

Posudek práce

předložené na Matematicko-fyzikální fakultě
Univerzity Karlovy

posudek vedoucího posudek oponenta
 bakalářské práce diplomové práce

Autor: Jaroslav Hořák
Název práce: Motions of protoplanets in a evolving gaseous disk
Studijní program a obor: Fyzika
Rok odevzdání: 2024

Jméno a tituly oponenta: prof.RNDr. David Vokrouhlický, DrSc.
Pracoviště: Astronomický ústav UK
Kontaktní e-mail: vokrouhl@cesnet.cz

Odborná úroveň práce:

vynikající velmi dobrá průměrná podprůměrná nevyhovující

Věcné chyby:

téměř žádné vzhledem k rozsahu přiměřený počet méně podstatné četné závažné

Výsledky:

originální původní i převzaté netriviální kompilace citované z literatury opsané

Rozsah práce:

veliký standardní dostatečný nedostatečný

Grafická, jazyková a formální úroveň:

vynikající velmi dobrá průměrná podprůměrná nevyhovující

Tiskové chyby:

téměř žádné vzhledem k rozsahu a tématu přiměřený počet četné

Celková úroveň práce:

vynikající velmi dobrá průměrná podprůměrná nevyhovující

Slovní vyjádření, komentáře a připomínky oponenta:

Bakalářská práce p. Hořáka se zabývá procesy doprovázejícími vznik terestrických planet v raných fázích vývoje Sluneční soustavy. Tato problematika zůstává v popředí odborného zájmu v několika posledních dekádách. Důvody jsou dvojího typu: (i) jednak se zabývá procesy, které v překotném tempu proběhly před miliardami let a nelze je tedy v současnosti přímo „pozorovat“ (snad jen analogy v případě exo-planetrárních systémů), a (ii) popis velkého množství formujících se proto-planet, interagujících mezi sebou a zároveň s dynamicky se vyvíjejícím plynným prostředím zárodečné mlhoviny, nedovoluje snadná analytická řešení. I numerický popis, který je náplní této práce, je velice náročný a výsledky závislé na řadě neznámých parametrů a komplikovaných fyzikálních procesech souvisejících s interakcí pevných těles s plynnou mlhovinou. Z tohoto hlediska hodnotím tuto bakalářskou práci za velmi obtížnou. Celkově lze ale říci, že student se takovéhoho nesnadného úkolu zhostil výborně.

Práce je rozčleněna do pěti kapitol. První dvě jsou teoretického charakteru a shrnují základní poznatky hydrodynamického popisu protoplanetární mlhoviny (kap. 2) a interakce málo hmotné (proto-)planety vnořené v takovéhoho prostředí, způsobující její migraci (kap. 3). Student se opírá o vybrané práce z dnes již rozsáhlé literatury na toto téma (z nichž lze především jmenovat práci Suzuki et al. 2016 pro kap. 1, a četné práce Paardekoopera et al., Tanaky et al., Masetta a dalších pro kap. 2). Tuto tematiku považuji za obtížnou pro bakalářskou úroveň, a není tedy divu, že se student nevyvaroval některých drobných chyb (viz níže). Moje konkrétní kritické poznámky je však nutno brát spíše jako pobídku, aby student v budoucnu (např. při diplomové práci) textu věnoval pečlivou pozornost, pokud možno text doprovázel vhodně zvolenými obrázky, a myslel především na čtenáře, který není odborníkem v dané oblasti, ale přesto by se o jeho výsledcích rád něco dozvěděl. Třetí kapitola je věnována implementaci a řešení zjednodušeného vývoje protoplanetární mlhoviny dle Suzuki et al. 2016 v jazyku Fortran 90, jakož i implementaci fiktivních zrychlení působících na proto-planet vnořené do plynného disku, zodpovědné za jejich radiální migraci a tlumení excentricit a sklonů. Naprogramované části kódu jsou též validovány porovnáním s výsledky v literatuře. V posledních dvou kapitolách student diskutuje výsledky vlastních výpočtů. Podstatou je srovnání výsledků obdržných při změně řady volných parametrů modelu (např. viskozita disku, intenzita míry uniku plynu ve směru kolmém na disk, ve zkratce nazývané „vítr“). Ty podstatně ovlivňují časový vývoj parametrů plynného disku, a tím i orbitální vývoj proto-planet. Ve čtvrté kapitole student identifikuje kombinaci střední viskozity a silného větru, jako potenciálně nejzajímavější, v páté kapitole pak studuje statistické výsledky při zachovaných parametrech vývoje disku, ale drobných počátečních změnách drah prot-planet. Obojí je postup metodicky jasný a správný. Některé z výsledných systémů se přibližují architektuře terestrických planet. Jejich dráhové vývoje by však bylo potřeba prostudovat daleko podrobněji, na což už z pochopitelných důvodů v bakalářské práci nezbyl prostor. Tento fakt zakládá na potenciálně pěknou diplomovou práci.

