozemní geodetická měření nezašla o moc dál než k parametrům rotačního elipsoidu. Rozhodující znalosti o tvaru a globálním gravitačním poli Země (a řadu dalších znalostí pro jiné geovědní obory) poskytly a poskytují (v procesu postupného zpřesňování) umělé družice Země (dále UZD).



Obr. 1a, b Průběh geoidu (vlevo) a radiálního gradientu gravitačního pole pro model gravitačního pole Země GOCE-TIM-R4. Zatímco má výška geoidu relativně hladký průběh (střední Evropa je asi 45 m nad referenčním rotačním elipsoidem (červeně), největší „prohlubeň“ v geoidu (modře) se nachází v Indickém oceánu), radiální složka druhých derivací poruchového potenciálu (viz níže) ukazuje velmi názorně a do značného detailu nehomogenity gravitačního pole (jsou vyznačeny hranice litosférických bloků, horská pásma a mnoho jiného). V obou případech je „povrchové zvlnění“ uměle asi tisíckrát zvětšeno pro názornost. Pro zobrazení těchto veličin na povrchu celé Země je možno získané 3D obrázky také animovat (http://www.asu.cas.cz/~bezdek/Veda_kolem_nas/)

Geodynamické a geodetické umělé družice Země

Běžná UDG je krabice, která má na svém povrchu a ve svých útrobách přístroje podle druhu prováděného experimentu. Na povrchu družice bývají rozloženy panely slunečních baterií, obvyklý zdroj energie pro celý objekt. Někdy z ní může vyčnívat anténa pro komunikaci se Zemí či s jinými družicemi nebo třeba tyč s magnetometrem. Takový objekt není pro studium gravitačního pole Země optimální. Proč?

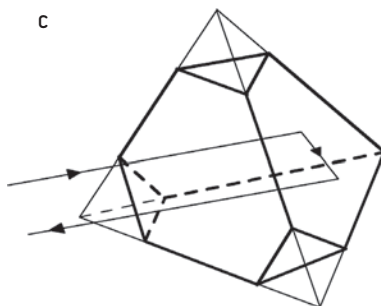
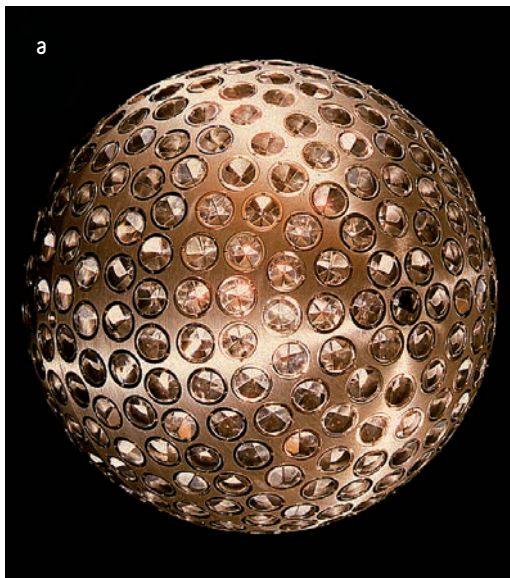
Každá družice je totiž na své dráze kolem Země ovlivňována celou řadou dráhových poruch. Ty způsobují rozmanité změny, takže výsledná dráha není jednoduchá (keplerovská) elipsa, ale prostorová křivka elipse jen podobná. Dráhové poruchy mohou být sekulární (jednosměrné, trvalé), dlouhoperiodické nebo krátkoperiodické, podle toho, co je působí. Vedle gravitačních vlivů samotné Země a vlivu Měsíce a Slunce (lunisolární poruchy) jsou to vlivy negravitační, tedy hlavně vliv atmosféry Země, tlaku slunečního větru a slunečního záření odraženého od Země (albedo a tepelné záření). Pod zhruba 500 km výšky nad zemským povrchem je to právě odpor atmosféry, který limituje životnost družice na dráze (atmosféra v takové výšce se z hlediska laboratoře na zemském povrchu jeví prakticky jako vakuum, ale pro působení na družici je i tato velice nízká hustota atmosférických částic významná). Hustota atmosféry stoupá exponenciálně s klesající výškou, a tak je zkáza družice (bez raketových motorků, které by dráhu zvýšily či opětovně zvyšovaly, dokud nedojde palivo) nevyhnutelná. Družice bude stále rychleji a rychleji klesat v atmosféře, blížít se k Zemi, jakoby po spirále, až se po měsících nebo rocích (pro vyšší dráhy i za podstatně déle) dostane tak blízko k zemskému povrchu (pod 100 km výšky letu), že shoří v hustých vrstvách atmosféry. Většinou z ní nic nezůstane, jen kompaktní kusy z mnohatunových objektů někdy neshoří celé a jejich zbytky mohou dopadnout na Zemi.

Běžnou družici velmi ovlivňuje odpor atmosféry. Lze ji proto vybavit motorkem, který pokles dráhy eliminuje, nebo přístrojem, který pokles měří a z toho odvodí parametry hustoty atmosféry. Obojí se děje. Odpor atmosféry a vliv tlaku slunečního záření závisí přímo úměrně na poměru A/m povrchu A družice vystaveného jejich působení ku hmotnosti družice m . Lehkým balónem bude atmosféra vesele mávat (byly takové balónové družice ECHO 1, 2 nebo PAGEOS pro radiokomunikační testy a díky nim se na tento efekt přišlo). Už jen rotace družice nepravidelného tvaru působí problémy. Malá těžká koule (A/m je velmi malé a konstantní) bude proti vlivu atmosféry téměř imunní. Pro studium gravitačního pole je tedy jedním řešením vypustit malou a těžkou, kulatou družici na vysokou dráhu. Takové družice se nazývají *geodynamické*.

Dosud jich bylo vypuštěno celkem asi deset – jsou to zcela pasivní objekty, jen koule pokryté koutovými odrazeči (retroreflektory). Na obr. 2a, b jsou dvě z nich: americká družice LAGEOS (Laser Geodynamics Satellite, NASA) a francouzská Starlette („hvězdička“, CNES). Starlette je malinká družice, velká asi jako fotbalový míč, ale výrazně těžší. Největší je AJISAI (průměr přes dva metry). Další geodynamické družice: LAGEOS 2 (USA), Stella (Francie), GFZ 1 (SRN), ETALON 1 a 2 (tehdejší SSSR), WESTPAC (Rusko), AJISAI (Japonsko). Životnost těchto objektů je vysoká. LAGEOS ve výšce téměř 6000 km nad zemským povrchem má vydržet odhadem 8 miliónů let. Je na něm (podobně jako na meziplanetárních sondách Pioneer

a Voyager) vzkaz budoucím generacím či mimozemšťanům (navrhl ho americký astronom Carl Sagan).

Aby takové malé objekty bylo vůbec vidět a abychom mohli určit jejich dráhu, musejí být uzpůsobeny pro pozorování ze Země. Nevybavujeme je anténami, ale pasivními koutovými odražeči (obr. 2b, c). Fungují podobně jako odrazky na kole a vracejí na Zemi paprsek laserového družicového dálkoměru (viz dále).



Obr. 2a, b Ukázka geodynamických družic. Americký LAGEOS I (vypuštěn v r. 1976, průměr 60 cm, hmotnost 410 kg, materiál: mosazné jádro, hliníková slupka s odražeči) a francouzská družice Starlette (z r. 1975, 24 cm, 47 kg, jádro z neradioaktivního uranu U238, segment s nenamontovanými odražeči vpravo) © NASA a CNES
Obr. 2c Princip funkce družicového koutového laserového odražeče

Existuje celá řada družic vybavených koutovými odražeči s cílem přesně určit jejich dráhu (za předpokladu, že budou pozorovány laserovými dálkoměry celosvětové sítě), ale to již nejsou pasivní objekty a mají rozmanitě další vybavení. Informace o různých UDZ lze najít např. na <http://www.lib.cas.cz/space.40/>.

Geodynamické družice se zdaleka nehodí na všechno, naopak jsou to velmi specializované a výjimečné objekty. Mají nesmírně přesně určenou dráhu, což se využívá v podstatě dvojím způsobem: pro určení přesných souřadnic laserových dálkoměrů, které tyto družice pozorují, a pro geodynamická studia. Přesný celoplanetární souřadnicový systém má rozmanité použití v teorii i v praxi. V průběhu doby byly odhaleny změny souřadnic v čase, což přispělo k určení pohybů litosférických bloků, na kterých jednotlivé lasery stojí (tj. k ověření teorie deskové tektoniky) a k určení variability základních charakteristik tvaru a gravitačního pole Země (například bylo zjištěno, že se Země postupně nepatrně zakulacuje, čili že se zmenšuje její pólové zploštění).

Je žádoucí, aby všechny družice zkoumající gravitační pole Země – můžeme je nazvat *geodetické* – měly A/m co nejmenší a pokud možno konstantní. To splňují družice poslední dekády CHAMP, GRACE a hlavně GOCE, které ve znalostech o gravitačním poli naší planety (a nejen o něm) přinesly skutečnou revoluci (viz **Družice specializované na studium gravitačního pole Země**).

