

## Streszczenie rozprawy doktorskiej pt.

### „Wpływ oporności elektrycznej i przewodnictwa cieplnego na krótkofalową niestabilność wyporności magnetycznej”

W rozprawie przedstawiono wyniki badań nad krótkofalową niestabilnością wyporności magnetycznej w warstwie płynu, w obecności horyzontalnego zewnętrznego pola magnetycznego malejącego z wysokością (kierunek  $z$ ). Problem ten został wprowadzony do obszaru zainteresowań geofizyki i astrofizyki w pionierskich pracach [1, 3, 5, 6]. Analiza układu podatnego na tę niestabilność, w obecności niskiej oporności elektrycznej oraz słabego przewodnictwa cieplnego płynu, okazała się skomplikowana i doprowadziła do zróżnicowanych wyników. Wyniki zostały odniesione do zjawiska wydostawania się silnego pola magnetycznego wraz z plazmą z wnętrza Słońca, z obszaru tzw. tachokliny słonecznej, co ma związek ze zjawiskami na powierzchni Słońca takimi jak plamy słoneczne czy protuberancje.

Pracę rozpoczyna rozdział wstępny zawierający motywację badań, tezę i schemat pracy. Rozdział 2 wprowadza pojęcie wyporności magnetycznej oraz niestabilności związanej z tym zjawiskiem. Po zaprezentowaniu w kolejnym rozdziale wyników asymptotycznej analizy przypadku bezdyfuzyjnego z pracy [4], rozpatrzono tymi samymi metodami wyizolowany wpływ dyfuzji magnetycznej (rozdział 4) oraz termicznej (rozdział 5) na badaną niestabilność. Następnie w rozdziale 6 przeanalizowano najbardziej złożony i najbliższy rzeczywistości układ, gdzie obie wspomniane dyfuzje występują jednocześnie. W ramach tej analizy po przyjęciu najbardziej naturalnych dla tachokliny słonecznej warunków brzegowych (nieprzepuszczalne i izotermiczne brzegi, doskonały przewodnik na zewnątrz warstwy płynu) ustalono przestrzenne i czasowe skale zmienności najbardziej niestabilnego modu, ponownie wykorzystując osobliwy rachunek zaburzeń Rayleigha-Schrödingera wraz z metodą warstwy granicznej (por. [2]). Zbadano niestabilności dwuwymiarowe (typu *interchange*, gdzie horyzontalna liczba falowa  $k_x = 0$ ), dla których rezultaty potwierdzono przez symulacje numeryczne, a także w rzędzie wiodącym niestabilności w pełni trójwymiarowe ( $k_x \neq 0$ ).

Najważniejszym wynikiem pracy jest potwierdzenie tezy o ustalaniu przez dyfuzję skończonej liczby falowej  $k_y$  (na kierunku horyzontalnym i prostopadłym do zewnętrznego pola magnetycznego) najbardziej niestabilnego modu w układzie, a więc tłumienie wszystkich zaburzeń o wyższych liczbach falowych, co jest zjawiskiem niewystępującym w układzie bezdyfuzyjnym. Dla przyjętych założeń przeprowadzona analiza jest w pełni kompleksowa. Dla  $k_y \gg 1$ ,  $\mathcal{U}_\kappa \ll 1$  oraz  $\mathcal{U}_\eta \ll 1$  jednoznacznie zidentyfikowano najbardziej niestabilny mod, którego długość fali skaluje się przez bezwymiarowy współczynnik dyfuzyjności termicznej  $\mathcal{U}_\kappa$  (gdzie  $\mathcal{U}_\eta$  to bezwymiarowy współczynnik dyfuzyjności magnetycznej). Okazało się, że istnieje niespodziewana różnorodność reżimów dynamicznych i skalowań, jakie mogą charakteryzować najbardziej niestabilny mod w takim układzie. Ciekawym rezultatem jest fakt, że dyfuzja magnetyczna, choć z założenia zdecydowanie słabsza od termicznej (założono relację występującą w tachoklinie słonecznej:  $\mathcal{U}_\eta \sim \mathcal{U}_\kappa^{3/2} \ll \mathcal{U}_\kappa$ ), odgrywa istotną rolę w dynamice układu, znacząco różnej od tej dla przypadku samej tylko dyfuzji termicznej. W szczególności istnieje reżim opisany przez relację między tzw. funkcjami tempa narastania  $\sigma(z_{max}) > \sigma_T(z_{T,max})$ , gdzie w przypadku braku dyfuzji magnetycznej nie ustala się skończona liczba falowa najbardziej niestabilnego modu. Natomiast po jej wprowadzeniu, dochodzi do interakcji obu dyfuzji, co skutkuje ustaleniem się takiej liczby falowej w relacji  $k_y \sim \mathcal{U}_\kappa^{-3/5}$  (ew.  $k_y \sim \mathcal{U}_\kappa^{-3/4}$  lub  $k_y \sim \mathcal{U}_\kappa^{-1/3}$ , w zależności od własności stanu bazowego). W przeciwnym wypadku, gdy  $\sigma(z_{max}) < \sigma_T(z_{T,max})$ , liczba falowa najbardziej niestabilnego modu skaluje się jak  $k_y \sim \mathcal{U}_\kappa^{-1/3}$ , co zostało pokazane zarówno analitycznie jak i numerycznie. Kolejnym interesującym rezultatem

