

Oponentský posudek disertační práce Mgr. M. Brože: Yarkovsky Effect and the Dynamics of the Solar System

Posudek podává: RNDr. M. Šidlichovský, DrSc., Astronomický ústav AV ČR, Boční II, Praha 4

Posuzovaná disertační práce je zaměřena na popis vlivu Jarkovského jevu na strukturu pásu asteroid. Je podána matematická formulace Jarkovského jevu a ta je pak zabudována do komplexních matematických programů pro integraci pohybu těles ve sluneční soustavě. Pomocí rozsáhlých výpočtů, ať už na reálných asteroidách nebo na vhodně volených modelech, je pak vysvětlována řada pozorovaných jevů v rozdělení asteroid.

Pokud jde o aktuálnost, jde o velmi žhavé téma. První upozornění na možný vliv Jarkovského jevu na dynamiku asteroid se objevila před necelými deseti lety ve společných pracích disertantova školitele D. Vokrouhlického spolu s dnes již nežijícím P. Farinellou. Šlo např. pochopení mechanismu transportu meteoroidů k Zemi, nebo o pochopení zřejmého vlivu resonancí na strukturu pásu asteroid. Asteroidy vykazující velký stupeň chaotického chování (krátké Ljapunovovy doby) byly očividně zachyceny v resonancích, kde však jejich doba života vycházela často velmi krátká, a bylo nutné najít mechanismy, které by tělesa do těchto resonancí dostatečně efektivně dostávaly. To bylo obtížné, neboť prakticky dobře fungující princip ustřednění, vedoucí k odstranění krátkoperiodických poruch eliminoval z Hamiltoniánu systému střední délky (nebo chceme-li střední anomálie) a jedním z důsledků této eliminace je zachování velké poloosy vyšetřovaných objektů. Bylo zřejmé, že vysvětlení musí spočívat na negravitačních silách, které mohou velké poloosy měnit. Dobře popsané negravitační síly, jako např. Poyntingův-Robertsonův efekt, však působí efektivně na prachové částice, ale na tělesa větších rozměrů je jejich vliv zanedbatelný. Bylo právě zásluhou Vokrouhlického a Farinelly, že si uvědomili, že Jarkovského efekt se může projevit i u větších těles, a vytvořili solidní matematické základy pro popis Jarkovského jevu. Mgr. M. Brož se jako Vokrouhlického diplomant objevil záhy ve světových týmech, které jsou na čele výzkumů vlivu Jarkovského jevu na dynamiku asteroid, a provádí v těchto objevných pracích velmi podstatný kus práce, který je vždy přesně specifikován.

V disertaci je zahrnuto několik aplikací Jarkovského efektu. Po úvodních dvou kapitolách je ve třetí kapitole ukázáno, jak se meteoroid z hlavního pásu asteroid může dostat do různých resonancí a odtud pak na dráhy křížící Zemi nebo i Mars. Přitom charakteristické doby tohoto vývoje jsou v souladu s experimentálně zjištěnou dobou expozice kosmickým paprskům (CRE). Třetí až sedmá kapitola disertace jsou vždy založeny na publikované práci (nebo pracích) v recenzovaných prestižních časopisech. Ve čtvrté kapitole jde o vysvětlení polohy planety Vysheslavia (a několika dalších), která se nacházejí v nestabilní oblasti s dobou života asi 10 My. Disertant na základě numerické simulace ukazuje, jak se planeta mohla do této oblasti dostat ze stabilní oblasti vlivem zmenšení velké poloosy Jarkovského efektem. Podmínkou však byla retrogradní rotace, kterou se podařilo následně prokázat pozorováním.

Pátá kapitola se zabývá otázkou, zda pozorovaná populace v resonanci J2/1 může být zajištěna Jarkovského posunem. Zde autor provedl nejen numerické simulace, ale i nové určení této populace v uvedené resonanci. Díky programům jako LINEAR a dalším počet pozorovaných asteroid rychle roste. Kapitola šestá a sedmá se zabývají vlivem Jarkovského

jevu na rodiny Eos a Agnia. Všechny tyto kapitoly (3-7) přináší **nové výsledky**, navíc tyto výsledky byly publikovány. Autor v době podání práce mohl doložit 117 citací těchto prací. To je možno považovat za věc zcela vyjímečnou, tento počet by splňoval požadavek i na slušnou disertaci pro získání titulu DrSc. Přitom je zcela zřejmé, že úloha Mgr. Brože v autorských týmech byla nezastupitelná, sestavoval programy, prováděl všechny numerické simulace, na kterých jsou práce postaveny. Měl nepochybně štěstí, že se stal součástí týmu špičkových odborníků, kteří věděli, jaké otázky si klást, ale byl to právě Mgr. Brož, který prostřednictvím dobře zvolených pokusů dokázal na tyto otázky odpovídat, a z přehledu, který v práci podává, je zřejmé, že v týmu nebyl pouhým programátorem.

Práce je psána výtečnou angličtinou, je doplněna názornými a velmi ilustrativními obrázky, na webu jsou dokonce dosažitelné animace, které nelze považovat za součást disertace, ale ukazují autorovo nadšení pro problematiku. Ani po formální stránce nelze práci prakticky nic vytknout.