Pozorování, výpočet dráhy družic a modely gravitačního pole Země

Na počátku (po vypuštění první UDG roku 1957) byla stopa UDG na obloze zaznamenávána jen pouhým okem – pozorovatel mačkal stopky, když byla družice blízko k jasnější hvězdě. Z takových pozorování po celém světě šlo určit dráhu UDG, tedy dráhové parametry (tvar, velikost a orientaci dráhy v prostoru), ovšem jen zhruba. Proto byly vyvinuty speciální *družicové kamery*, které stopu družice na nočním nebi mezi hvězdami vyfotografovaly a pak ze známých souřadnic hvězd (z katalogu) bylo možné spočítat souřadnice a posléze dráhu UDG. Na obr. 3a je jedna z tehdejších kamer SBG (Satelliten Beobachtungs Gerät), Carl Zeiss Jena (tehdejší NDR). V USA měli kamery Baker-Nunn, v Anglii Hewitt a v tehdejší Sovětské svazu a v zemích pod jeho vlivem (včetně ČSSR) AFU (Aftomatičeskaja FotoUstanovka). S těmito prostředky bylo možné určit dráhu s přesností na stovky metrů.

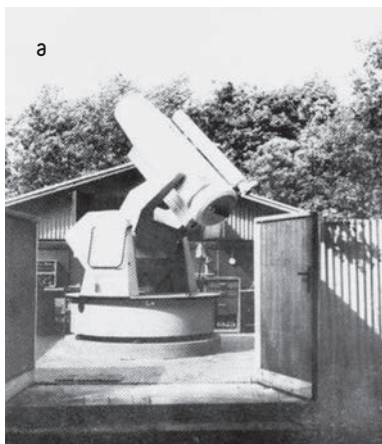
SLR. Koncem šedesátých let přišly na scénu *družicové laserové dálkoměry* (metoda laserového sledování družic, satellite laser ranging, SLR). U nás poprvé v r. 1969 na FJFI ČVUT v Praze, poté v Ondřejově (tehdy jsme byli čtvrtí na světě). Zatímco kamera určuje směr od pozorovatele ke družici, dálkoměr měří tranzitní čas (jak dlouho kratičkový laserový pulz z dálkoměru letí na družici, odrazí se od retroreflektoru na jejím povrchu a letí zpět), z nějž se určí vzdálenost družice od pozorovatele. Typický laserový dálkoměr je na obr. 3b. Byla a je jich na světě řada, ale jejich provoz je drahý, takže jich už nepřibývá (viz internetové stránky ILRS: International Laser Ranging Service). Navíc pomocí SLR lze sledovat pouze družice vybavené koutovými odražeči, jako jsou družice geodynamické, geodetické a některé další. Přesnost měření vzdálenosti byla na počátku metrová, dnes centimetrová. Přesnost určení dráhy se od toho odvíjí.

Dopplerovské aparatury. Princip pozorování vychází z Dopplerova jevu, tedy změny radiové frekvence vysílaného signálu v přijímači, způsobené vzájemnou relativní rychlostí pozorovatele a pozorovaného objektu. Měřením změny frekvence je možno určovat časovou změnu vzdálenosti mezi stanicí a družicí. Tak pracuje DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite), vyvinutý Francouzi. Jde o celosvětovou síť pozemních všesměrových vysílačů frekvence, data jsou zpracovávána na družici vybavené přijímačem a v jistých časových intervalech jsou odesílána do pozemního zpracovatelského centra v Toulouse a ve Francouzské Guyaně.

PRARE (Precise Range And Range-rate Equipment) využívá obousměrné komunikace mezi družicí, která vysílá a přijímá, a pozemní stanicí, která též vysílá a přijímá. Družice vybavená příslušným zařízením vysílá na dvou frekvencích kódovaný signál, pozemní stanice měří fázový rozdíl přijaté vlny a informaci posílá

zpět na družici, kde se ze zpoždění mezi přijatou a vyslanou vlnou měří vzdálenost stanice–družice a z Dopplerova jevu změna této vzdálenosti. Systém byl vyvinut v Německu a byl určen pro družice zaměřené hlavně na dálkový průzkum Země řady ERS. Pozemní stanice jsou rozmístěny plošně po celé Zemi, je jich však podstatně méně než v systému DORIS.

GNSS. Nejrozšířenější současnou observační technologií družicové geodézie jsou globální navigační družicové systémy GNSS (Global Navigation Satellite System), velice dobře známé z běžného života, kde jsou používány pro různé typy „navigací“. Jde o radiovou metodu, při které se měří rozdíl času vyslání (družice) a příjmu (stanice) pseudonáhodného kódu, případně jeho fázový posun, a z toho se určuje vzdálenost mezi družicí a přijímací stanicí. V současné době existují dva kompletní systémy, americký GPS NAVSTAR a ruský GLONASS, další se buduje (evropský GALILEO). Pro určování polohy družic se používá první z nich. Přijímač je v tomto případě umístěn na družici, napozorovaná data jsou odesílána na řídicí stanici.



Obr. 3a (vlevo) Fotografická družicová kamera SBG v Ondřejově (historický snímek s malým rozlišením). Čtyřosá montáž se zrcadlovým dalekohledem s užitným průměrem zrcadla 40 cm



Obr. 3b (vpravo) Družicový laserový dálkoměr v Herstmonceux, Velká Británie. Azimutální montáž, zrcadlový Cassegrainův systém, průměr zrcadla 50 cm. Na fotografii je reálný obraz laserových pulzů viditelných i pouhým okem, vysílaných velmi rychle za sebou (splývají v jednu stopu)

© archiv VÚGTK Pecný-Skalka

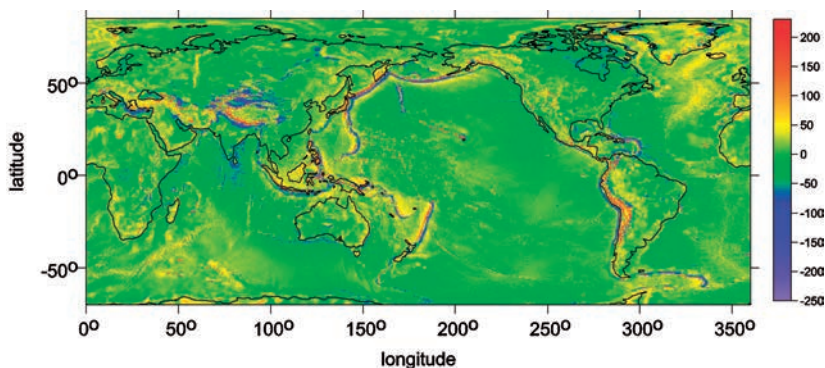
© NASA

Je také možné umístit na oběžnou dráhu kolem Země dvě družice za sebou (například do vzdálenosti 200 km) a nechat je vzájemně se sledovat, měřit vzdálenost mezi sebou a její časové variace. Změny vzdálenosti se dostaví proto, že každá družice letí v danou chvíli nad jinými místy Země, a tak „cítí“ vliv gravitačního pole trochu jinak. Metoda se jmenuje *sledování družice z družice* (satellite-to-satellite tracking, sst) a je známá ve dvou variantách: kromě uvedené mezi dvěma nízkými drahami (low-low sst) také mezi drahou vysokou a nízkou (high-low sst). Oba postupy byly již v praxi vyzkoušeny (i pro určení parametrů gravitačního pole Země) a mají své výhody a nevýhody (viz např. Klokočník, 2009).

Družicová altimetrie (satellite altimetry) a **gradientometrie** (satellite gradiometry) jsou další metody pozorování vedoucí k určení průběhu oceánského geoidu a dalších fenoménů, popřípadě k přímému měření druhých derivací poruchového potenciálu (čili gradientů potenciálu, odtud název gradientometrie), z čehož lze odvozovat parametry gravitačního pole Země.

Nejrůznější družicová pozorování z co největšího počtu stanic na světě se využívají k určení parametrů charakterizujících dráhu (tj. k výpočtu dráhových elementů). Je to neustálý cyklus: měření – určení dráhy – predikce dráhy pro další pozorování (tzv. efemeridy) – další měření, atd. Díky poruchám dráhy se dráha neustále vyvíjí. Z vývoje dráhy lze zpětně usuzovat na vlivy, které za změny odpovídají. Takže vedle dráhových parametrů se určují též rozmanité „neznámé“ veličiny, jako jsou parametry gravitačního pole, souřadnice pozorovacích stanic, parametry charakterizující atmosféru atd. Jde o velmi složitý proces, známý jako „dynamická metoda družicové geodézie“ (Kostecký a kol. 2008). Pokud jde o gravitační pole Země, jsou určovanými veličinami z geofyziky známé Stokesovy parametry neboli harmonické geopotenciální koeficienty (HGK) v rozvoji gravitačního potenciálu v řadu kulových funkcí (nejběžnější přístup). Výsledkem snažení jsou soubory čísel, tj. HGK. Souborům HGK (někdy s „příměsí“ dalších výsledků) se říká *modely gravitačního pole Země*.