K práci, a jejím výsledkům, mám několik dotazů (povětšinou však mohou sloužit k přemýšlení do budoucna):

Počáteční podmínky provedených simulací obsahují 28 proto-planet, jejichž počet se může snížit vzájemnými „srážkami“. V takovém případě se výsledek reprezentuje jedním novým

tělesem, které je chápáno jako ideální sloučení těles vstupujících do interakce. Zvláště s ohledem na to, že potenciálně zajímavé simulace vyžadují netlumení orbitálních excentricit (např. kap. 5.3 a 5.4), tyto srážky mohou probíhat relativně velkými vzájemnými rychlostmi (řekněme až 1/10-1/5 orbitální rychlosti, tj $v \geq 5$ km/s), většími, než úniková rychlost z výsledné proto-planety. Takovéto srážky mohou vést spíše k fragmentaci, než spojování těles. Za jakých podmínek by tyto procesy již významně ovlivnily výsledky.

Předložené simulace zahrnují pouze proto-planety v terestrické oblasti a terminální epochou sledovaného vývoje je 100 Myr. Často je popisovaný vývoj vedoucí ke vzniku analogu terestrické soustavy odehraje „pozdě“, tj. >20 Myr. Obecně se ale soudí, že plynní obři (Jupiter a Saturn) se zformovali do plné velikosti v čase $\sim 3-5$ Myr. Pokud by se tak stalo, gravitačně by začaly významně ovlivňovat proto-planety v terestrické oblasti. Jak by to změnilo výsledky práce? Není nutnost excitace dráhových excentricit proto-planet (oproti jejich tlumení interakcí s diskem) v nulté aproximaci vyjádřením vlivu obřích planet?

Podle popisu implementace na str. 18 je zřejmé, že efekty Lindbladových a korotačních momentů síly je započítávají na jednotlivé proto-planety nezávisle. Nemůže dojít až už pozitivní či negativní interferenci v případě kompaktních systémů proto-planet? (např. v případě, kdy se koorbitální oblasti začnou přibližovat či dokonce překrývat)

Vzorec (2.21) na str. 12 pro lineární velikost x_s koorbitální zóny proto-planety vnořené do plynného disku se škáluje s *druhou* odmocninou poměru $q=m/M$. V klasické Hillově aproximaci planety obíhající Slunce bez plynného okolí se tato škáluje se *třetí* odmocninou poměru $q=m/M$. To je potenciálně velký rozdíl, x_s může být v prvním případě o řád i více menší, než ve druhém případě. Dalo by se pro tento výsledek najít jednoduché vysvětlení?

Vnitřní okrajová podmínka pro plošnou hustotu disku (3.7) na str. 21 efektivně znamená nulovou derivaci $\partial\Sigma/\partial r=0$. Při pohledu na vzorové průběhy této veličiny v obr. 1.1 a 1.2 ze Suzuki et al. 2016, se však tato podmínka nezdá být uplatněná. Není příliš omezující nebo nestandardně volená? (ve skutečnosti, Suzuki et al. 2016 na str. 5 zmiňují jinou okrajovou podmínku $\partial(\Sigma r^{3/2})/\partial r=0$) totéž se týká i vnější okrajové podmínky

V závěrečném shrnutí na str. 61 autor uvádí, že častým nedostatkem výsledku simulací je příliš hmotná vnitřní planeta (analog Merkuru) a vysvětluje to omezenou počáteční sadou proto-planet s hmotností se již blížíící hmotnosti Merkuru; je jistě pravdou, že simulace více těles s menší hmotností by byly velmi užitečné, chybí ovšem také jiný důležitý aspekt vývoje Merkuru, neboť je všeobecně akceptovaným scénářem pro vysvětlení jeho vysoké hustoty a anomálně velkého jádra, že proto-Merkur ve finální fázi prodělal srážku s podobně velkým tělesem, kdy velká část pláště byla odmrštěna a ne-akreovala zpět; to by vyžadovalo započítat již výše zmiňovaný fragmentační modul v simulacích

