



Země v pohybu

Přestože vědci upírají zrak hlavně do hlubin vesmíru, i naše planeta je z hlediska astrometrických pozorování velmi zajímavá. Pojdme se seznámit s jejími orbitálními pohyby, rotačními parametry či efemeridami. Průvodcem nám bude Jan Vondrák z Astronomického ústavu Akademie věd

Ptala se Jana Žďárská

? Nedávno jste oslavil osmdesáté první narozeniny, a nadále se vědě aktivně věnujete. Vzpomenete si, s jakými badatelskými sny jste do vědeckého prostředí coby čerstvý absolvent vstupoval?

Při nejlepší vůli si nemohu vzpomenout, že bych někdy měl nějaký takový plán, to snad ani není možné. Vědecké úkoly podle mě vyvstávají před člověkem jaksí samy od sebe a v podstatě nečekaně, na základě studia literatury, předchozích výsledků, diskusí s kolegy v oboru a podobně. Určitě jsem k vědecké práci přistupoval spíše metodou jakéhosi pokračování či vylepšování výsledků svých předchůdců nežli snahou o nějaký zcela originální výsledek.

? Vybavíte si, jaké to bylo, když jste se poprvé jako student podíval na neplné hvězdy?

V Prachaticích, kde jsem studoval, nebyla hvězdárna. A tak jsem si od našeho gymnaziálního profesora matematiky a fyziky Václava Holíka občas půjčoval domů malý školní astronomický dalekohled, kterým jsem pozoroval hlavně Měsíc. Bral jsem to tehdy spíše romanticky, představoval jsem si, že by tam mohli v kráterech žít Měsíčané a podobně, ale nikdy jsem žádného nezahledl.

? Astronomie se vám stala láskou na celý život a věnoval jste se především numerickému zpracování pozorovaných dat. Které další oblasti astronomie vás zaujaly?

Zabýval jsem se astrometrickým pozorováním rotačních parametrů Země, orbitálního pohybu Měsíce a zemské rotační dynamiky – tedy studiem slapové a rotační deformace, vlivu planet na precesi i nutaci a geofyzikální excitaci orientace Země. Pracoval jsem také na navázání katalogu Hipparcos na extragalaktický systém (*viz dále*) a věnoval jsem se též výpočtům efemerid nebeských těles (*viz Slovníček*), kombinaci parametrů orientace Země z různých kosmických technik a v poslední době se zaměřuji rovněž na studium mayských astronomických pozorování.

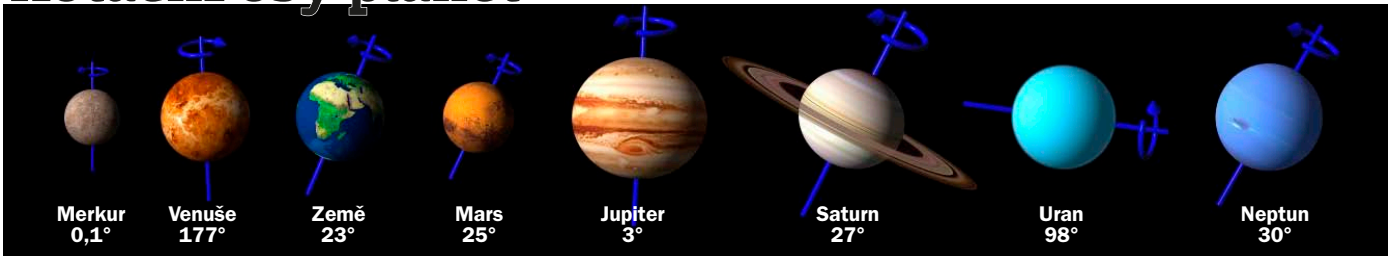
? Základní bod vašeho výzkumu tvoří rotace Země a její pohyb kolem vlastní osy, tedy pomyslné přímky spojující severní a jižní zeměpisný pól. Jaké další informace můžeme z rotačních parametrů naší planety získat?

Země se otáčí kolem své osy, která kromě zemských pólů v prodloužení protíná také póly nebeské na pomyslné nebeské sféře.

Naše planeta rotuje směrem k východu, z pohledu Polárky se tudíž jedná o pohyb proti směru hodinových ručiček. Jedna otočka počítaná vůči hvězdám trvá dvacet tři hodin, padesát šest minut a čtyři sekundy, tedy jeden siderický den. Vzhledem ke Slunci je to v průměru čtyřicet dva hodin, čemuž odpovídá střední sluneční den. Z hlediska pozorovatele na povrchu Země se zemská rotace projevuje střídáním dne a noci, poledne však nastává na každém poledníku jindy. Kvůli sjednocení času, vynucenému zejména rozvojem železniční dopravy, byl již na konci devatenáctého století zaveden pásmový čas. Vlivem přesunů hmot na povrchu i uvnitř planety ovšem není pozice rotační osy v zemském tělese zafixovaná – poloha pólů se postupně i periodicky mění v rozmezí desítek až stovek metrů. Ani rychlost rotace není zcela konstantní: Délka dne postupně narůstá a kolísá v rozmezí několika tisíců sekund.