První takový model je z r. 1966 (Smithsonian Standard Earth I) a když z jeho HGK spočteme průběh geoidu, uvidíme jen zhruba základní rysy – dnes je známo mnohem více detailů (obr. 1a, b). Z počátku byly známy jen desítky HGK, dnes jsou to, díky kombinaci obřího množství rozmanitých družicových a pozemských (gravimetrických) dat, milióny jednotlivých HGK. Díky tomu můžeme „popsat“ gravitační pole (geoid a z něj odvozené další veličiny, například jeho derivaci v radiálním směru známou jako radiální porucha, velmi blízkou tíhové anomálii) globálně



Obr. 4 Tíhové anomálie odvozené ze soudobého modelu gravitačního pole Země EGM 2008, zkombinovaného z družicových dat mise GRACE, družicové altimetrie, pozemských gravimetrických měření a v místech nedostatku povrchových měření (např. velehorská pásma) z družicového modelu topografie zemského povrchu. Nelineární stupnice je v miligalech, modře jsou negativní, červeně pozitivní tíhové anomálie. Negativní místa ukazují na „nedostatky hmot“, pozitivní na „přebytky“.

Porovnejte s mapkou hranic litosférických bloků (ze školního atlasu, internetu nebo učebnice geologie)

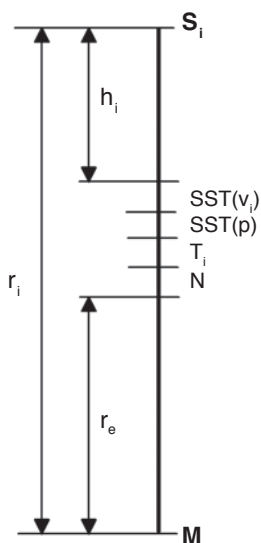
a s rozlišením pod 10 km na zemském povrchu. Vrcholnými díly v tomto směru jsou americký model EGM 2008 (Earth Gravitational Model, Pavlis a kol. 2008, 2012) a německo-francouzský model EIGEN 6C3 (European Improved Gravity model of the Earth by New techniques; Förste a kol. 2013).

Na obr. 4 jsou ukázány tíhové anomálie odvozené z modelu EGM 2008 – je použita jen část do stupně a řádu 1000 v rozvoji gravitačního potenciálu, přičemž model je kompletní cca do 2200. Ono „ukousnutí“ krátkoperiodické složky je pro grafické zobrazení dobře možné, protože na celoplanetárním záběru, jaký je na obr. 4, stejně nevyniknou všechny detaily. Určitým regionům, kde plně zúročíme rozlišení EGM 2008, se věnujeme v dalším textu.

Družicová altimetrie

Zmíňme se ještě o speciální podkategorii družic pro dálkový průzkum Země, o *altimetrických družicích*. Stěžejním přístrojem na palubě je družicový altimetr neboli výškoměr a nápad nést výškoměr a měřit s ním výšku letu pochází pochopitelně z letadel. Koncept altimetrických družic je velmi starý (Lundquist 1967, Lundquist a kol. 1969). K čemu jsou takové družice a jak to souvisí s gravitačním polem? To naznačí obr. 5, kde je znázorněn princip družicové altimetrie.

V okamžiku t_i v bodě S_i vyšle altimetr kratičký signál k nadiru (kolmo dolů, přesněji řečeno ve směru místní vertikály), signál se odrazí od mořské hladiny (odrazy od sněhu nebo pevniny jsou také možné, ale je to komplikovanější) a vrátí se zpět na palubu. Z tranzitního času (doby, po kterou letěl signál z paluby dolů a zpět na družici) se určí „hrubá“ výška h'_i , která po řadě korekcí (přístrojových, ze šíření signálu atmosférou a podle stavu hladiny, od které se signál odráží) dá korigovanou výšku h_i . Na obr. 5 je geocentrický průvodič družice (spojnice těžiště



Obr. 5 Princip družicové altimetrie, vysvětlení v textu.
Převzato z Klokočník a kol.(1994) a Kostecký a kol. (2008)

družice s těžištěm Země) v okamžiku měření označen r_i , průvodič elipsoidu nahrazujícího zhruba tvar Země r_e , symbol N znamená převýšení geoidu nad referenčním elipsoidem a T_i označuje oceánské slapové vlivy; složky topografie moře (sea surface topography, SST; proměnná a konstantní) jsou označeny $SST(v_i)$ a $SST(p)$. Topografie moří a oceánu je definována jako odchylka jejich střední hladiny (zbavené vlnění a vlivu tlaku atmosféry na hladinu oceánu) od geoidu, daná oceánskými proudy, různou salinitou (slaností) vody a dalšími vlivy.

Podle obr. 5 platí

$$r_i = h_i + SST(v_i) + SST(p) + T_i + N + r_e,$$

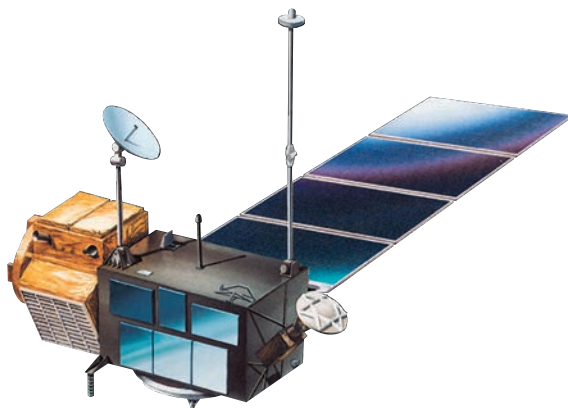
což je základní rovnice družicové altimetrie. Vidíme, že k určení převýšení geoidu N nebo hodnot SST nebo slapů T_i nestačí jen měřit výšku nad mořem, ale musíme též znát r_i čili dráhu družice. K tomu slouží celá škála pozorování (jak už víme) a podle toho vypadá i vybavení altimetrických družic (dopplerovské antény, PRARE, DORIS, GPS, koutové odražeče). Předchozí rovnice naznačuje, že určování jednotlivých veličin v ní uvedených bude iterační proces.

Veličina N je v řádu desítek metrů oproti řádově decimetrům (max. 1,5 m) v případě složek SST a T_i . Z toho plyne, že první aplikace družicové altimetrie se týkaly zpřesnění (oceánské části) geoidu a tím i popisu gravitačního pole Země jako celku. Jak se postupně zpřesňovalo určení dráhy altimetrických družic v radiálním směru díky stále přesnějším měřicím metodám a důkladnějšímu modelování poruch drah, došlo i na menší veličiny.

Od americké družice GEOS 3 (1975), mající poprvé praktické geodetické použití (tj. určení N s metrovou chybou), pomíneme-li úplně první, technologické experimenty na Skylabech z let 1973–1974, jsme se přes americké družice SEASAT (1978) a GEOSAT (1985–1990) a evropskou ERS 1 (1991–1996) dostali až k moderním altimetrickým družicím ERS 2 (European Remote Sensing satellite, ESA) a TOPEX/Poseidon (TOPOgraphic EXperiment, T/P, NASA+CNES, obr. 6). Asi do roku 1990 lze hovořit o experimentální družicové altimetrii, poté již o „altimetrickém provozu“ (GEOSAT Follow-On, JASON 1, 2, ENVISAT). Další informace viz např. Kostelecký a kol. 2008.

Z hlediska A/m altimetrické družice nejsou ideálními objekty, a tak bylo třeba zvládnout výpočet dráhy i s ohledem na negravitační i gravitační poruchy. Byla to dlouhá a obtížná cesta s postupnými aproximacemi (shrnutí v Klokočník a kol. 2008). Od metrové radiální chyby jsme se dostali do řádu centimetrů, a tak je dnes možné studovat i SST a amplitudou pouhé decimetry až metr. „Vějíř aplikací“ družicové altimetrie se tím pádem výrazně rozevřel a komunita uživatelů altimetrických výsledků narostla například o hydrologia a klimatologia.

