

## Posudek disertační práce:

**Autor:** Alexander Pitňa

**Název:** Turbulence in the solar wind from inertial to kinetic scales

### Téma a jeho aktuálnost

Turbulence a jevy s ní spojené patří ke nejobtížněji teoreticky uchopitelným disciplínám hydrodynamiky. V případě fyziky plazmatu, v níž k turbulencím navíc dochází ve vodivé tekutině protkané magnetickými poli, je situace ještě složitější. Turbulentní jevy přitom mohou být příčinou přepojení magnetických siločar, ohřevu plazmatu nebo dalších důležitých jevů. Sluneční vítr mezi Sluncem a Zemí, na který se zaměřil autor podané disertační práce, je monitorován řadou sond, a je proto ideálním prostředím pro výzkum turbulentních jevů. Zpracovávané téma považují za mimořádně aktuální jak ve vesmírném, tak v laboratorním plazmatu. V obou médiích mají turbulentní jevy společnou povahu.

### Grafická úprava, sazba a jazyk práce

Práce je napsána velmi kvalitní angličtinou, je přehledná a čtivá. Matematické vztahy jsou většinou sázeny ve shodě s platnými normami, typografické chyby se objevují zcela výjimečně. Obrázky, včetně popisků, jsou dobře čitelné. Práce je členěna do sedmi kapitol věnovaných jak obecnému přehledu, tak vlastní práci a jejím výsledkům. Práce je doplněna seznamy obrázků a tabulek a v poslední části obsahuje autorem publikované práce vztahující se k tématu disertace.

### Přehledová část

V přehledové části se autor věnuje základním pojmům z fyziky plazmatu, zejména těm, které jsou orientovány na problematiku turbulence a souvisí s vlastní prací. Autor konstatuje, že řadu jevů není možné vysvětlit na základě magnetohydrodynamického popisu a je třeba volit kinematický přístup, který zahrnuje širší škálu jevů, zejména interakce vln a částic, které jsou pro vývoj turbulence podstatné. Obecnou část od počátku směřuje k fyzice slunečního větru a charakterizuje inerciální a kinetickou oblast turbulence. Neomezuje se jen na Kolmogorovův popis turbulence, ale jde za hranice tohoto popisu. Zabývá se krátkovlnnými (kinetické Alfvénovy vlny kolmo na pole, hvizdy podél pole) módy i dlouhovlnnými magnetoakustickými módy (dominují Alfvénovy vlny) souvisejících vln. Přestože je obecná část velmi kvalitně zpracována, nevyhnul se autor některým nepřesnostem a překlepům. Uvedu jen několik příkladů: na formování kometárního ohonu se podílí nejen sluneční vítr, ale i sluneční záření; na straně 5 dole je uveden vztah pro počet částic v Debyeově sféře, ale v zápětí je uveden počet částic na čtvereční metr – tedy nejde ani o koncentraci, která ve vztahu figuruje, ani o tok částic, který by byl vztažen ještě na jednotku času; vztah (1.1) je uveden pro jednotekutinové plazma, což není případ slunečního větru; z textu mně není jasné, co je veličina  $R_c$  ve vztahu (1.7) a proč ubývá v blízkosti dipólu pole jako  $1/R^2$  (i bez vlivu rotace) a nikoli jako  $1/R^3$ ; na straně 8 nesouhlasím s tvrzením, že v MHD popisu je magnetický tlak skalár – tenzor tlaku má jak skalární, tak tenzorovou část, jinak by Lorentzova síla nemohla být ve tvaru  $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$ ,

který po dosazení za  $\mathbf{j} = \text{rot } \mathbf{H}$  vede na dvojný vektorový součin rozpadající se právě na tyto dva členy; ve vztahu (10) je správně konstatováno, že  $\gamma$  je polytropní koeficient, o kus dále je ale tento vztah prohlášen za adiabatický zákon (to platí jen pro  $\gamma = c_p/c_v$ ); ve vztahu (2.11) má být rychlost označena stejně jako v ostatních rovnicích, tj.  $\mathbf{u}$ , nikoli  $\mathbf{v}$ ; u Boltzmannovy rovnice (2.1) je společnou částí fázového prostoru jen  $(t, \mathbf{x})$ , rychlostní část by měla záviset na konkrétním druhu částice, tedy mělo by být psáno  $\mathbf{v}_j$ ; ve vztahu (2.19) nemá pravá část rozměr času, neměl by být celý výraz umocněn  $(\dots)^{-1}$ ? Veškeré překlepy a nepřesnosti mají v kontextu celé práce zcela marginální význam a nejsou podstatné.

### Metody zpracování a výsledky práce

Autor využíval zejména data ze sondy Wind a družice Spektr-R, konkrétně data z přístrojů MFI a SWE na sondě Wind a BMSW (vzorkovací frekvence 32 Hz) na družici Spektr-R (autor je popisuje v kapitole 5). Měl tak k dispozici jak data týkající se magnetického pole, tak parametry částic slunečního větru. Při zpracování autor disertace využil veškeré dostupné moderní metody pro zpracování dat a pořízení spekter: waveletovou transformaci, fitování křivek pomocí Levenbergova-Marquardtova algoritmu a Monte Carlo metody.

Autor studoval tři okruhy problémů. Prvním z nich byl vliv průchodu meziplanetární rázové vlny na turbulence. Ukázalo se, že v inerciální oblasti dojde k zesílení turbulencí, ale vlastností turbulentní kaskády zůstanou zachovány. V kinetické oblasti je po průchodu rázové vlny spektrum fluktuací strmější a zhruba v polovině případů je průběh dobře popsitelný mocninovou závislostí kombinovanou s exponenciálou, což by mohlo znamenat narušení turbulentní kaskády.

V druhém okruhu problémů sledoval autor rozpad fluktuací po průchodu rázové vlny a potvrdil mocninový pokles v čase jak pro kinetickou, tak pro magnetickou energii (s exponentem  $-1,2$ ). Navíc ukázal, že energie magnetického pole poněkud převyšuje kinetickou energii, což by mohlo být způsobeno nenulovou helicitou magnetického pole. Dále autor zjistil, že k rozpadu fluktuací nedochází okamžitě po průchodu meziplanetární rázové vlny.

V posledním okruhu problémů se autor zabýval dynamikou fluktuací slunečního větru na iontové škále. Ukázal, že dominantní roli hrají kinetické Alfvénovy vlny, pro něž je  $\delta B$  kolmé na  $B$ . Ostatní vlnové módy jsou přítomny, ale nehrají podstatnou roli.

### Dotazy k práci

1. Mohl byste při obhajobě podrobněji vysvětlit, jak byl získán obrázek 6.6, zejména jak byly využity Monte Carlo metody k určení chybové hustoty pravděpodobnosti?
2. Jakou výpočetní techniku jste při výpočtech použil a jaké množství dat bylo celkově zpracováno?
3. Mohl byste se podrobněji zmínit o možných příčinách neadiabatického chování fluktuací?

## Závěr

Předložená disertační práce se zabývá vysoce aktuální problematikou. Autor prokázal schopnost samostatné tvůrčí činnosti, zvolil adekvátní metody ke zpracování a dosáhl velmi zajímavých původních výsledků publikovaných v několika článcích, které jsou součástí práce. Práci považuji za velmi kvalitní a konstatuji, že splňuje veškeré zákonem stanovené podmínky pro doktorskou disertační práci, a proto ji doporučuji přijmout k obhajobě.

Praha, 21. srpna 2019

Prof. RNDr. Petr Kulhánek, CSc.,  
katedra fyziky FEL ČVUT,  
Technická 2  
166 27 Praha 6