

Doktori (PhD) értekezés tézisei
Magnetohidrodinamikai hullámok
és instabilitások a naplégkörben

Zsámberger Noémi Kinga

Témavezető: Prof. Erdélyi Róbert



1949

DEBRECENI EGYETEM

Fizikai Tudományok Doktori Iskola

Debrecen, 2024.

1. Bevezetés

Napunk egy „átlagos”, G típusú csillag, azonban a földi élet szempontjából minden téren meghatározó szerepet játszik. A csillagászati és asztrofizikai kutatások számára továbbá egyedülálló égi plazmafizikai laboratóriumot biztosít, amely – kozmikus skálán mérve – csupán kar-nyújtásnyi távolságban van bolygónktól, ezáltal felbecsülhetetlen érték és részletgazdag betekintést nyújtva a csillagbelső és -léggörök fizikai folyamataiba. Maga a napléggör dinamikus és komplex finomszerkezetet mutat, hála a gravitációnak és a mindenütt jelenlévő, inhomogén eloszlású mágneses tereknek.

Egy ilyen mágneses plazma környezetet a magnetohidrodinamika (MHD) keretében tudunk jó közelítéssel leírni. Napunk légkörének számos szerkezeti eleme szolgálhat különféle MHD hullámok számára hullámvezető közegként. Míg a napléggör jelenségeinek bizonyos fizikai paramétereit (pl. hőmérséklet, sűrűség, geometriai méret) közvetlen megfigyelések segítségével is meg tudjuk határozni, más mennyiségek (így például mágneses szerkezet vagy rétegződés jellemzői, illetve transzport együtthatók) esetében közvetett módszerekre kell hagyatkoznunk. A napléggörbeli paraméterek közvetett meghatározásának egyik lehetősége a szoláris magneto-szeizmológia (SMS) gyors ütemben fejlődő tudományterületében rejlik. Az SMS keretében alkalmazott módszerek azon a tényen alapulnak, miszerint a közeg fizikai és geometriai paramétereit meghatározzák a benne terjedő hullámok tulajdonságait. Így, ha idő- és térbeli hullámtulajdonságok (úgy mint frekvenciák, periódusidők és amplitúdók) megfigyeléseit a hullámvezető közvetlenül mérhető paramétereivel társítjuk, az MHD hullámok terjedésére vonatkozó elméleti tanulmányok nyújthatják a hiányzó láncszemet, lehetővé téve számunkra, hogy következtetéseket vonjunk le a napléggörbeli jelenségek nehezebben megfogható tulajdonságaival kapcsolatban (Erdé-

lyi, 2006a,b; Banerjee és tsai., 2007; Andries és tsai., 2009; Arregui és Goossens, 2019).

Az SMS tanulmányokban tapasztalható hasznos mivoltukon túl az MHD hullámok egy másik, nagy jelentőségű szerepet is játszhatnak a napléggör közegében. Az MHD hullámok tanulmányozása ugyanis hozzájárulhat a napléggör f tése által jelentett rejtély megoldásához. Ez a tudományos feladvány abból a különös hőmérséklet-eloszlásból eredeztethető, amelyet a Napunkat felépítő rétegekben tapasztalhatunk az energiatermelésért felelős magtól távolodva. Bár eleinte, a 15 millió K nagyságrendű maghőmérséklet mintegy 6000 K-re csökken elérve a napfelszínt, tovább emelkedve a légkörben ismét hőmérséklet-emelkedés figyelhető meg, egészen a koronában tapasztalható 1-2 millió K-ig. E jelenség csak akkor magyarázható, ha létezik egy alternatív energiaszállító mechanizmus a napléggörben, amely képes ellensúlyozni a radiatív veszteségeket. Bár egyetlen megoldás sem azonosítható a hiányzó energia egyedüli forrásaként, számos folyamat képes lokálisan hozzájárulni a kromoszféra és a korona magas hőmérsékletének fenntartásához. Ezek közé tartoznak mind hidrodinamikai folyamatok (úgy mint az akusztikus és pulzációs hullámok), mind pedig mágneses f tési mechanizmusok: mágneses rekonstrukció valamint MHD hullámok (Erdélyi és Nelson, 2016).

A Nap plazmáját mindenütt átjáró mágneses terek létének és az MHD hullámok kétszeresen is hasznos mivoltának köszönhetően e kutatási terület kiemelt helyet foglal el a napfizikán belül. Jelen tanulmány ehhez a folyamatosan bővülő tudományághoz kíván hozzájárulni a napléggör hullámvezetést leíró modellek további finomítása által.

2. Motiváció és célkitűzések

Habár az MHD hullámok jelenlétét a naplégkörben már több évtizeddel ezelőtt megjósolták (Uchida, 1968, Habbal, Holzer és Leer, 1979), a közelmúltban a Napon elforduló MHD hullámok kutatása példátlanul elnyitott kövacsolhatott az újonnan rendelkezésre álló megfigyelések tengeréből, hála a kiváló tér- és időbeli felbontású földfelszíni- és űr-eszközök tömegének (Nakariakov és Verwichte, 2005; Banerjee és Tsai, 2007; Ruderman és Erdélyi, 2009; Wang, 2011; Arregui, Oliver és Ballester, 2012; De Moortel és Nakariakov, 2012; Mathioudakis, Jess és Erdélyi, 2013). A naptávcsövek legújabb generációja (Daniel K. Inouye Solar Telescope [DKIST], European Solar Telescope [EST]) további rendkívüli felrölépést jelent majd az elérhető adatok mennyiségét és minőségét tekintve egyaránt. Ez pedig egyúttal további motivációt jelent az elméleti modellek további finomításának irányában, amelyeket aztán a megfigyelt jelenségek leírására használhatunk az SMS kutatások során.