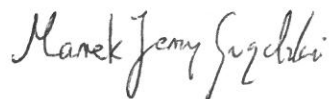
jest zidentyfikowanie rozwiązania nazwanego słabo asymptotycznym, które odpowiada wspomnianemu powyżej reżimowi  $\sigma(z_{max}) > \sigma_T(z_{T,max})$ . Jak pokazano zarówno analitycznie jak i numerycznie, dominuje on nawet dla bardzo niskich dyfuzyjności (przynajmniej do najniższych osiągniętych:  $\mathcal{U}_\kappa = 10^{-8}, \mathcal{U}_\eta = 10^{-12}$ ), dając współczynnik narastania w rzędzie wiodącym  $\sigma_0 = \sigma(z_{max})$  oraz skalowanie liczby falowej  $k_y \sim \mathcal{U}_\kappa^{-3/5}$ .

Istotnym wynikiem jest również wyprowadzenie kryteriów na dominację dwóch głównych typów rozwiązań wśród modów trójwymiarowych, a także warunków na dominację modów 2D nad ich odpowiednikami 3D, jak również podanie przybliżonych postaci tychże kryteriów dla układów astrofizycznych. Podobnie jak w przypadku bezdyfuzyjnym i izotermicznym, dla stosunkowo słabych gradientów pola magnetycznego dominować będą mody 3D, natomiast dla odpowiednio silnych gradientów to niestabilności dwuwymiarowe będą tymi najszybciej narastającymi. Jednakże ustalono również wpływ na to zjawisko niezerowego gradientu temperatury, który w pewnych przypadkach jest kluczowy i silniejszy niż wpływ gradientu pola magnetycznego.

Na koniec rozdziału 6 podano również procedurę identyfikacji najbardziej niestabilnego modu spośród wszystkich dwuwymiarowych i trójwymiarowych możliwości. Zilustrowano ją przykładem numerycznym dla wartości parametrów wykorzystywanych wcześniej w analizie komputerowej. Ponadto pokrótce omówiono to zagadnienie w kontekście tachokliny słonecznej, spekulując, na ile istotne mogą być niestabilności 2D, które teoretycznie pojawiają się przy silniejszych gradientach pól niż ich odpowiedniki 3D.

Podsumowując, można orzec, że teza pracy została udowodniona na poziomie rachunków analitycznych oraz potwierdzona dzięki analizie numerycznej. Udało się zatem otrzymać ciekawy obraz skomplikowanego wpływu niskiej oporności elektrycznej i słabego przewodnictwa cieplnego na krótkofalową liniową niestabilność wyporności magnetycznej.

mgr Marek Jerzy Grądzki



## Literatura

- [1] Acheson, D. J. (1979), Instability by magnetic buoyancy, *Solar Physics*, **62**, 23
- [2] Bender, C. M. & Orszag, S. A. (1978), *Advanced Mathematical Methods for Scientists and Engineers* (New York: McGraw-Hill)
- [3] Gilman, P. A. (1970), Instability of Magnetohydrostatic Stellar Interiors from Magnetic Buoyancy: Part I, *The Astrophysical Journal*, **162**, 1019
- [4] Mizerski, K. A., Davies, C. R. & Hughes, D. W. (2013), Short-wavelength magnetic buoyancy instability, *The Astrophysical Journal Supplement*, **205**, 16
- [5] Newcomb, W. A. (1961), Convective Instability Induced by Gravity in a Plasma with a Frozen-In Magnetic Field, *Physics of Fluids*, **4**, 391
- [6] Parker, E. N. (1955), The Formation of Sunspots from the Solar Toroidal Field. *The Astrophysical Journal*, **121**, 491