Drobné připomínky, překlepy:

- V nadpisu disertace na titulní straně byla zvolena velká písmena, proto by i slovo effect mělo začínat velkým písmenem.
- str. 7, 1.řádek 2. odstavce - má být has been thought místo have been though
- str.8, obr.2 - Podle textu pod obrázkem by jedna z křivek měla být $Q = q_{Jupiter}$ Tato křivka by pro $e = 0$ měla mít $a = q_{Jupiter} = a_J(1 - e_J) \sim 4.95$. Bodem (4.95,0) žádná křivka neprochází, naopak význam křivky jdoucí bodem (4.6,0) není jasný. Ostatní křivky jsou zřejmé a odpovídají popisu pod obrázkem.
- str. 36, v 1. řádku bodu 7 - má být wish místo whish
- str. 39, 8. řádek zezdola, v anglickém textu psaném Čechem bych nedoporučoval používat slovo billion díky jeho dvojnásobnosti v britské (10^9) a americké (10^{12}) angličtině, ač zde je informovanému čtenáři jasné, že jde o britské použití
- str. 53, 2. řádek, citovaná práce Brož & Vokrouhlický (2002) není vzadu v referencích. zřejmě má jít o rok 2001
- str. 56, 2.řádek zezdola - Table I není v textu, zřejmě má jít o Table 14
- str. 59, text pod Figure 46, phase angle in Table 1, opět zřejmě Table 14
- str. 59, 1. řádek posledního odstavce - Fig. 1, nejde spíše o Fig. 46?
- str. 70, 2. řádek zezdola - Figure 1, snad se myslí Fig. 49
- str. 115 3.odstavec zezdola, 4. řádek -
Because $\Sigma' = \sqrt{a}(1 - \sqrt{1 - e^2})$, chybí minus napravo, toto je Σ a $\Sigma' = -\Sigma$

Dotazy:

- Na obr. 3, v historickém úvodu, jsou fotografie lidí, kteří se zasloužili o výzkum ne-gravitačních sil. V názvu YORP effect (Yarkovsky-O'Keefe-Radzievskii-Paddack), tj. efektu změny rotace způsobené Jarkovského jevem, se objevují další jména. Zajímá mne, zda fotografie nezařadil autor po zralém uvážení jejich významu, nebo prostě proto, že mu tyto fotografie nebyly dostupné.

- Otázka směřuje k filozofii použití (modifikovaného) symplektického integrátoru na nehamiltonovský problém. Autor provedl modifikaci program SWIFT zařazením kódu pro Jarkovského efekt. Modifikoval symplektickou metodu RMVS a přidal i modifikaci symplektické metody RMS2 Laskara a Robutel. Symplektické metody byly původně formulovány pro hamiltonovské problémy, jejichž řešení tvoří ve fázovém prostoru symplektickou transformaci s jistými integrály (např. fázový objem). To, že symplektická transformace zachovává tyto integrály, vede k tomu, že numerické řešení probíhá ve fázovém prostoru stále blízko k podprostoru konstantního Hamiltoniánu a nemůže tak dojít ke kumulaci chyb v celkové energii, či momentu hybnosti, jak je to běžné třeba u jiných metod (Runge-Kutta). Výhodnost symplektické metody pro dlouhodobou integraci hamiltonovského problému je možno ukázat právě srovnáním zachování těchto integrálů. Toto srovnání na počátku integrace nemusí vypadat pro symplektickou metodu nijak lichotivě, ale při dlouhé integraci je vše zřejmé. Mohl by autor po svých velkých zkušenostech okomentovat výhodnost použití modifikované symplektické integrace na nehamiltonovský problém? Tu už tak jednoduše dokázat nepůjde, intuitivně je možno očekávat, že pro problém typu hamiltonovský problém plus velmi malá rušivá síla, by měl modifikovaný symplektický integrátor být lepší než modifikovaný nesymplektický, prostě proto, že je již lepší při nulové poruše, ale pro přesvědčivější přímý důkaz chybí možnost srovnání na integrálech.
- Pro vyšetřované asteroidy v resonanci J2/1 zhruba polovina asteroid narazí do Slunce nebo je vyslána dále než 100 AU od Slunce. Zajímalo by mne jaké procento těles narazí na Slunce a jaké bylo chování blízkých klonů těles v této souvislosti. Docházelo k situaci, že některé klony téhož tělesa končily na Slunci a jiné za hranicí 100 AU?
- Počty známých asteroid rychle rostou. Může autor komentovat současný počet asteroid v resonanci J2/1, když v práci z r.2005 jich bylo 153 (+9). Podobně pro rodinu EOS byl počet 4400, výchozí databáze 170 000 asteroid byla z listopadu 2004. Jaký počet by bylo možno očekávat dnes?
- Z obrázku 132 se zdá, že členové rodiny Agnia jsou rozestřeny podél separatrix resonance z_1 . Je k tomu nějaký hlubší dynamický důvod, nebo je jediným zdůvodněním to, že k rozpadu původního tělesa došlo v blízkosti separatrix.

Drobné překlepy nebo nejasnosti zmiňuji hlavně proto, aby bylo jasné, že recenzent disertaci podrobně četl a posuzoval, navíc může autor některých poznámek použít ke zlepšení verze vystavené na webu. V žádném případě však tyto připomínky nesnižují velmi vysokou úroveň disertace, která jednoznačně prokazuje předpoklady autora k tvořivé vědecké práci. Doporučuji proto, aby po úspěšné obhajobě byl Mgr. M. Brožovi udělen titul PhD.



RNDr. M. Sidlickovský DrSc.

V Praze 18.5. 2006