A modellek finomításának egyik lehetőségét az aszimmetriák beépítése, valamint a további fizikai tényezők (úgy mint az áramlások jelenléte) figyelembe vétele jelenti. A naplégkör struktúráit mágneses rétegzésű modellekkel közelítik, „klasszikus” leírások kezdetben statikusak és szimmetrikusak voltak (Roberts, 1981; Edwin és Roberts, 1982). Nemrégiben jelent meg egy tanulmány-sorozat első néhány eredménye, amely megkezdte az egyensúlyi plazma- (Allcock és Erdélyi, 2017) és mágneses paraméterek (Zsámberger, Allcock és Erdélyi, 2018) aszimmetriáinak bevezetését e modellekbe. Emellett a stacionárius áramlások aszimmetrikus modellekbe foglalásának irányába tett első lépések is megtörténtek (Barbulescu és Erdélyi, 2018).

A jelen kutatás célja, hogy az aszimmetria három lehetséges forrását (plazma, mágneses és áramlási aszimmetriákat) beépítse a naplég-

kör mágneses rétegzéses modelljeibe. E cél eléréséhez az út számos különböző lépésen keresztül vezet, annak érdekében, hogy minél jobban feltérképezzük és megértsük a központi mágneses réteget körbevevő környezet különböző paramétereinek között potenciálisan fennálló minden különbség hatásait. E hatások közé sorolható a rétegzés által vezetett sajátmódusok fázissebességeinek megváltozása, a levágási sebességek megjelenése, valamint azon egyensúlyi paraméterek tartományának megváltozása, amelyek a Kelvin-Helmholtz instabilitás megjelenéséhez vezethetnek a rendszerben.

Megvizsgálunk továbbá egy olyan lehetséges rétegzést is, amelyben az instabilitás forrása nem az aszimmetria. Ennek érdekében tanulmányozunk egy szimmetrikus mágneses rétegzést, ahol a központi rétegben egy háromszög-profilú áramlás található, és amely kihajlási módusú (kink) rezgésnek van alávetve. Az e rendszerben megjelenő instabilitások meghatározó szerepet játszhatnak például a naplégkör szpikuláinak rövid élettartamában (Zaqarashvili és tsai., 2021). E konfiguráció instabil paramétereinek feltérképezésével zárjuk a jelen értekezésbe foglalt modell-sorozatot, mellyel a szoláris magneto-szeizmológiai tanulmányokhoz rendelkezésre álló elméleti modellek sorát és érvényességét kívánjuk gazdagítani.

3. Tézispontok

A tézisemben tárgyalt eredmények négy fő tézispontban, illetve ezek alpontjaiban foglalhatók össze.

- T1. Megalkottuk és elemeztük az aszimmetrikus, nem mágneses, aszimmetrikus külső áramlásokat tartalmazó környezet által körülzárt mágneses réteg matematikai modelljét. E tézispont eredményeihez a következő cikk kapcsolódik: Zsámberger, Sánchez Montoya és Erdélyi, 2022.

-
- T1.1. A lineáris ideális MHD közelítést alkalmazva megállapítottuk, hogy jelen modell diszperziós relációja egyetlen egyenlet formáját ölti, amely egyszerre határozza meg a kvázi-hurka (quasi-sausage) és a kvázi-kihajlási (quasi-kink) sajátmódusok tulajdonságait.
- T1.2. Megállapítottuk továbbá, hogy a gyenge aszimmetria közelítését alkalmazva további analitikus eredményeket kaphatunk. Ezáltal levezettük a diszperziós reláció szétcsatolt változatát.
- T1.3. Az így kapott egyenletet felhasználva (azaz a gyenge aszimmetria közelítésben) közelítő kifejezéseket adtunk meg a rétegzés által vezetett különféle típusú megoldások (kvázi-hurka és kvázi-kihajlási módusok, felületi és térfogati hullámok) körfrekvenciáira a keskeny- és vastag rétegek, valamint a zéró- és végtelen- határesetekben.
- T1.4. Elemeztük továbbá a körfrekvenciák függését a rendszerben jelen lévő s r ség- és áramlásbeli aszimmetriák mértékétől. Ennek az információnak a segítségével meghatároztunk egy-egy áramlás-aszimmetriai küszöbértéket a Kelvin-Helmholtz instabilitás megjelenéséhez. Ezt az értéket a rétegzés jellemző karakterisztikus sebességek és s r ség-aszimmetria függvényeként fejeztük ki.
- T1.5. Mivel a teljes diszperziós reláció egy komplex, transzcendens egyenlet, ennek megoldásait numerikus módszerrel határoztuk meg. Ezáltal lehetővé vált az is, hogy túllépjünk a gyenge aszimmetria jelentette korlátokon, és számos különböző egyensúlyi paraméter-halmazzal jellemezhető rétegzés-tanulmányozzunk, ezáltal vizsgálva tovább a s r ség-

és áramlásbeli aszimmetriák bevezetésének hatását. Egy, az eredményekből levonható közös tanulság az volt, hogy az elvárásoknak megfelel en egy vagy több, szimmetrikus vagy aszimmetrikus áramlás jelenléte is képes volt megtörni a szimmetriát az er vonalak mentén el re illetve hátra terjed hullámok fázissebeségei között.