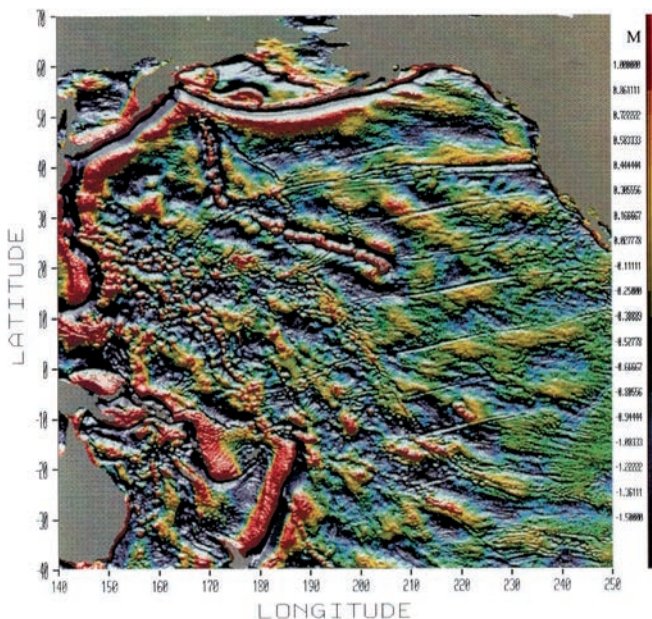
Družicová altimetrie se za posledních dvacet let stala největším přínosem pro určení parametrů gravitačního pole Země a pro příslušné geofyzikální interpretace. Stalo se však mnohem více, jak někteří prozíravě předpovídali (Lundquist 1967, Lundquist et al. 1969): díky dosažené centimetrové přesnosti určení dráhy nejnovějších altimetrických družic v radiálním směru (tj. ve směru altimetrických měření) dnes altimetrie přispívá oceánografům ke studiu topografie oceánu a časových variací topografie včetně zajímavých anomálních, ale významných jevů s velkým



Obr. 6 Altimetrická družice TOPEX/Poseidon (1992–2006). Vybavení: dvoufrekvenční radiolokační výškoměr (altimetr), radiometr, věnec koutových odražečů, anténa DORIS, přijímač GPS, panely slunečních baterií (netypické nesymetrické uspořádání)

© CNES

ekonomickým dopadem v přenosu tepla mezi atmosférou a oceány, jako je El Niño a La Niña (např. Diaz a Markgraf 1992; populárně Cílek 1995). Z delší série měření se vědci snaží detekovat možné sekulární změny (nebo alespoň dlouhoperiodické variace) ve výšce mořské hladiny, tedy přispět k rozhodnutí, zda globální oteplování opravdu existuje (mělo by se projevit jako sekulární trend v topografii oceánů).



Obr. 7 Mořský geoid podle dat starších altimetrických družic v oblasti Tichého oceánu; podle Fu a Cazenave (2001)

Podle klasické práce (Fu a Cazenave 2001) uvádíme známé geofyzikální fenomény jako hřbety a zlomové linie litosféry, zejména subdukční zóny litosféry na obr. 7 v Tichém oceánu. Cílem Cazenavové a dalších nejsou přirozeně krásné obrázky, ale geofyzikální interpretace (stáří litosféry, objevy nových tektonických struktur dříve nerozlišitelných, podmořských hor, atd). Například v Atlantském oceánu dokumentují nové výsledky různou míru segmentace Středoatlantského hřbetu a některé fosilní struktury v severní části oceánu.

SST je úzce svázána s oceánskými proudy. Oceánskými proudy se přenáší asi polovina veškeré energie, kterou Země dostane od Slunce (o druhou část se postará atmosféra). Tlak na lepší modely oceánské topografie vychází od oceánologů.

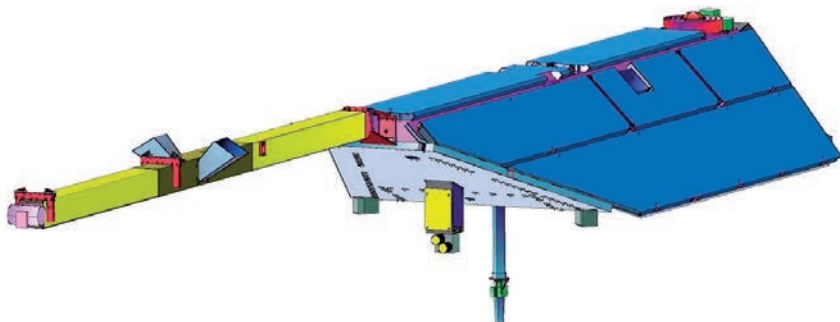
Zatím všechny zmíněné družice měly či mají radarové (přesněji řečeno radiolokační) výškoměry, ale existují již výškoměry interferometrické, kterými jsou vybaveny glaciologické altimetrické družice studující sněhovou a ledovou pokrývku Země (např. mise ESA Cryosat) a výškoměry laserové úspěšně použité na oběžných drahách kolem Měsíce a Marsu (např. mise NASA okolo Marsu Mars Global Surveyor). Proto dnes máme k dispozici mapu Marsu s takovou přesností polohopisu i výškopisu, že bychom se tam mohli vydat jako turisté.

Družice specializované na studium gravitačního pole Země

CHAMP (*CHALLENGING Minisatellite Payload for geophysical research and application*) (2000–2010) byla německá družice pro detailní průzkum gravitačního a magnetického pole Země, vybavená německými, francouzskými a americkými přístroji (obr. 8). Byla vypuštěna z ruského kosmodromu Pleseck dne 15. července 2000 na kruhovou, skoro polární dráhu, do počáteční výšky 450 km. O misi CHAMP se čtenář dozví řadu informací např. z webových stránek GFZ Postupim (GeoForschungsZentrum Potsdam, <http://www.gfz-potsdam.de>).

Design družice je zcela revoluční, do té doby nebývalý. Jeho autorem je bývalý šéf někdejšího projektu CHAMP Prof. Ch. Reigber. CHAMP měl anténu pro určování své polohy pomocí družic GPS a koutové odražeče. V těžišti družice byl umístěn citlivý mikroakcelerometr, který sloužil k měření a následné eliminaci všech negravitačních zrychlení působících na družici, a to s přesností až 10^{-9} m/s² v radiálním i příčném směru a o řád méně podél dráhy letu. Na spodní stěně, která byla stále přivracena k Zemi, byla speciální anténa pro bistatickou altimetrii (varianta altimetrie, díky které se znásobí počet měření, což umožní další prohloubení znalostí oceánografických jevů). Dráha, a tedy i určení okamžité pozice a rychlosti družice CHAMP, byly velmi přesné (± 5 cm).

CHAMP úspěšně pracovala a přesluhovala. Data z ní přispěla k výraznému pokroku při tvorbě modelů gravitačního pole Země. Jak již víme, převýšení geoidu nad referenčním elipsoidem lze pro názornost mnohonásobně přehnat (viz již obr. 1a, b). Tyto znalosti vůbec nejsou jen akademickou záležitostí. Mají použití třeba v oceánografii při studiu topografie moří nebo v geofyzice při zjišťování vnitřní stavby Země (viz níže – GRACE a GOCE).

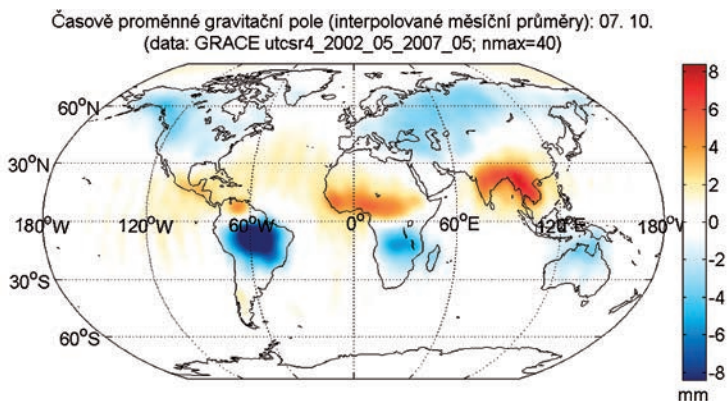


Obr. 8 CHAMP. Nový design družic. Družice vypadá jako střecha domu. Magnetometr je na skládací tyči co nejdále od tělesa družice, anténa pro sledování družice z družic GPS na „horní“ stěně, hvězdné senzory pro určení orientace družice tamtéž, mikroakcelerometr v těžišti družice, koutové odražeče a anténa pro bistatickou altimetrii na „spodní“ straně (stále přivrácené k Zemi)

© GFZ

GRACE (*Gravity Recovery And Climate Experiment*) je dvojice družic, kterou vypustili Američané 17. března 2002 na dráhu podobnou dráze družice CHAMP. Vypadají jako CHAMP, ale bez tyče s magnetometrem. Podrobnější informace o GRACE jsou na uvedených stránkách GFZ nebo na www.csr.utexas.edu/grace/.

Hlavním cílem mise GRACE je studium detailů gravitačního pole Země a jeho časové změny. Dráhy mají až centimetrovou přesnost. Té se dosahuje díky sledování družice z družice – měří se změny vzájemné rychlosti obou objektů pomocí mikrovlnného spojení mezi nimi s přesností na 1 mikrometr za sekundu. Obě družice mají mikroakcelerometry k eliminaci negravitačních zrychlení. Geocentrické polohy obou družic jsou nezávisle určovány pomocí GPS.