? Rotační osa Země je však skloněná, a navíc zde působí i další jevy jako již zmíněná precese a nutace. Co si můžeme pod uvedenými pojmy představit? Sklon rotační osy od kolmice na ekliptiku

Rotační osy planet



Každá planeta má osu rotace skloněnou jinak, v důsledku vlastního vývoje a vnitřní dynamiky, ale také gravitačního působení ostatních těles a velkých kolizí

činí asi dvacet tři a půl stupně. Působením různých vlivů se ovšem poloha nebeské osy vůči hvězdám mění. Uvedené pohyby se nazývají precese a nutace a jsou vynuceny působením vnějších sil ostatních těles naší soustavy – hlavně Měsíce a Slunce – na rotující zploštělou Zemi. Osa rotace tak v nebeském systému opisuje plášť kužele okolo kolmice k ekliptice s periodou asi šestadvacet tisíc let, přičemž ani sklon osy k ekliptice není zcela konstantní: Zde hovoříme o precesi. Relativně krátkoperiodické změny, s periodami od několika dní až po desítky let a s amplitudami řádově do deseti obloukových sekund, se pak nazývají nutace.

? Rotačního pohybu Země se týká i takzvaný efemeridový čas neboli ET. Jak se k němu podařilo dospět?
Po dlouhá staletí čas definovala rotace Země, která se považovala za rovnoměrnou.

Základ pro veškeré časové údaje tedy představoval čas světový, daný otáčením naší planety. Veřejnosti se sděloval prostřednictvím rádiových signálů, přičemž astronomové na základě pozorování na svých observatořích počítali jejich odchylky od světového času a ty pak publikovala Mezinárodní časová služba s centrem

z pozorování zákrytů hvězd Měsícem.
? Proč je efemeridový čas pro astronomy tak důležitý?

Jeho důležitost spočívala právě v tom, že představoval nezávisle proměnný argument pro výpočet efemerid těles Sluneční soustavy. Předpokladem výpočtu poloh nebeských těles z rovnic jejich pohybu

Vlivem přesunů hmot na povrchu i uvnitř zemského tělesa v něm není poloha rotační osy zafixovaná

v Paříži. Snahou bylo udržovat dané signály ve shodě s časem světovým. Postupně se však zjistilo, že zemská rotace rovnoměrná není, a tak se Mezinárodní astronomická unie v roce 1958 rozhodla zavést takzvaný efemeridový čas. Odborníci ho definovali prostřednictvím oběhu Země okolo Slunce podle Newcombovy teorie z konce devatenáctého století, v praxi jej ovšem určovali

je rovnoměrný časový argument. Pokud tomu tak není, dochází při srovnání teorie s pozorováním k systematickým odchylkám. K efemeridovému času tak můžeme dojít zpětnou interpolací v tabulce efemerid – ze sledované polohy tělesa naší soustavy dostáváme čas, kdy bylo pozorování provedeno.

? Sklon zemské rotační osy způsobuje střídání ročních období v mírném pásu a období sucha a deštů v pásu tropickém. Jak by to vypadalo, kdyby měla osa rotace sklon nula nebo devadesát stupňů? A mohl by na naší planetě existovat život i v takových podmínkách?

Pokud by se sklon rotační osy blížil nultému stupni, měly by den a noc ve všech zeměpisných šířkách dvanáct hodin, přičemž na rovníku by Slunce kulminovalo vždy v zenitu. Směrem k pólům by jeho výška nad obzorem v době kulminace postupně klesala a v extrémním případě na pólech by se pak pohybovalo stále na horizontu. Podnebí, srážky a průměrné teploty by určovala hlavně zeměpisná šířka, bez ohledu na roční období. Pozemské formy života by neměly důvod se měnit ročními obdobími, neboť by nenastávaly.

Pokud by však sklon osy činil

Kdo je...

**Ing. Jan Vondrák,
DrSc., dr.h.c. (*1940)**

Od roku 1977 je vědeckým pracovníkem Astronomického ústavu Akademie věd ČR. V roce 2011 mu byl na Observatoire de Paris udělen čestný doktorát. Od roku 1973 je členem České astronomické společnosti, v letech 2010–2017 působil jako její předseda. V roce 1979 se stal členem Mezinárodní



astronomické unie, kde zastával řadu významných funkcí. Je rovněž členem Evropské astronomické společnosti, Mezinárodní geodetické asociace či Americké geofyzikální společnosti.