- T1.6. A választott áramlási aszimmetria nagyságától függ en megváltozhat a megoldások fázissebesége (a szimmetrikus és statikus rétegzésben érvényes eredményhez képest). Az áramlások nagyságának és aszimmetriájának megfelel megválasztása mellett a sajátmódusok további típusai is megjelennek a megoldások között. Szintén az áramlások nagyságától és aszimmetriájától függ en, olykor a Kelvin-Helmholtz instabil konfigurációkat leíró egyensúlyi paraméterhalmaz kiterjedése és határai is jelent s változást mutattak.
- T2. Megalkottuk és elemeztük az aszimmetrikus mágneses plazmakörnyezetbe foglalt, stacionárius áramlást tartalmazó mágneses réteg matematikai modelljét. E tézispont eredményeihez a következő cikk kapcsolódik: Zsámberger és tsai., 2022.
- T2.1. Az ideális MHD egyenletek linearizálása segítségével levezettük az ebben a rétegzésben (a mágneses er vonalakkal párhuzamosan) terjed síkhullám megoldásokat kormányzó diszperziós relációt. Meger sítést nyert, hogy általános esetben ez a diszperziós reláció is egyetlen egyenlet formáját ölti, amely a sajátmódusok minden típusát együttesen írja le.
- T2.2. A gyenge aszimmetria közelítését alkalmazva levezettük a szétcsatolt diszperziós relációt, amelyre analitikus megoldásokat is kerestünk a vékony réteg és a zéró- határesetekben.

-
- T2.3. A megoldások körfrekvenciájára ily módon kapott kifejezéseket ezután annak a sebességeküszöbnek a meghatározására használtuk, amelyet meghaladva a rendszer instabillá válik a Kelvin-Helmholtz instabilitással szemben.
- T2.4. Továbbá, numerikus megoldásokat kerestünk a teljes és a szétcsatolt diszperziós relációkra. Ennek során igazoltuk, hogy a kiválasztott gyengén aszimmetrikus egyensúlyi paraméterhalmaz esetén e teljes és közelítő megoldások közeli egyezést mutatnak.
- T2.5. Tanulmányoztuk emellett, hogy er sebb aszimmetria bevezetése hogyan változtatja meg a megoldásokat és az instabil paraméter-tartományokat. Megállapítást nyert, hogy mind az er s-, mind a gyenge aszimmetria esetében (azonos kezdeti egyensúlyi réteg mellett) a sajátmódusoknak ugyanazok a fajtái jelennek meg, illetve válhatnak instabillá, azonban az instabilitási küszöb sebesség értéke más lesz a két esetben.
- T3. Megalkottuk és elemeztük az aszimmetrikus, mágneses, aszimmetrikus külső áramlásokat tartalmazó környezet által körülvevett mágneses réteg matematikai modelljét. E tézispont eredményeihez a következő cikkek kapcsolódnak: Allcock és tsai., 2019; Zsámberger, Sánchez Montoya és Erdélyi, 2022.
- T3.1. A lineáris ideális MHD közelítésben megállapítottuk, hogy a jelen modell általános diszperziós relációja sem csatolható szét, azonban a gyenge aszimmetria feltételezésének bevezetésével továbbra is lehetséges két egyszerűbb, különálló egyenlet levezetése.
- T3.2. Ez utóbbi esetre analitikus kifejezéseket is megadtunk, me-

lyek a végtelen plazma- közelítés esetén leírják a sajátmódusok viselkedését.

- T3.3. A kvázi-hurka és kvázi-kihajlási módusok csatolt relációjára vonatkozó levezetés matematikai lépéseit megismételtük az aszimmetrikus stacionárius mágneses rétegzéses rendszerek legáltalánosabb esetében is, amikor mindhárom plazmatartomány különböző egyensúlyi plazma-, mágneses- és áramlási paraméterekkel írható le. A teljes diszperziós reláció ebben az esetben is egyetlen (csatolt) egyenlet formáját ölti, amely egyszerre írja le a sajátmódusok két típusának diszperzióját.
- T3.4. Elvégeztünk egy összehasonlító elemzést a jelen problémát leíró pontos (teljes) diszperziós reláció numerikus megoldásai, valamint az „elzménynek” tekinthető modellek teljes diszperziós relációinak megoldásai között. Ennek során a rétegzéses rendszerek minden régiójában a fotoszféra fényes mágneses pontjaira, illetve ezek intergranuláris környezetére jellemző karakterisztikus sebességekkel dolgoztunk. Összehasonlító eredményeink értelmében a statikus, teljesen aszimmetrikus mágneses rétegzéses rendszerben csak is stabil felületi hullám megoldások találhatók az egyensúlyi paraméterek széles tartományában. Az aszimmetrikus küls plazmaközeget és áramlásokat tartalmazó, küls mágneses terek nélküli stacionárius rétegzéses esete viszont új (térfogati hullám) megoldások, valamint a felületi hullámok egy instabil régiójának megjelenésével járt. Ugyanez volt elmondható az aszimmetrikus küls mágneses tereket és áramlásokat egyaránt tartalmazó modell esetén. Az utóbbi konfigurációt használva azonban levágási sebességek is megjelentek a megoldások fázissebességeiben. E különbségek rámutatnak,

milyen jelentős szereppel bír a naplégkör elemeinek megfigyeléseire alkalmazott elméleti modellek kiválasztása.

T4. Megalkottuk és elemeztük egy szimmetrikus mágneses plazmakörnyezet által körülvevett, háromszög-profilú áramlást tartalmazó, kihajlási módusú rezgést mutató mágneses réteg matematikai modelljét. E tézispont eredményeihez a következő cikk kapcsolódik: Zsámberger és Erdélyi, 2024.

T4.1. Az inkompresszibilis ideális MHD egyenletek felhasználásával levezettük a jelen rétegződéses rendszerben érvényes diszperziós relációt.

T4.2. Mivel általános esetben ez egy, a körfrekvenciákat negyedfokban tartalmazó transzcendens egyenlet, az összefüggést különféle, a rétegvastagságra és az áramlási profilra vonatkozó egyszerűsítő feltételezések bevezetése mellett vizsgáltuk tovább. E módszer segítségével meg tudtuk adni a rétegvastagságra és az Alfvén-sebességekre vonatkozó küszöbértékeket, amelyek instabil paraméter-tartományokat határolnak.