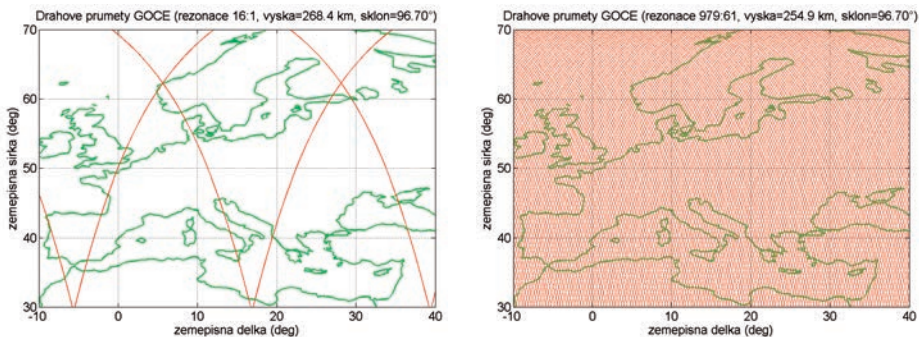


Obr. 9 Roční cyklus v gravitačním signálu z měření mise GRACE. Obrázek ukazuje situaci pro říjen. Vidíme hlavní hydrologické oblasti na pevninách: rovníkové pralesy s vysokými srážkami (maximum signálu od rovníku na sever, minimum na jih). Menší sezónní variace jsou zřejmé v mírném pásmu v Eurasii a Severní Americe. Ovšem tyto sezónní gravitační variace dosahují jen několika milimetrů, což odpovídá změně ve výšce vodního sloupce o několik centimetrů (je to dost slabý signál). Animace celého ročního cyklu viz http://www.asu.cas.cz/~bezdek/Veda_kolem_nas/

Stejně jako CHAMP přispěly i družice GRACE k zpřesnění modelů gravitačního pole Země, ale i k detailnímu lokálnímu popisu pole a jeho časových variací. Příčiny variací jsou mnohé. Například roční cyklus v gravitačním signálu (obr. 9) je především důsledkem přesunu vodních hmot v blízkosti zemského povrchu (na zemském povrchu i pod ním) a úzce souvisí s globálním hydrologickým cyklem. Také vám připadá fantastické, že z družic „vidíme“, jak se mění „zásoby vod“ v různých lokalitách na naší planetě? Pomalu se blížíme k situaci, kdy bude z delší časové řady možné určovat dlouhodobé změny pro hydrologické studie.

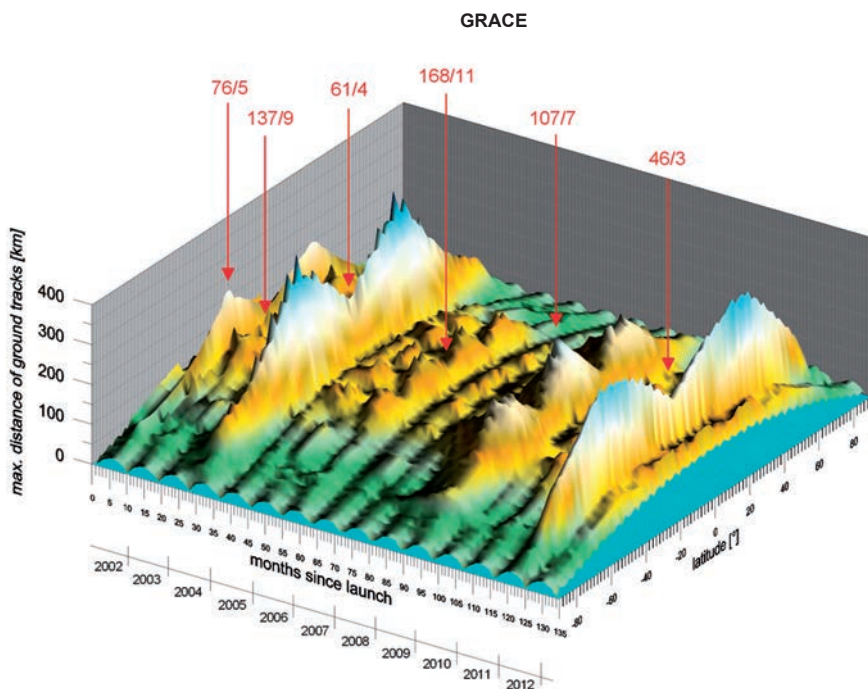
U družic GRACE se stalo něco zvláštního, dálkovými průzkumníky neočekávaného, a přesto logického a běžného z pohledu dráhové dynamiky UDG. V průběhu roku 2004 se náhle a dočasně (asi na čtvrt roku) podstatně, více než o řád, snížila přesnost určení variací gravitačního pole (aniž by ubylo měření, aniž by došlo k nějaké změně měření). Čím to a co s tím?

Průměty dráhy družice na zemský povrch (ground tracks) se v průběhu doby hromadí a mohou se začít opakovat. Jak družice „propadá“ atmosférou, dostávají se postupně (teoreticky pořád jedna za druhou) *dráhové rezonance*. Když družice skutečně β oběhů kolem Země za α dnů (α , β čísla celá, nesoudělná), hovoříme o rezonanci β/α . Dráha družice se vůči zemskému pozorovateli po β obězích za α dnů přesně zopakuje. V době kolem rezonance je hustota průmětů dráhy jiná než „daleko“ od ní (měřeno např. výškou letu). Pokud je β číslo malé, tak je síť subsatelitních bodů řídká, ale namotá se, uzavře se a začne se opakovat rychleji než pro β velké (i kdyby rezonance trvala navěky). Na obr. 10 je názorná ukázka změny hustoty ground tracks mezi rezonancemi 16/1 a 979/61 (výška letu se liší jen málo). Pokud se družice přiblíží k rezonanci s malým β , budou i měření z ní vykonaná velmi řídké rozptýlená po zemském povrchu a výsledky z takového měření pochopitelně utrpí na kvalitě. To přesně se přihodilo družicím GRACE na podzim roku 2004 (rezonance 61/4). Další rezonance, které ovlivňují kvalitu výsledků, se dostávají postupně, jak družice dál a dál volně



Obr. 10 Porovnání hustoty pokrytu zemského povrchu průměty dráhy GOCE (ground tracks) pro dvě různé rezonance (16/1 a 979/61). Ačkoliv výška letu je v obou případech podobná, hustota pokrytu Země je dramaticky jiná. Síť subsatelitních bodů se v případě 16/1 namotá za den, ale je řídká, v případě 979/61 za dva měsíce, ale je velmi hustá. V případě gradientometru (viz kapitolu o GOCE) potřebujeme vybrat rezonanční dráhu s hustým pokrytím (a poté udržovat iontovým motorem), abychom vytěžili maximum ze schopností gradientometru pro určení parametrů gravitačního pole

propadá atmosférou (obr. 11). Nedá se s tím nic dělat, zpracovatelé měření s tím musejí počítat. Pokud by družice měla motorky, bylo by tu řešení (viz výběr drah pro altimetrické družice a GOCE).



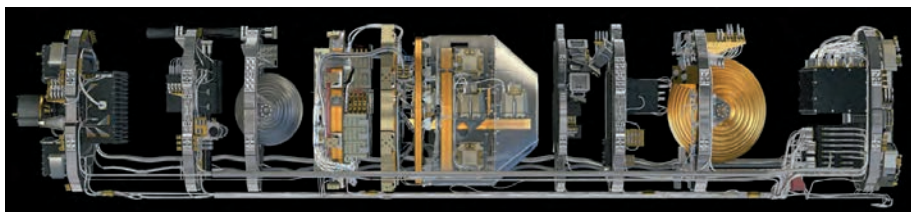
Obr. 11 Změna hustoty pokrytu zemského povrchu měřeními z dvojice družic GRACE při průchodu družic různými dráhovými rezonancemi v průběhu doby (během volného klesání družic atmosférou bez ovlivňování raketovými korekčními motorky). Čím nižší β , tím větší vzdálenost průmětů dráhy a tím nižší kvalita veličin z měření odvozených. Na obrázku je vidět též významná závislost hustoty pokrytu na zeměpisné šířce. Podle Wagner a kol. (2006) a Klokočník a kol. (2008)

Družici GOCE (*Gravity field and steady-state Ocean Circulation Experiment*, obr. 12 a na obálce) vypustila v r. 2009 Evropská kosmická agentura (ESA). (Správná výslovnost podle ESA je „goče“, vzhledem k tomu, že hlavním dodavatelem je italská firma Thales Alenia Space, ale řada vědců té družici stále říká „gous“.) GOCE byl první UDZ na světě, která měla na palubě gradientometr jako kombinaci mikroakcelerometrů. Tím se měří přímo v kosmickém prostoru druhé derivace gravitačního potenciálu Země, veličiny velmi citlivé k lokálním nehomogenitám gravitačního pole. Podobná měření lze uspořádat i na zemském povrchu, ale jen v omezeném rozsahu a s malou, dnes nepostačující přesností. Více o GOCE se dozvíte např. na www.earth.esa.int/workshop/goce06 nebo www.esa.int/SPECIALS/GOCE. GOCE zvenčí je na obr. 12 (malířova představa družice na dráze kolem Země) a zevnitř na obr. 13.

Obr. 12 Družice GOCE na oběžné dráze (malířova představa). Stíhlý, aerodynamický tvar pět metrů dlouhého tělesa bez obvyklých pohyblivých částí a vyčnívajících slunečních panelů byl mezi družicemi unikátní. Proto byl GOCE nazván v tisku „ferrari“ mezi družicemi
© ESA/AOES Medialab



Přesnost měření mikroakcelerometrů na palubě GOCE je úžasná. Pro názornost: představme si vložku padající z oblaků na letadlovou loď. Každá akce vyvolá reakci. Vložka udělí letadlové lodi jisté, i když zcela nepatrné zrychlení. Asi tak malá zrychlení v gravitačním poli měří mikroakcelerometry gradientometru na družici GOCE.