Obdržel mnoho ocenění, naposledy loni cenu Littera Astronomica ČAS, a publikoval kolem tří set prací, z toho téměř dvě stovky v impaktovaných mezinárodních časopisech s více než tisícem citací.

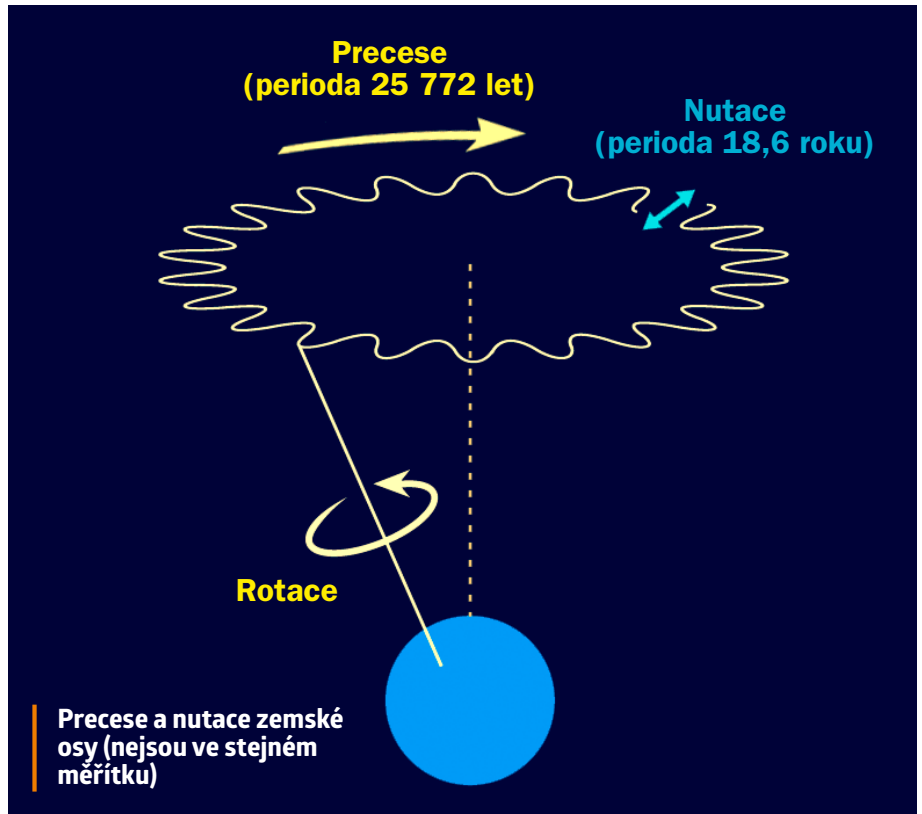
devadesát stupňů, byla by situace mnohem dramatičtější: Dvakrát do roka by bylo Slunce v zenitu pouze na jednom z pólů, a to v době, kdy by osa rotace směřovala přímo k němu. Osvětlená by tak byla pouze severní či jižní polokoule. A dvakrát do roka by se situace podobala předchozímu případu se sklonem nula stupňů, a to tehdy, když by osa směřovala kolmo ke Slunci.

? Rotace Země kolem vlastní osy vyvolává odstředivou sílu, jež způsobuje vyduť na rovníku a zploštění na pólech. Jaké další důsledky to s sebou nese?

Hlavně jde o zdánlivou Coriolisovu sílu, která působí na všechny pohybující se hmoty na povrchu rotující Země. Tak například jakákoliv hmota, jež se pohybuje ve směru poledníku, se od přímé trajektorie odklání na severní polokouli doprava, na jižní doleva. Týká se to jak meteorologie – stáčení tlakových níží a výší – tak proudění v řekách či oceánech.

? Rotace Země představuje složitý geofyzikální proces. Co všechno ji může ovlivnit?

Na orientaci naší planety – tedy nejenom na rychlost její rotace, ale také na pohyb pólů – mají vliv slapové síly Slunce a Měsíce, změny ve zploštění zemské koule způsobené táním ledovců v polárních



jejich předpovědi použijeme pro výpočet parametrů orientace Země. Já jsem v době svého působení na U. S. Naval Observatory zvolil druhou cestu. V každém případě problém spočívá právě ve výběru vhodného matematického modelu. Obecně spoleh-

těžišťe okolo Země pod vlivem ostatních těles Sluneční soustavy. Měsíc se totiž kolem naší planety ani zdaleka nepohybuje po ideální keplerovské elipse: Vlivem nepříliš vzdáleného Slunce dochází ke značným odchylkám a patrně jsou i poruchy od velkých planet. Pohyb Měsíce výrazně ovlivňuje též zploštění Země a výsledkem je poměrně složitá trajektorie, vyjádřená stovkami periodických členů.