T4.3. Kezdeti numerikus vizsgálatunk segítségével rávilágítottunk továbbá, hogy a központi réteg és annak környezete között a β és Alfvén-sebesség arányok megválasztása hogyan befolyásolja az instabilitási küszöböt.

4. Publikációk



Nyilvántartási szám: DEENK/401/2024.PL
Tárgy: PhD Publikációs Lista

Jelölt: Zsámberger Noémi Kinga
Doktori Iskola: Fizikai Tudományok Doktori Iskola
MTMT azonosító: 10064190

A PhD értekezés alapjául szolgáló közlemények

Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (3)

1. **Zsámberger, N. K.**, Sánchez Montoya, C. M., Erdélyi, R.: Magnetohydrodynamic Waves in an Asymmetric Magnetic Slab with Different External Flows.
Astrophys. J. 937 (1), 23-34, 2022. ISSN: 0004-637X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ac8427>
IF: 4.9
2. **Zsámberger, N. K.**, Tong, Y., Asztalos, B., Erdélyi, R.: MHD Wave Propagation and the Kelvin-Helmholtz Instability in an Asymmetric Magnetic Slab System.
Astrophys. J. 935 (1), 41-53, 2022. ISSN: 0004-637X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ac7ebf>
IF: 4.9
3. Allcock, M., Shukhobodskaia, D., **Zsámberger, N. K.**, Erdélyi, R.: Magnetohydrodynamic Waves in Multi-Layered Asymmetric Waveguides: Solar Magneto-Seismology Theory and Application.
Front. Astron. Space Sci. 6, 1-19, 2019. EISSN: 2296-987X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3389/fspas.2019.00048>

További közlemények

Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (6)

4. **Zsámberger, N. K.**, Erdélyi, R.: Solar Magneto-seismology of a Magnetic Slab in an Asymmetric Magnetic Environment.
Astrophys. J. 934 (2), 1-10, 2022. ISSN: 0004-637X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ac7be3>
IF: 4.9





5. **Zsámberger, N. K.**, Erdélyi, R.: Magnetoacoustic Waves in a Magnetic Slab Embedded in an Asymmetric Magnetic Environment. III. Applications to the Solar Atmosphere.
Astrophys. J. 906 (2), 122-139, 2021. ISSN: 0004-637X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/abca9d>
IF: 5.521
6. **Zsámberger, N. K.**, Erdélyi, R.: Magnetoacoustic Waves in a Magnetic Slab Embedded in an Asymmetric Magnetic Environment. II. Thin and Wide Slabs, Hot and Cold Plasmas.
Astrophys. J. 894 (2), 123-141, 2020. ISSN: 0004-637X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ab8791>
IF: 5.874
7. Oxley, W., **Zsámberger, N. K.**, Erdélyi, R.: Standing MHD Waves in a Magnetic Slab Embedded in an Asymmetric Magnetic Plasma Environment: Surface Waves.
Astrophys. J. 898 (1), 19-31, 2020. ISSN: 0004-637X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ab9639>
IF: 5.874
8. Oxley, W., **Zsámberger, N. K.**, Erdélyi, R.: Standing MHD waves in a magnetic slab embedded in an asymmetric plasma environment: slow surface waves.
Astrophys. J. 890 (2), 1-12, 2020. ISSN: 0004-637X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ab67b3>
IF: 5.874
9. **Zsámberger, N. K.**, Matthew, A., Erdélyi, R.: Magneto-acoustic Waves in a Magnetic Slab Embedded in an Asymmetric Magnetic Environment: The Effects of Asymmetry.
Astrophys. J. 853 (2), 136-148, 2018. ISSN: 0004-637X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/aa9ffe>
IF: 5.58

Ismeretterjesztő, népszerűsítő cikkek (3)

10. **Zsámberger, N. K.**, Erdélyi, R.: Koronafűtés és mágneses hullámok: miért forró a Nap légköre?
Fiz. szle. 70 (3), 80-89, 2020. ISSN: 0015-3257.
11. Nagy, M., **Zsámberger, N. K.**, Pávó, G.: A pozitronemissziós tomográfia (PET) elvi alapjai és feldolgozási lehetőségei a középiskolában I.
Nukleon. 6 (150), 1-5, 2013. ISSN: 1789-9613.





12. **Zsámberger, N. K.**, Nagy, M., Pávó, G.: A pozitronemissziós tomográfia (PET) elvi alapjai és feldolgozási lehetőségei a középiskolában II.
Nukleon. 6 (151), 1-6, 2013. ISSN: 1789-9613.

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora: 43,423

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora (az értekezés alapjául szolgáló közleményekre):

9,8

A DEENK a Jelölt által az iDEa Tudóstérbe feltöltött adatok bibliográfiai és tudományometriai ellenőrzését a tudományos adatbázisok és a Journal Citation Reports Impact Factor lista alapján elvégezte.

Debrecen, 2024.07.12.



Az értekezéshez kapcsolódó publikációk:

- Allcock, M., Shukhobodskaia, D., Zsámberger, N. K. és Erdélyi, R. (2019): Magnetohydrodynamic waves in multi-layered asymmetric waveguides: solar magneto-seismology theory and application. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, Volume 6, 48.
- Zsámberger, N. K., Sánchez Montoya, Carmen M., and Erdélyi, R. (2022): Magnetohydrodynamic waves in an asymmetric magnetic slab with different external flows *The Astrophysical Journal*, Volume 937, 23.
- Zsámberger, N. K., Tong, Yihui, Asztalos, Balázs, and Erdélyi, R. (2022): MHD wave propagation and the Kelvin-Helmholtz instability in an asymmetric magnetic slab system *The Astrophysical Journal*, Volume 935, 41.
- Zsámberger, N. K., és Erdélyi, R. (2024): On instabilities in dynamic magnetic slabs driven by kink waves [el készületben]

További, az értekezés részét nem képező közlemények listája¹:

- Zsámberger, N. K., Allcock, M. és Erdélyi, R. (2018): Magnetoacoustic Waves in a Magnetic Slab Embedded in an Asymmetric Magnetic Environment: The Effects of Asymmetry. *The Astrophysical Journal*, Volume 853, 136.