Dále uvedu ilustraci některých z řady nepřesností v tisku, kterých jsem si letmým čtením povšiml (neuvádím drobné jazykové chyby, kterých však vzhledem k rozsahu textu není mnoho). Nepovažuji je však za velmi důležité tak, aby zastínily velmi pěkné výsledky dosažené v této práci. Jsou spíše pobídkou do budoucna věnovat textům náležitou pozornost:

str. 4: za uvedeného předpokladu cylindrické symetrie je třetí člen v rovnici (1.4) automaticky nulový a není potřeba ho uvádět

- str. 5: v druhém členu pravé strany rovnice (1.8) chybí faktor 2, a člen $-B^2/\mu_0$ na pravé straně chybí úplně
- str. 5: závorka posledního členu levé strany rovnice (1.9) by měla být vynásobena r
- str. 5: předchozí notace střední hodnoty pomocí $\langle \cdot \rangle$ se od rovnice (1.14) náhle mění na \cdot s horní čarou, takovéto změny mohou ztížit pochopení textu
- str. 5: závorka posledního členu levé strany rovnice (1.15) by měla být vynásobena r
- str. 6: je faktor 2π v druhém členu rovnice (1.18) správně? Např. v textu Suzuki et al. 2016 chybí
obecně lze říci, že pochopení rovnic a aproximací uvedených v kapitolách 1 a 2 by pomohly dobře volené obrázky
- str. 9: pro udržení kontinuity textu, má být θ v rovnici (2.1) nahrazeno ϕ , které bylo používáno v kap. 1
- str. 9: limitující proměnná v argumentu toku momentu hybnosti F v rovnici (2.2) nemůže být radiální r , ale něco jako $r-r_p$
- str. 11: autor používá značně nestandardní terminologii „half-axis“ pro „semimajor axis“ (velkou poloosu dráhové elipsy), což může být pro některé čtenáře matoucí; obecně je dobré se držet většinové terminologie
- str. 12: jelikož veličina b je bezdimenzionální, ve vzorci pro d (řádek pod rovnicí (2.20)) musí být první člen nějakou délkou dělen (r_p ?)
- str. 13: funkce $I_\alpha(p)$ v rovnici (2.25) nejsou v textu vysvětleny (Besselovy funkce?); obecně je dobré, v textu řádně zavést všechny veličiny/proměnné pro případ, kdyby čtenář chtěl sám výpočty reprodukovat; na veličinu $F(p)$ je např. odkazováno na str. 28, kde je uveden i přibližný vztah (3.17)
- str. 16: v poslední z rovnic (2.43) pro F_z musí být faktor e na pravé straně zaměněn i , neboť z-ová komponenta zrychlení souvisí s dráhovým sklonem
- str. 19: neměl jsem možnost detailněji procházet části programu uvedené v kap. 3, jen některé mě na první pohled upoutaly; např.
mezi řádky 113 a 118 je rozhodovací blok, který podle hodnoty v_2 přiřazuje důležitou konstantu K pro fiktivní zrychlení simulující migraci proto-planet; není mě ale jasné, kdy by mohlo nastat $v_2=0$, které by následně přiřadilo $K=10^{50}$, zcela diskontinuitní hodnotu? tato varianta však zřejmě nikdy nenastala
rozhodovací blok mezi řádky 132 až 136 pro t_e (a podobně níže pro t_i) jeví diskontinuitu pro mez rozhodování, což by asi obecně být nemělo; při dosažení $e=hottrail_e$ totiž první část limituje k $t_e \times 10^{50}$, zatímco druhá pouze k 10^{50} ; rozumím však, že zde jde spíše o dobrý návyk programování, neboť hodnoty K pro e menší než $hottrail_e$ jsou stejně tak velké, že čistě zamezí tlumení excentricity či sklonu tak jako tak
- str. 20: neboť log obvykle v textu označuje dekadický logaritmus, mělo by exp v rovnici (3.2) správněji být zaměněno za 10^{\wedge}