Tehdy v osmdesátých letech dominovala Brownova teorie lunárního pohybu, vypracovaná na přelomu devatenáctého a dvacátého století. Od té doby se mnohé změnilo, zejména hodnoty některých astronomických konstant. A tak mě napadlo přepočítat zmíněnou teorii s jejich novými hodnotami a zrevidovat také poruchy pohybu Měsíce způsobené planetami. Výsledkem se stal výpočetní program, který velice dobře souhlasí i s jinými modernějšími teoriemi, a tak ho dodnes používám třeba k výpočtům pro Hvězdářskou ročenku. Ve své době zaznamenal poměrně velký úspěch rovněž v mezinárodním měřítku: Například Hermann Mucke a Jean Meeus jej využili ke zpracování kánonů zatmění Měsíce a Slunce, vydaných ve Vídni v letech 1979 a 1983.

Se sklonem zemské rotační osy blízkým nule by neměly organismy důvod se adaptovat na změny ročních období, neboť by nenastávaly

oblastech, procesy uvnitř zemského jádra a pláště, přesuny hmot v atmosféře, oceánech i podzemních vodách, ale rovněž náhlé změny geomagnetického pole.

? Dá se rotační chování Země předpovídat? A co všechno může na planetě ovlivnit?

Předpovídat můžeme v podstatě dvěma způsoby: Jednak lze analyzovat dosavadní chování dané veličiny a na základě získaného matematického modelu odhadnout její vývoj do budoucna. Nebo provedeme totéž pro známé geofyzikální excitace a poté

livost jakékoliv předpovědi klesá s rostoucím časovým odstupem od pozorování. Důležitost daných predikcí pak tkví hlavně v tom, že přesná znalost budoucího chování orientace Země v prostoru je nutná třeba při plánování a následné navigaci kosmických sond – sledujeme totiž jejich pohyb z povrchu rotující planety!

? Zabýval jste se také zpřesněním teorie pohybu Měsíce. Jaké pohyby našeho přirozeného satelitu můžeme pozorovat a jaká je jeho dynamika?

Věnoval jsem se především pohybu jeho

? Významnou část vašeho výzkumu tvoří práce na katalogu Hipparcos neboli High Precision Parallax

Collecting Satellite. Stejnomená družice zamířila do vesmíru v roce 1989 coby součást astrometrické mise ESA, orientované na měření hvězdných paralax a vlastních pohybů stálic. Jakým způsobem jste se na popsaném výzkumném úkolu podíleli?

Pozorovací program se začal připravovat dlouho před vypuštěním družice a zmíněným úkolem bylo pověřeno mezinárodní konsorcium INCA neboli Input Catalogue. Výběr objektů se řídil nejen jejich zajímavostí z astrofyzikálního hlediska, ale též rovnoměrností jejich rozložení na nebeské sféře a zastoupením stálic do hvězdné velikosti sedm až osm. Přihlíželo se přitom jednak k technickým možnostem satelitu (nedaly se pozorovat slabší objekty než dvanácté velikosti) a jednak k jejich důležitosti pro navrhované projekty z různých oblastí astronomie – včetně těch, které byly pozorovány v rámci mezinárodního sledování rotace Země a pohybu pólů metodami optické astrometrie.

? Co se stalo výsledkem uvedeného výzkumu a jaký byl český podíl na projektu?

Výsledkem se stal vstupní katalog obsahující 118 209 hvězd a náš podíl spočíval

v navázání jeho orientace na Mezinárodní referenční nebeský systém ICRS. Následně jsme se zabývali zcela novým odvozením parametrů orientace Země v referenčním systému Hipparcos v rámci mezinárodní pracovní skupiny IAU, kterou jsem od roku 1988 vedl.

? Její činnost trvala formálně do roku 1997 a hlavní výstup představovala časová řada parametrů orientace naší planety v pětidenních intervalech, pokrývající téměř jedno století. Jaké údaje se takto podařilo shromáždit?