¹Az itt felsorolt publikációk anyagát a jelen tézisben felsorolt eredmények nem tartalmazzák. Ennek két oka van: (1) mivel ezek a publikációk az MHD hullámok statikus, egyensúlyi áramlásokat nem tartalmazó mágneses rétegzéses rendszerekben történő terjedésével foglalkoznak és (2) mivel e publikációk már egy másik, a Sheeldi Egyetemen benyújtott doktori tézis (Zsámberger, 2022) részét képezték.

- Zsámberger, N. K. és Erdélyi, R. (2020): Koronafésés és mágneses hullámok: Miért forró a Nap légköre? *Fizikai Szemle*, Vol. 70/3. pp. 80-89.
- Oxley, W., Zsámberger, N. K. és Erdélyi, R. (2020): Standing MHD Waves in a Magnetic Slab Embedded in an Asymmetric Plasma Environment: Slow Surface Waves *The Astrophysical Journal*, Volume 890, 109.
- Oxley, W., Zsámberger, N. K. és Erdélyi, R. (2020): Standing MHD Waves in a Magnetic Slab Embedded in an Asymmetric Magnetic Plasma Environment: Surface Waves *The Astrophysical Journal*, Volume 898, 19.
- Zsámberger, N. K. és Erdélyi, R. (2020): Magnetoacoustic Waves in a Magnetic Slab Embedded in an Asymmetric Magnetic Environment. II. Thin and Wide Slabs, Hot and Cold Plasmas. *The Astrophysical Journal*, Volume 894, 123.
- Zsámberger, N. K. és Erdélyi, R. (2021): Magnetoacoustic Waves in a Magnetic Slab Embedded in an Asymmetric Magnetic Environment. III. Applications to the Solar Atmosphere. *The Astrophysical Journal*, Volume 906, 122.

Hivatkozások

Allcock, M. és R. Erdélyi (2017. febr.). "Magnetohydrodynamic Waves in an Asymmetric Magnetic Slab". *Solar Phys.* 292, 35, 35. old. doi: 10.1007/s11207-017-1054-y.

Allcock, Matthew és tsai. (2019. júl.). "Magnetohydrodynamic waves in multi-layered asymmetric waveguides: solar magneto-seismology theory and application". *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* 6, 48. old. doi: 10.3389/fspas.2019.00048.

- Andries, J. és tsai. (2009. dec.). "Coronal Seismology by Means of Kink Oscillation Overtones". *Space Sci. Rev.* 149, 3–29. old. doi: 10.1007/s11214-009-9561-2.
- Arregui, I. és M. Goossens (2019. febr.). "No unique solution to the seismological problem of standing kink magnetohydrodynamic waves". *Astron. Astrophys.* 622, A44, A44. doi: 10.1051/0004-6361/201833813. arXiv: 1812.07266 [astro-ph. SR].
- Arregui, I., R. Oliver és J. L. Ballester (2012. ápr.). "Prominence Oscillations". *Living Reviews in Solar Physics* 9, 2, 2. old. doi: 10.12942/lrsp-2012-2.
- Banerjee, D. és tsai. (2007. nov.). "Present and Future Observing Trends in Atmospheric Magnetoseismology". *Solar Phys.* 246, 3–29. old. doi: 10.1007/s11207-007-9029-z.
- Barbulescu, M. és R. Erdélyi (2018. jún.). "Magnetoacoustic Waves and the Kelvin-Helmholtz Instability in a Steady Asymmetric Slab. I: The Effects of Varying Density Ratios". *Solar Phys.* 293.6, 86, 86. old. doi: 10.1007/s11207-018-1305-6.
- De Moortel, I. és V. M. Nakariakov (2012. júl.). "Magnetohydrodynamic waves and coronal seismology: an overview of recent results". *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A* 370, 3193–3216. old. doi: 10.1098/rsta.2011.0640. arXiv: 1202.1944 [astro-ph. SR].
- Edwin, P. M. és B. Roberts (1982. márc.). "Wave propagation in a magnetically structured atmosphere. III - The slab in a magnetic environment". *Solar Phys.* 76, 239–259. old. doi: 10.1007/BF00170986.
- Erdélyi, R. (2006. febr.a). "Magnetic coupling of waves and oscillations in the lower solar atmosphere: can the tail wag the dog?": *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A* 364, 351–381. old. doi: 10.1098/rsta.2005.1703.

- Erdélyi, R. (2006. okt.b). "Magnetic seismology of the lower solar atmosphere". *Proceedings of SOHO 18/GONG 2006/HELAS I, Beyond the spherical Sun*. 624. köt. ESA Special Publication, 15.1, 15.1. old.
- Erdélyi, R. és C. J. Nelson (2016. ápr.). "On The Role of MHD Waves in Heating Localised Magnetic Structures". *Coimbra Solar Physics Meeting: Ground-based Solar Observations in the Space Instrumentation Era*. Szerk. I. Dorotovic, C. E. Fischer és M. Temmer. 504. köt. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 153. old.
- Habbal, S. R., T. E. Holzer és E. Leer (1979. jan.). "Heating of Coronal Loops by Fast Mode Mhd-Waves". *IAU Colloq. 44: Physics of Solar Prominences*. Szerk. E. Jensen, P. Maltby és F. Q. Orrall, 228. old.
- Mathioudakis, M., D. B. Jess és R. Erdélyi (2013. jún.). "Alfvén Waves in the Solar Atmosphere. From Theory to Observations". *Space Sci. Rev.* 175, 1–27. old. doi: 10.1007/s11214-012-9944-7. arXiv: 1210.3625 [astro-ph. SR].
- Nakariakov, V. M. és E. Verwichte (2005. máj.). "Coronal Waves and Oscillations". *Living Reviews in Solar Physics* 2, 3, 3. old. doi: 10.12942/lrsp-2005-3.
- Roberts, B. (1981. jan.). "Wave Propagation in a Magnetically Structured Atmosphere - Part Two - Waves in a Magnetic Slab". *Solar Phys.* 69, 39–56. old. doi: 10.1007/BF00151254.
- Ruderman, M. S. és R. Erdélyi (2009. dec.). "Transverse Oscillations of Coronal Loops". *Space Sci. Rev.* 149, 199–228. old. doi: 10.1007/s11214-009-9535-4.
- Uchida, Y. (1968. máj.). "Propagation of Hydromagnetic Disturbances in the Solar Corona and Moreton's Wave Phenomenon". *Solar Phys.* 4, 30–44. old. doi: 10.1007/BF00146996.