Případné otázky při obhajobě a náměty do diskuze:

Počáteční podmínky provedených simulací obsahují 28 proto-planet, jejichž počet se může snížit vzájemnými „srážkami“. V takovém případě se výsledek reprezentuje jedním novým tělesem, které je chápáno jako ideální sloučení těles vstupujících do interakce. Zvláště s ohledem na to, že potenciálně zajímavé simulace vyžadují netlumení orbitálních excentricit (např. kap. 5.3 a 5.4), tyto srážky mohou probíhat relativně velkými vzájemnými rychlostmi

(řekněme až 1/10-1/5 orbitální rychlosti, tj $v \geq 5$ km/s), většími, než úniková rychlost z výsledné proto-planety. Takovéto srážky mohou vést spíše k fragmentaci, než spojování těles. Za jakých podmínek by tyto procesy již významně ovlivnily výsledky.

Předložené simulace zahrnují pouze proto-planety v terestrické oblasti a terminální epochou sledovaného vývoje je 100 Myr. Často je popisovaný vývoj vedoucí ke vzniku analogu terestrické soustavy odehraje „pozdě“, tj. >20 Myr. Obecně se ale soudí, že plynní obři (Jupiter a Saturn) se zformovali do plné velikosti v čase $\sim 3-5$ Myr. Pokud by se tak stalo, gravitačně by začaly významně ovlivňovat proto-planety v terestrické oblasti. Jak by to změnilo výsledky práce? Není nutnost excitace dráhových excentricit proto-planet (oproti jejich tlumení interakcí s diskem) v nulté aproximaci vyjádřením vlivu obřích planet?

Podle popisu implementace na str. 18 je zřejmé, že efekty Lindbladových a korotačních momentů síly je započítávají na jednotlivé proto-planety nezávisle. Nemůže dojít až už pozitivní či negativní interferenci v případě kompaktních systémů proto-planet? (např. v případě, kdy se koorbitální oblasti začnou přibližovat či dokonce překrývat)

Vzorec (2.21) na str. 12 pro lineární velikost x_s koorbitální zóny proto-planety vnořené do plynného disku se škáluje s *druhou* odmocninou poměru $q=m/M$. V klasické Hillově aproximaci planety obíhající Slunce bez plynného okolí se tato škáluje se *třetí* odmocninou poměru $q=m/M$. To je potenciálně velký rozdíl, x_s může být v prvním případě o řád i více menší, než ve druhém případě. Dalo by se pro tento výsledek najít jednoduché vysvětlení?

Vnitřní okrajová podmínka pro plošnou hustotu disku (3.7) na str. 21 efektivně znamená nulovou derivaci $\partial \Sigma / \partial r = 0$. Při pohledu na vzorové průběhy této veličiny v obr. 1.1 a 1.2 ze Suzuki et al. 2016, se však tato podmínka nezdá být uplatněná. Není příliš omezující nebo nestandardně volená? (ve skutečnosti, Suzuki et al. 2016 na str. 5 zmiňují jinou okrajovou podmínku $\partial(\Sigma r^{3/2})/\partial r = 0$) totéž se týká i vnější okrajové podmínky

V závěrečném shrnutí na str. 61 autor uvádí, že častým nedostatkem výsledku simulací je příliš hmotná vnitřní planeta (analog Merkuru) a vysvětluje to omezenou počáteční sadou proto-planet s hmotností se již blížíící hmotnosti Merkuru; je jistě pravdou, že simulace více těles s menší hmotností by byly velmi užitečné, chybí ovšem také jiný důležitý aspekt vývoje Merkuru, neboť je všeobecně akceptovaným scénářem pro vysvětlení jeho vysoké hustoty a anomálně velkého jádra, že proto-Merkur ve finální fázi prodělal srážku s podobně velkým tělesem, kdy velká část pláště byla odmrštěna a ne-akreovala zpět; to by vyžadovalo započítat již výše zmiňovaný fragmentační modul v simulacích

Práci doporučuji nedoporučuji

uznat jako diplomovou/bakalářskou.

Navrhuji hodnocení stupněm: výborně velmi dobře dobře neprospěl/a

Místo, datum a podpis oponenta: 19.8.2024