Obr. 13 GOCE uvnitř - pohled do útrob družice GOCE s gradientometrem v jejím těžišti a vybavením pro kalibraci gradientometru, přijímači GPS, hvězdnými kamerami, avionikou, tanky s palivem a dalším
© ESA/AOES Medialab

GOCE byla navedena na velmi nízkou a skoro polární dráhu (výška letu na počátku byla 275 km, posléze jen kolem 250 km). Po krátké době byla „ukotvena“ na dráze, jejíž výška byla udržována raketovými motorky dle pokynů mikroakcelerometrů tak, aby se po určitou dobu měnila co nejméně. Díky iontovému motoru to jde s přesností 5 m ve výšce, což je naprosto úžasné (u altimetrických družic byly podobné zásahy na úrovni stovek metrů či spíše jednoho kilometru).

V průběhu letu (2009–2013) dodala družice obrovské množství gradientometrických dat. Měla jen jeden vážný výpadek, a ten nesouvisel ani s gradientometrem, ani s iontovým motorem, ale s palubním počítačem. Problém byl zažehnán, ale data z období červenec až září 2010 byla ztracena.

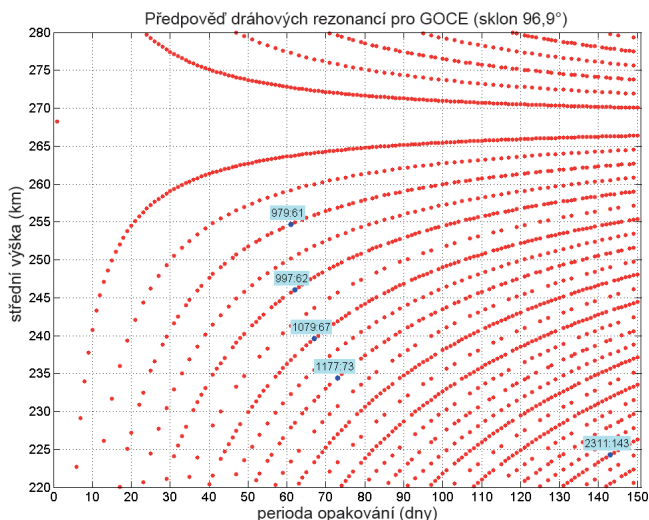
Aplikace měření GOCE zahrnují zpřesnění parametrů gravitačního pole globálně i lokálně, oceánologii a klimatologii a skvělým způsobem doplňují výsledky z družicové altimetrie. Průběh plochy geoidu má být odvozen s přesností na 1–2 cm s rozlišením detailů do 100 km na zemském povrchu.

GOCE na rozdíl od všech jiných družic byla navedena a je udržována na předem vybraných rezonančních drahách, důkladně zdůvodněných před vypuštěním (obr. 14). Takže rezonanční dráhy byly cílem, nikoli „pro zlost“ jako u GRACE. Výjimečná situace pro GOCE existuje proto, že družice je vybavena iontovým motorem s velmi malým, ale trvalým tahem. To je technicky nové řešení.

V průběhu dosavadního letu GOCE byla zvolena a pro měrické fáze v období 2009–2012 udržována dráha 979/61 ve výšce 250 km. Měření probíhala skoro do konce r. 2013 a byla vyzkoušena ještě nižší dráha (s vyšší citlivostí gradientometru, ale i s vyššími nároky na iontový motor). Po vyčerpání paliva pro iontový motor následoval prudký sestup způsobený odporem atmosféry. Poslední pozorování družice je z výšky 113 km. Poté družice shořela v hustých vrstvách atmosféry.

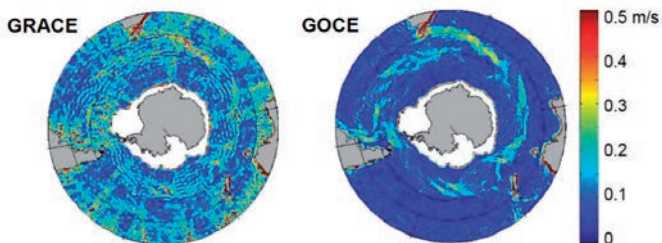
Dnes, díky GOCE, máme poprvé v historii dráhové dynamiky umělých družic Země v ruce prostředek, jak řízeným jemným doladováním dráhy (malými

úpravami výšky letu) můžeme maximalizovat přesnost gravitačních výsledků. Této aktivity jsme se v rámci ESA účastnili i v ASÚ AV ČR Ondřejov (Bezdek a kol. 2009).



Obr. 14 Jemné doladování dráhy – rezonanční diagram ukazující vybrané rezonanční dráhy družice GOCE. Na ose x je a , na ose y výška letu a hodnoty β jsou v poli grafu. Po vypuštění byla GOCE navedena na dráhu ve výšce asi 275 km. Tečka vlevo nahoře u výšky asi 268 km patří rezonanční dráze $\beta/a=16/1$, které bylo radno se vyhnout. Výběr dráhy pro měření gradientometrem se uskutečnil ve výškách pod dráhou 16/1 s alespoň dvouměsíční periodou a (primární požadavek ESA). Nejdéle měřila družice GOCE v rezanci 979/61 ve střední výšce 255 km. Ke konci životnosti GOCE byla provedena změna na extrémně nízkou dráhu ve výšce 224 km (rezonance 2311/143)

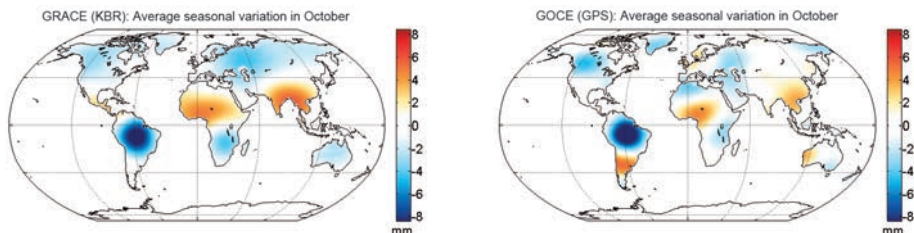
Přínos GOCE pro určení parametrů gravitačního pole není ani tak v dosažení ještě vyšších stupňů a řádů v rozvoích gravitačního potenciálu v řadu kulových funkcí (to obstarávají především pozemská data) jako spíše ve zpřesnění stávajících parametrů a upřesnění těch, které si lze geometricky představit jako vlny o délce stovek až tisíce kilometrů. Družice GOCE dodala měření pro oblasti, které



Obr. 15a, b Povrchové (geostrofické) oceánské proudy (rychlost je v m/s) vlevo podle měření Z GRACE, vpravo s daty z GOCE. (Pail a kol. 2011)

jsou pro pozemní měření obtížně dostupné, např. Himálaj. Pokud jde o oceánologii, ukazujeme na obr. 15a, b povrchové oceánské proudy z GOCE v porovnání s výsledky z předchozích dat (podle Paila a kol. 2011).

Mise GRACE umožnila detekovat sezónní změny v gravitačním poli. Na obr. 16 vlevo jsou tyto roční variace ukázány pro měsíc říjen, kdy dosahují maxima (jedná se ale o pouhých pár milimetrů ve výšce geoidu). Na obr. 16 vpravo jsou tyto změny vypočtené z dat GOCE (Bezděk a kol., 2013).

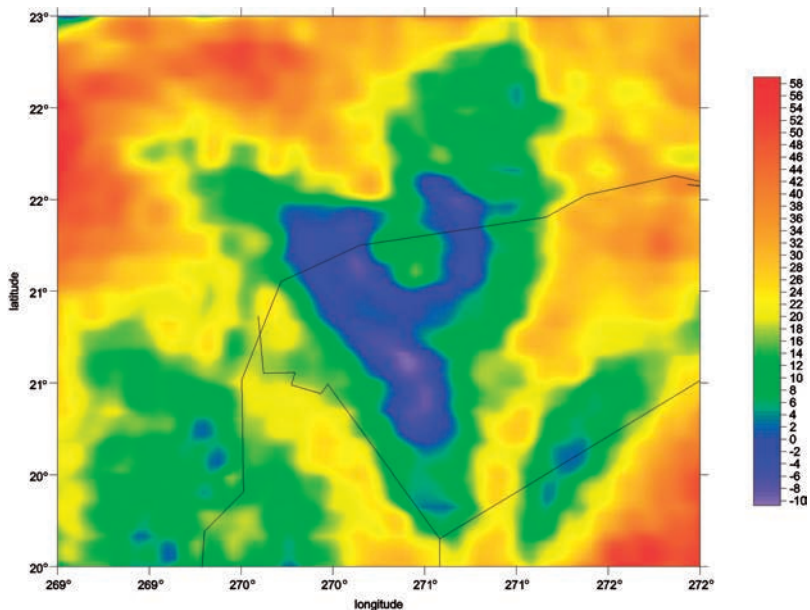


Obr. 16a, b Časově proměnné gravitační pole z měření GRACE a GOCE. Nalevo je průměrná změna gravitačního signálu v říjnu z měření mise GRACE; tuto roční variaci lze spočítat, ovšem s menší přesností, z dráhových změn družice GOCE (obrázek vpravo)