- Wang, T. (2011. júl.). "Standing Slow-Mode Waves in Hot Coronal Loops: Observations, Modeling, and Coronal Seismology". *Space Sci. Rev.* 158, 397–419. old. doi: 10.1007/s11214-010-9716-1. arXiv: 1011.2483 [astro-ph. SR].
- Zaqarashvili, T. V. és tsai. (2021. máj.). "Kink instability of triangular jets in the solar atmosphere". *Astron. Astrophys.* 649, A179, A179. doi: 10.1051/0004-6361/202039381. arXiv: 2102.09952 [astro-ph. SR].
- Zsamberger, Noemi (2022). "Mathematical Modelling of MHD Waves in Asymmetric Waveguides with Applications to Solar Physics". url: <https://etheses.whiterose.ac.uk/33022/>.
- Zsámberger, N. K., M. Allcock és R. Erdélyi (2018. febr.). "Magnetoacoustic Waves in a Magnetic Slab Embedded in an Asymmetric Magnetic Environment: The Effects of Asymmetry". *Astrophys. J.* 853, 136, 136. old. doi: 10.3847/1538-4357/aa9ffe.
- Zsámberger, Noémi Kinga és Róbert Erdélyi (2024). "On instabilities in dynamic magnetic slabs driven by kink waves". *Astrophys. J.* [in preparation].
- Zsámberger, Noémi Kinga, Carmen M. Sánchez Montoya és Róbert Erdélyi (2022. szept.). "Magnetohydrodynamic Waves in an Asymmetric Magnetic Slab with Different External Flows". *Astrophys. J.* 937.1, 23, 23. old. doi: 10.3847/1538-4357/ac8427.
- Zsámberger, Noémi Kinga és tsai. (2022. aug.). "MHD Wave Propagation and the Kelvin-Helmholtz Instability in an Asymmetric Magnetic Slab System". *Astrophys. J.* 935.1, 41, 41. old. doi: 10.3847/1538-4357/ac7ebf.

Short thesis for the degree of doctor of philosophy (PhD)

**Magnetohydrodynamic waves
and instabilities in the solar atmosphere**

by Noémi Kinga Zsámberger

Supervisor: Prof. Róbert Erdélyi



1949

UNIVERSITY OF DEBRECEN

Doctoral School of Physics

Debrecen, 2024.

1 Introduction

Our Sun is an “average”, G-type star, but it determines all aspects of life on Earth. For astronomy and astrophysics research, it also provides a celestial plasmaphysical “laboratory” located - on a cosmic distance scale - only an arm’s length away from our planet, offering us invaluable, detailed insights into the physical processes within stellar interiors and atmospheres. The solar atmosphere itself shows a dynamic and complex fine structuring, thanks to the presence of gravity and ubiquitous, inhomogeneously distributed magnetic fields.

Such a magnetised plasma environment can be described within the framework of magnetohydrodynamics (MHD). Numerous solar atmospheric structures may serve as waveguides for various MHD waves. While certain physical parameters of these solar structures can be obtained from direct observations (e.g. temperature, density, or geometric size), for others (such as magnetic field structuring/stratification, or transport coefficients), we must rely on indirect methods of measurement. One major avenue of the indirect determination of solar atmospheric parameters lies in the rapidly evolving field of solar magneto-seismology (SMS).

The methods employed in SMS rely on the fact that the physical and geometric parameters of a medium determine the properties of the waves propagating through it. Then, if we combine observations of temporal and spatial wave properties (such as frequencies, periods and amplitudes) with directly measurable parameters of waveguides, theoretical studies of MHD wave propagation can provide the missing link between the two and allow us to draw conclusions about the more elusive properties of solar atmospheric structures (Erdélyi, 2006a,b; Banerjee et al., 2007; Andries et al., 2009; Arregui and Goossens, 2019).

Beyond their usefulness in conducting SMS studies, MHD waves

have one further potential major part to play in the solar environment. Namely, MHD wave studies can contribute to solving the enigma of solar atmospheric heating. This research question arose from the peculiar distribution of temperatures across the layers of our Sun while moving ever further away from the energy-producing core. While initially, the core temperature of 15 million K decreases to approximately 6000 K at the solar surface, rising further above this surface brings with it increasing temperatures once again, all the way up to the 1-2 million K temperatures found in the solar corona. To explain this phenomenon, an alternate energy transport mechanism must exist to balance the radiative losses in the atmosphere. While no single solution has been identified as the sole additional energy source, several processes can locally contribute to maintaining the high chromospheric and coronal temperatures. These include both hydrodynamic processes (such as acoustic and pulsation waves), and magnetic heating mechanisms: magnetic reconnection and MHD waves (Erdélyi and Nelson, 2016).