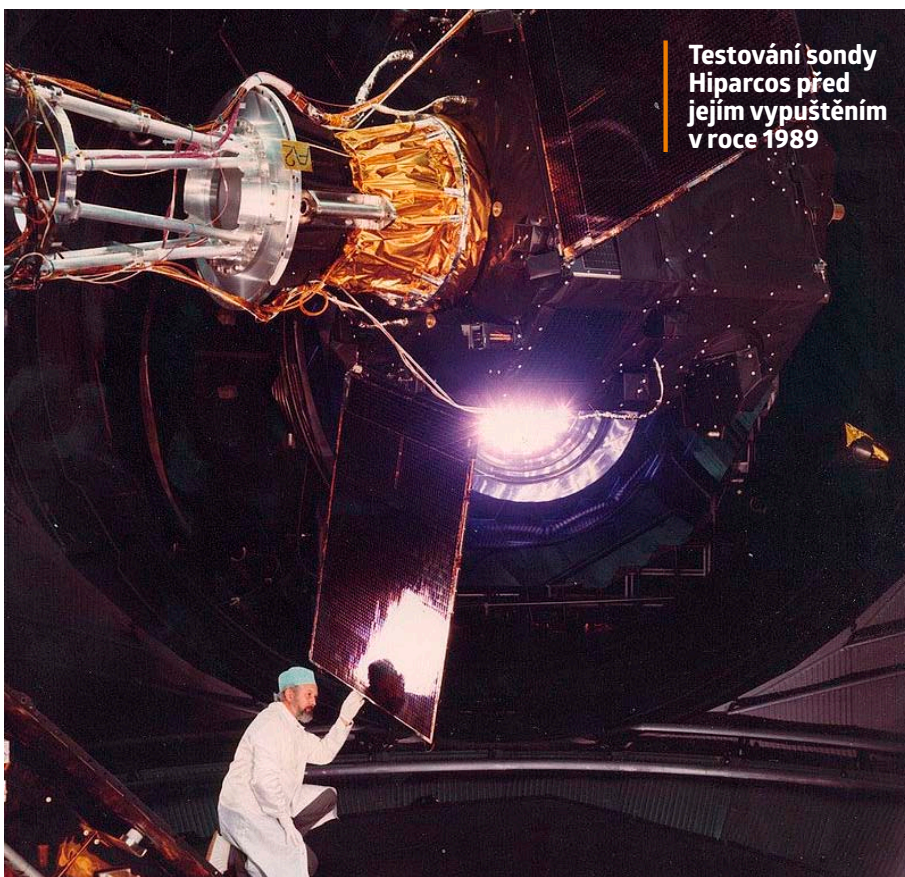
Shromáždili jsme téměř pět milionů jednotlivých pozorování změn zeměpisné šířky a korekci času na více než třiceti observatořích, přepočítali jsme výsledky z původních hvězdných katalogů na

Slovníček

Efemeridy jsou údaje o poloze astronomických objektů i umělých družic na obloze v určitém čase. Dnes je vypočítávají programy pomocí matematických modelů pohybu těles, nicméně kvůli nepravidelným vlivům například planetek či komet se efemeridy musejí čas od času opravovat. Vydávají se v podobě tištěných tabulek a používají se v astronomii a navigaci.

Hipparcos a provedli jsme globální odvození parametrů orientace Země v pětidenních intervalech. Kromě toho jsme výsledky použili ke zpřesnění vlastních pohybů

Jakákoliv hmota, která se pohybuje ve směru poledníku, se od přímé trajektorie odklání na severní polokouli doprava a na jižní doleva



Testování sondy Hipparcos před jejím vypuštěním v roce 1989

některých hvězd. K danému tématu jsme se však občas vraceli i v následujících letech, když se povedlo získat další pozorování.

? Jako ocenění vašeho přínosu k astronomii po vás byla pojmenována planetka (35356) Vondrák. Znáte její trajektorii, podobu, velikost?

V příslušných databázích lze dohledat, že ji v roce 1997 objevili kolegové z Ondřejova Petr Pravec a Lenka Kotková, tehdy ještě Šarounová. Planetka není nijak výjimečná: Má průměr 1,7 kilometru, krouží mezi Marsem a Jupiterem s poloosou dráhy 2,22 astronomické jednotky a s periodou oběhu kolem Slunce 3,31 roku, její sklon dráhy k ekliptice dosahuje 5,48 stupně a absolutní magnituda činí 16,4. ♀

Mgr. Jana Žďárská pracuje ve Fyzikálním ústavu AV ČR, v rámci popularizace vědy publikuje v Československém časopise pro fyziku a dalších periodikách, je členkou České astronomické společnosti (ČAS), Kosmologické sekce ČAS (dříve místopředsedkyní), Astronautické sekce ČAS, porotkyní Československé astrofotografie měsíce (ČAM) a členkou Jednoty českých matematiků a fyziků