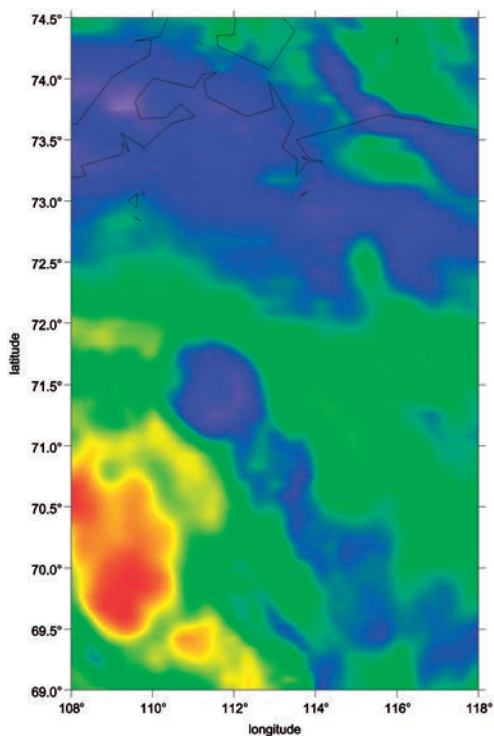
Něco takového jako byla mise GOCE hned tak mít nebudeme: na hraně technologických možností současnosti a, až na jeden vážný problém, fungující tak, že díky výsledkům z ní se podstatně posunuje úroveň znalostí o naší planetě. Výsledky z ní se budou roky zpracovávat. V současné době stále ještě funguje mise GRACE, jejíž měření slouží ke studiu časových změn gravitačního pole. Někdy okolo roku 2017 by měla být vypuštěna družice, která bude v těchto měřeních pokračovat (tzv. GRACE-Follow-On). Pokud by už přеслужující družice GRACE přestaly fungovat, zvažuje se varianta využít ke sledování gravitačního pole dráhová data z právě vypuštěné mise SWARM, primárně určené pro studium magnetického pole Země (<http://www.esa.int/swarm/>).

Ukázky geoaplikací

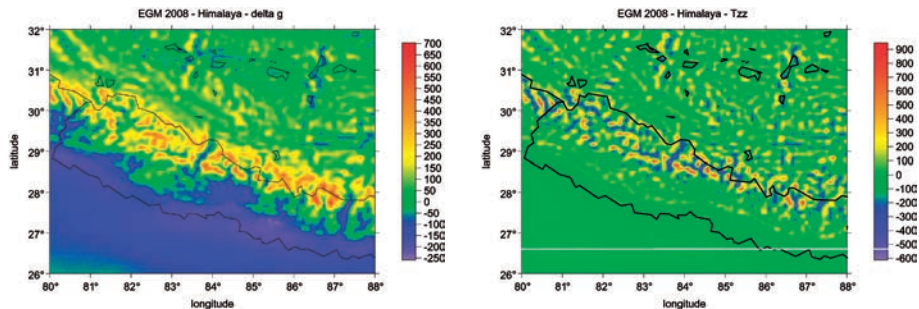
Jako příprava na misi GOCE sloužily i rozbory a testy s modelem Země EGM 2008. (Poté pokračovaly s modelem EIGEN 6C3, ve kterém jsou již data z GOCE.) Počítali jsme různé funkcionály a „deriváty“ gravitačního potenciálu (Klokočník a kol. 2013, www.asu.cas.cz/~jklokocn). Tyto pokusy vyústily mimo jiné v ověřování existence impaktních kráterů na Zemi a dokonce v objev nových kandidátů na impaktní krátery (Klokočník a kol. 2009), viz obr. 17a, b pro Chixculub a Popigaj. Morfologické aplikace odhalily zajímavé skutečnosti pro Himálaj (Kalvoda a kol. 2013), obr. 18a, b. Příklad japonských podmořských sopek a subdukčních zón podle virtuálních deformací je na obr. 19. Pro dobře prozkoumané oblasti EGM 2008 ukazuje geologům, geofyzikům, geomorfologům a dalším známé věci (platí například pro Čechy nebo Izrael, obr. 20). Na místa málo prozkoumaná můžeme zkusit poznatky extrapolovat a v součinnosti s dalšími geovědci případně i něco objevit...



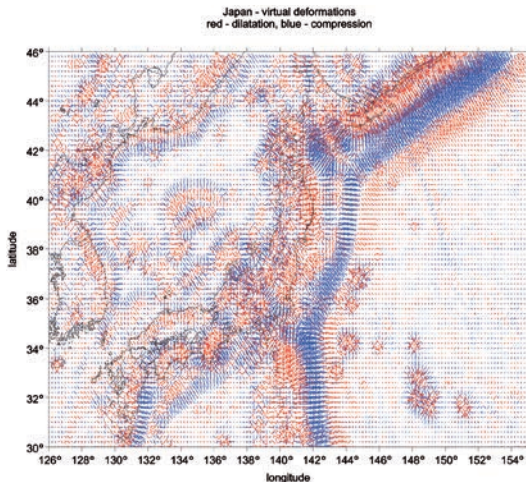
Obr. 17a Tíhové anomálie (blízke gravitačným poruchám) podle EGM 2008 v oblasti Yukatánu. Vedle známého obřího impaktního kráteru, který byl objeven při průzkumu ložisek ropy, může být na severovýchod od něj ještě jeden menší (Klokočník a kol. 2009)



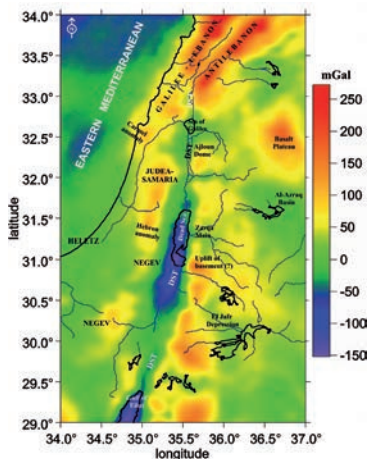
Obr. 17b Tíhové anomálie podle EGM 2008 (v miligalech) v oblasti Sibíře. Vedle impaktního kráteru Popigai (modrý kruhový útvar s výraznou negativní tíhovou anomálií), známého kvůli gulagu na těžbu diamantů, mohou být směrem na jihovýchod od něj ještě krátery další (Klokočník a kol. 2009)



Obr. 18a, b Tíhové anomálie (měřítko v miligalech) a druhé derivace v radiálním směru (jednotky jsou v tomto případě Eötvös) podle EGM 2008 pro Himálaj. Geomorfologická interpretace viz Kalvoda a kol. (2013)



Obr. 19 Virtuální deformace podle EGM 2008 pro oblast Japonska. Modře jsou zóny komprese, červeně dilatace. Geomorfologická interpretace viz Kalvoda a kol. (2013)



Obr. 20 Popis geologům dobře známých útvarů. Tíhové anomálie podle EGM 2008 v oblasti Izraele a okolních států (Klokočník a kol. 2009)

Text brožury zpracovali Jaroslav Klokočník a Aleš Bezděk z ASÚ AV ČR, v. v. i., a Jan Kostecký z VÚGTK Zdi by 98 a HGF–TU Ostrava, s využitím následující literatury a podkladů:

Bezděk A., Klokočník J., Kostecký J., Floberghagen R., Gruber C., 2009. Simulation of free fall and resonances in the GOCE mission. *Journal of Geodynamics* 48, str. 47–53; Bezděk A., Sebera, J., 2013. MATLAB script for 3D visualizing geodata on a rotating globe. *Computers & Geosciences* 56, str. 127–130; Bezděk A., Sebera J., Klokočník J., Kostecký J., 2013. *Average time-variable gravity from GPS orbits of recent geodetic satellites*. VIII Hotine-Marussi Symposium, Rome, Italy, 17–21 June 2013; Diaz F. H., Markgraf V., eds., 1992. *El Niño*. Cambridge Univ. Press; Floberghagen R., Fehringer M., Lamarre D., Muzi D., Frommknecht B., Steiger C., Pineiro J., da Costa A., 2011. Mission design, operation and exploitation of the gravity field and steady-state ocean circulation explorer mission. *Journal of Geodesy* 85, str. 749–758; Förste C., Bruinsma S., Abrykosov O., Flechtner F., Dahle C., Neumayer K. H., Barthelmes F., König R., Marty J. C., Lemoine J. M., Biancale R., 2013. EIGEN-6C3 – The newest high resolution global combined gravity field model based on the 4th release of the GOCE direct approach. *Book of Abstracts*, The IAG Scientific Assembly 2013, 150th Anniv. IAG (Potsdam 2013); Fu L. L., Cazenave A., 2001. *Satellite Altimetry and Earth Sciences*. London: Academic Press. Klokočník J., Kostecký J., Karasová D., 1994. Satellite Altimetry and its Use in Geoscience. *Edice VÚGTK* 40(12), 157 stran; Klokočník J., Kostecký J., Wagner C. A., 2008. Improvement in the radial accuracy of altimeter-satellite due to the geopotential. *Earth-Science Reviews*. Elsevier 91, str. 106–120; Klokočník J., Wagner C. A., McAdoo D., Kostecký J., Bezděk A., Novak P., 2008. Changes in accuracy of gravity recovery due to ground track variability: GRACE, CHAMP, and GOCE, poster *AGU 2007*. *Journal of Geodesy* 82, str. 917–927; Kostecký J., Klokočník J., Kostecký jr. J., 2008. *Kosmická geodézie*. FSV ČVUT Praha (skripta); Lundquist C. A., 1967. Satellite Altimetry and Orbit Determination. *Smiths. Astrophys. Obs. SAO Rep.* 248, Cambridge, Mass., USA; Lundquist C. A., Giacaglia G. E. O., Hebb K., Mair S. G., 1969. Possible Geopotential Improvement from Satellite Altimetry. *Smiths. Astrophys. Obs. SAO Rep.* 294, Cambridge, Mass., USA; Pail R. a kol., 2011. Combination of GOCE data with complementary gravity field information. *Proceedings of 4th International GOCE User Workshop*, 696, *ESA Special*; Pavlis N. K., Holmes S. A., Kenyon S. C., Factor J. K., 2008. An Earth Gravitational Model to degree 2160: EGM 2008. *EGU General Assembly 2008*, 13–18th April, Vienna, Austria; Pavlis N. K., Holmes S. A., Kenyon S. C., Factor J. K., 2012. The Development and Evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM 2008). *J. Geophys. Res.*; Rummel R., 1986. Satellite gradiometry. Editor H. Suenkel. *Lecture Notes in Earth Sciences* 7, Mathem. and Numer. Techn. in Phys. Geodesy, Berlin: Springer, str. 317–363; Wagner, C. A., McAdoo D., Klokočník J., Kostecký, J., 2006. Degradation of geopotential recovery from short repeat-cycle orbits: application to GRACE monthly fields. *Journal of Geodesy* 80(2), 2006, str. 94–103.

Stelární oddělení se zabývá studiem hvězd, dvojhvězd, hvězdokup, galaxií a extragalaktických objektů v širokém rozsahu spektra elektromagnetického záření. Výzkum se týká především tzv. horkých hvězd, zejména hvězd spektrální třídy B. Jedná se o hmotné, velmi svítivé hvězdy, přičemž významná část těchto hvězd vykazuje přítomnost hvězdného disku. Existence a fyzikální vlastnosti disků však dosud nejsou uspokojivě vysvětleny. Výzkum lze rozdělit na praktické studium hvězdných spekter a teoretické studium atmosfér hvězd a hvězdného větru s využitím náročných numerických simulací. Studovaná spektra jsou jednak pořizována ondřejovským dvoumetrovým dalekohledem, ale také v mezinárodní spolupráci i na jiných observatořích. Oddělení se zabývá také studiem bílých trpaslíků, jejich klasifikací a určováním základních fyzikálních parametrů z porcízených spekter. Astronomický ústav AV ČR se podílí na projektu satelitu Gaia, který bude od roku 2014 po dobu pěti let systematicky měřit přesné polohy, jasnosti a radiální rychlosti miliardy nebeských objektů. Probíhá také výzkum galaktických a extragalaktických kosmických zdrojů záření vysokých energií ve viditelném světle a v oboru X a gama záření. Předmětem výzkumu jsou různé typy binárních rentgenových zdrojů, záblesky záření gama a jejich optické dosvity.

Oddělení galaxií a planetárních systémů se zabývá studiem vývoje izolovaných galaxií nebo galaxií ve skupinách a kupách, vznikem hvězd a hvězdných soustav. Pozorování v infračerveném, ultrafialovém a rentgenovém oboru světelného spektra se porovnávají s analytickými modely a výsledky počítačových simulací gravitačních a magnetohydrodynamických procesů. V rámci obecné teorie relativity se analyzují a modelují vlastnosti kompaktních objektů, jako jsou jádra aktivních galaxií, neutronové hvězdy nebo mikrokvasary. Dále se oddělení zabývá studiem rotace Země, jejího gravitačního pole a gravitačního pole ostatních těles sluneční soustavy, studiem dynamiky a vývoje ve skupinách galaxií nebo galaktických kupách, studiem vzniku a vývoje hvězd a hvězdokup a dynamiky plynu v galaxiích. Studuje dynamiku galaktické soustavy Mléčná dráha – Magellanovy oblaky, dále vyfukování volného plynu z galaxií vlivem jejich pohybu v prostředí a prostorově rozlišenou spektroskopii galaktických jader. Vědci se věnují fyzice kompaktních objektů (neutronových hvězd a černých děr) a studují procesy odehrávající se v jejich blízkosti. Na základě výpočtů a simulací modelují vlastnosti produkovaného rentgenového záření, jeho spektra, polarizaci a časovou proměnnost. Provádějí teoretické výpočty v oblasti elektrodynamiky černých děr a teorie akrečních disků a studují dynamiku přirozených i umělých těles ve sluneční soustavě. Z pozorování fotografického zenitového dalekohledu se určují neslapové variace místní tížnice a zpřesňují se astronomické pozice pozorovaných hvězd. Přípravuje se také velmi přesný hvězdný katalog.

Součástí oddělení galaxií a planetárních systémů je také skupina **Planetární soustavy**, v níž pracují dva z autorů této brožury. Zabývají se gravitačními a negravitačními poruchami ve drahách umělých družic Země s cílem určovat z nich parametry gravitačního pole a atmosféry Země. Věnovali se delší dobu družicové altimetrii a nyní družicové gradientometrii, konkrétně družici GOCE (mise Evropské kosmické agentury – ESA – <http://earth.esa.int/GOCE/>), která jako první měla na palubě gradientometr (díky kombinaci šesti mikroakcelerometrů měří gradientometr přímo druhé derivace gravitačního potenciálu).

Autoři se zúčastnili jemného doladování dráhy GOCE v součinnosti s ESA, jehož cílem je maximální využití kapacity gradientometru pro určení parametrů gravitačního pole. Výsledky z GOCE mají rozmanité geovědní využití – v tomto ohledu vědci spolupracují s geomorfology, geology, geofyziky a dalšími. V listopadu 2013 vypustila ESA tři družice Swarm. Hlavním cílem mise je studium geomagnetického pole. Každá družice nese také GPS přijímač a mikroakcelerometr. Autoři se podílejí na kalibraci dat akcelerometru a zaměří se na využití přesných drah družic Swarm ke studiu časových změn zemského gravitačního pole.

Astronomický ústav AV ČR se významnou měrou podílí na naplňování členství České republiky v Evropské jižní observatoři a Evropské kosmické agentuře. V současné době ondřejovští vědci nepracují pouze s přístroji na observatoři v Ondřejově, ale také s dálkově řízeným dalekohledem o průměru 154 cm umístěným na observatoři La Silla Evropské jižní observatoře v poušti Atacama v Chile. Ve spolupráci se státy EU a USA a dříve také v rámci programu INTERKOMOS byly navrženy a zkonstruovány přístroje pro vesmírný výzkum – např. družicový mikroakcelerometr, který byl umístěn na palubě amerického raketoplánu Atlantis a na další samostatné družici, či fotometr pro oblast tvrdého rentgenového záření, který pracuje na americké družici MTI. V současné době se Astronomický ústav podílí na řadě projektů Evropské kosmické agentury a vyvíjí několik vědeckých přístrojů na palubu plánovaných sond, např. na sluneční sondu Solar Orbiter s předpokládaným startem v roce 2017. V kosmickém výzkumu v České republice hraje ústav primární roli.

V EDICI VĚDA KOLEM NÁS PŘIPRAVUJEME:

Martin Štefko: **Diskriminace v zaměstnání a obrana proti ní**

DOSUD VYŠLO:

Eva Semotanová: **Historická krajina Česka a co po ní zůstalo**

Pavel Peterka a kol.: **Vláknové lasery**

Edice Věda kolem nás | Co to je...

Družice a gravitační pole Země | Jaroslav Klokočník a kol.

Vydal Astronomický ústav AV ČR, v. v. i., Fričova 298, 251 65 Ondřejov v Nakladatelství Academia, Středisko společných činností AV ČR, v. v. i., Vodičkova 40, 110 00 Praha 1. Grafickou úpravu a obálku navrhl Jakub Krě, studio Lacerta. Technická redaktorka Monika Chomiaková. Odpovědná redaktorka Petra Královcová. Vydání 1., 2014, Ediční číslo 11712. Sazba a tisk **SERIFA**®, s. r. o., Jínovická 80, 158 00 Praha 5.

Další svazky získáte na:

www.vedakolemnas.cz | www.academiaknihy.cz | www.eknihy.academia.cz