The ubiquitous nature of magnetic fields in the solar plasma and the two-fold usefulness of MHD waves has led to them occupying a prominent place within solar physics research. The current study aims to contribute to this ever-expanding field with the further refinement of modelling solar waveguides.

2 Motivation and Aims

Although the existence of MHD waves in the solar atmosphere was predicted several decades ago (Uchida, 1968, Habbal, Holzer, and Leer, 1979), in recent years, the study of solar MHD waves has been able to benefit from an unprecedented richness of observational results, thanks to the variety of ground- and space-based detectors with high

spatio-temporal resolution (Nakariakov and Verwichte, 2005; Banerjee et al., 2007; Ruderman and Erdélyi, 2009; Wang, 2011; Arregui, Oliver, and Ballester, 2012; De Moortel and Nakariakov, 2012; Mathioudakis, Jess, and Erdélyi, 2013). The newest generation of solar observatories (Daniel K. Inouye Solar Telescope [DKIST] and the European Solar Telescope [EST]) will mean a further massive improvement of the quality and quantity of available data, providing us with further motivation to keep refining the theoretical models we can use to describe the observed structures for the purposes of SMS studies.

One such avenue of refinement can be the inclusion of asymmetries within solar waveguide models, as well as taking additional physical effects (such as the presence of flows) into account. "Classical" descriptions approximating structures within the solar atmosphere by magnetic slab models were initially static and symmetric (Roberts, 1981; Edwin and Roberts, 1982). A recent series of studies has started to introduce equilibrium plasma- (Allcock and Erdélyi, 2017) and magnetic asymmetries into this model (Zsámberger, Allcock, and Erdélyi, 2018), and the first steps towards introducing steady flows were also taken (Barbulescu and Erdélyi, 2018).

Our aim here is to incorporate all three of these possible sources of asymmetry (plasma, magnetic and flow) into slab models of the solar atmosphere. This is done in several different steps in order to better explore and understand the effects of each potential difference between the external parameters describing the environment of a magnetic slab. These effects include changes in the phase speeds of the eigenmodes guided by the slab system, the introduction of cut-off speeds, and a change in the range of equilibrium parameters leading to the appearance of the Kelvin-Helmholtz instability.

Additionally, we consider a scenario where the source of the instability is something other than asymmetry in the system by considering

a symmetric magnetic slab system which contains a flow with a triangular profile in its central region, and which is under the effect of a kink oscillation. Instabilities arising in this case may play a significant role in the short lifetimes of solar spicules (Zaqarashvili et al., 2021). Searching for unstable parameter ranges of this system concludes our current series of additions to the theoretical models at the disposal of solar magneto-seismological studies.

3 Results

The results described in my thesis can be organized into four points.

T1. We constructed and analysed the mathematical model of an isolated magnetic slab enclosed in an asymmetric, non-magnetic plasma environment containing asymmetric external flows. The results in this thesis point are based on the following articles: Zsámberger, Sánchez Montoya, and Erdélyi, 2022.

T1.1. Using the linear ideal MHD approximation, we determined that in the general case, the dispersion relation of this model remains a single equation determining the properties of both quasi-sausage and quasi-kink eigenmodes.

T1.2. We further determined that in the approximation of weak asymmetry, it becomes possible to derive further analytical results. Utilising this conclusion, we obtained a decoupled version of the dispersion relation.

T1.3. The equation so obtained was then used to provide approximate expressions describing the angular frequencies of the different types of solutions (quasi-sausage and quasi-kink,

surface and body modes) guided by this slab system in the thin- and wide-slab, zero- and infinite- limits.

- T1.4. Furthermore, we analysed the dependence of the angular frequencies on the measures of density and flow asymmetry in the system. We utilised this information to determine a threshold flow asymmetry parameter for the onset of the Kelvin-Helmholtz instability in the system, expressing this quantity as a function of the characteristic speeds and density asymmetry of the slab system.
- T1.5. Since the dispersion relation is a complex, transcendental equation, we used a numerical root-finding method to obtain solutions to the full dispersion relation. This also made it possible to move beyond the confines of the weak asymmetry approximation and study a variety of slab systems of this kind to identify the effects played by density and flow asymmetries introduced into the system. A common conclusion from these results was that, as expected, the presence of one or more, symmetric or asymmetric flow(s) broke the symmetry between the phase speeds of modes propagating forward and backward along the field lines.
- T1.6. Depending on the magnitude of flow asymmetry chosen, the phase speeds of solutions may be changed compared to a symmetric and static slab system. With certain choices of flow magnitudes and asymmetry, additional types of eigenmodes may also be found in this steady slab system. Depending on the magnitude and asymmetry of the background flows, the extent and limits of the KHI-unstable sets of equilibrium parameters were also shown to change significantly.
- T2. We constructed and analysed the mathematical model of

a magnetic slab containing a steady flow enclosed in an asymmetric magnetic plasma environment. The results in this thesis point are based on the following articles: Zsámberger et al., 2022.

- T2.1. Through linearising the ideal MHD equations, we derived the dispersion relation governing plane-wave solutions propagating along the magnetic field lines of this slab system. We confirmed that in the general case, the dispersion relation once again remains a single equation governing all eigenmodes.
- T2.2. We derived the decoupled dispersion relation of this configuration in the approximation of weak asymmetry and provided analytical solutions to it in the thin-slab and zero-limits.
- T2.3. These expressions of the angular frequency were then used to find a threshold flow speed above which the system becomes KHI-unstable.
- T2.4. We provided numerical solutions to the full and the approximate dispersion relations and confirmed that for a set of weakly asymmetric equilibrium parameters, these show a close agreement.
- T2.5. We studied how the solutions and the unstable parameter ranges changed when stronger asymmetry was introduced into the system. We determined that both in the case of strong as well as weak asymmetry (starting from the same equilibrium slab configuration), the same types of eigenmodes can be found and may become unstable. However, the instability threshold velocity will be different for a weakly asymmetric slab than it is for a strongly asymmetric one.

-
- T3. We constructed and analysed the mathematical model of a magnetic slab embedded in an asymmetric magnetic plasma environment containing asymmetric steady flows. The results in this thesis point are based on the following articles: Allcock et al., 2019; Zsámberger, Sánchez Montoya, and Erdélyi, 2022.
- T3.1. Using the linear ideal MHD approximation, we established that in the general case, the dispersion relation of the model cannot be decoupled, however, under the assumption of weak asymmetry, the separation into two equations still remains possible.
- T3.2. We provided analytical expressions for the eigenmodes found in this slab system in the limit of infinite plasma- .
- T3.3. The analytical process of deriving the coupled (full) dispersion relation of quasi-sausage and quasi-kink modes was repeated for the most general case of this type of asymmetric steady slab systems, in which all three regions may be characterised by different plasma, magnetic, and flow parameters. In this case, too, the dispersion relation takes the form of one single (coupled) equation, which describes the dispersion of both types of eigenmodes.
- T3.4. We carried out a comparison between numerical solutions to the exact (full) dispersion relation of this problem and its “predecessor” models. In order to do this, we used characteristic speeds in each region of the slab systems which may describe magnetic bright points of the photosphere and their environment in the intergranular lanes. We found that a static, fully asymmetric magnetic slab system provided

only stable surface mode solutions for a wide range of parameters. A steady slab system asymmetric in its flow and plasma parameters, which contained no external magnetic fields, introduced new (body mode) solutions and an unstable region for the surface modes. The same was true for the externally magnetic equivalent of this configuration, however, the latter also introduced cut-offs for the phase speeds of the solutions, underlining the importance that lies with the choice of the theoretical model we wish to apply to solar observations.

- T4. We constructed and analysed the mathematical model of a magnetic slab containing a triangular flow placed in a symmetric magnetic environment, which is under the effect of a kink oscillation. The results in this thesis point are based on the following articles: Zsámberger and Erdélyi, 2024.
 - T4.1. We used the incompressible ideal MHD equations to derive the dispersion relation of this slab system.
 - T4.2. Since in the general case, this is a transcendental equation containing fourth-order terms of the angular frequency, we studied it further under various simplifying assumptions made about the slab width and the flow profile. This process allowed us to express slab width and Alfvén speed limits which delineate unstable regions.
 - T4.3. Through an initial numerical analysis, we showed how the choice of density and Alfvén speed ratios between the slab and its environment influences the instability threshold.

4 Publications



Registry number:
Subject

DEENK/401/2024 PL
PhD Publication List

Candidate: Noémi Kinga Zsánberger
Doctoral School: Doctoral School of Physics
MIM ID: 10064190

List of publications related to the dissertation

Foreign language scientific articles in international journals (3)

1. Zsánberger; N K, Sánchez-Munoz, C. M, Erdélyi, R: Magnetohydrodynamic Waves in an Asymmetric Magnetic Slab with Different External Flows.
Astrophys. J. 937(1), 23-34, 2022 ISSN: 0004-637X
DOI: <http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ac8427>
IF: 49
2. Zsánberger; N K, Tong Y., Asztalos, B., Erdélyi, R: MHD Wave Propagation and the Kelvin-Helmholtz Instability in an Asymmetric Magnetic Slab System
Astrophys. J. 935(1), 41-53, 2022 ISSN: 0004-637X
DOI: <http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ac7ebf>
IF: 49
3. Allcock, M, Shukhobolskaia, D, Zsánberger; N K, Erdélyi, R: Magnetohydrodynamic Waves in Multi-Layered Asymmetric Waveguides: Solar Magneto-Seismology Theory and Application
Front. Astron. Space Sci. 6: 1-19, 2019 EISSN: 2296-987X
DOI: <http://dx.doi.org/10.3389/fspas.2019.00048>

List of other publications

Foreign language scientific articles in international journals (6)

4. Zsánberger; N K, Erdélyi, R: Solar Magneto-seismology of a Magnetic Slab in an Asymmetric Magnetic Environment
Astrophys. J. 934(2), 1-10, 2022 ISSN: 0004-637X
DOI: <http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ac7be3>
IF: 49



5 Zsánberger, N K, Erdélyi, R: Magnetoacoustic Waves in a Magnetic Slab Embedded in an Asymmetric Magnetic Environment. III. Applications to the Solar Atmosphere.

Astrophys. J. 906(2), 122-139, 2021. ISSN: 0004-637X

DOI: <http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/abca9d>

IF: 5.521

6 Zsánberger, N K, Erdélyi, R: Magnetoacoustic Waves in a Magnetic Slab Embedded in an Asymmetric Magnetic Environment. II. Thin and Wide Slabs, Hot and Cold Plasmas.

Astrophys. J. 894(2), 123-141, 2020. ISSN: 0004-637X

DOI: <http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ab6791>

IF: 5.874

7 Oley, W, Zsánberger, N K, Erdélyi, R: Standing MHD Waves in a Magnetic Slab Embedded in an Asymmetric Magnetic Plasma Environment: Surface Waves.

Astrophys. J. 898(1), 19-31, 2020. ISSN: 0004-637X

DOI: <http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ab6639>

IF: 5.874

8 Oley, W, Zsánberger, N K, Erdélyi, R: Standing MHD waves in a magnetic slab embedded in an asymmetric plasma environment: slow surface waves.

Astrophys. J. 890(2), 1-12, 2020. ISSN: 0004-637X

DOI: <http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ab67b3>

IF: 5.874

9 Zsánberger, N K, Matthew, A, Erdélyi, R: Magnetoacoustic Waves in a Magnetic Slab Embedded in an Asymmetric Magnetic Environment: The Effects of Asymmetry.

Astrophys. J. 853(2), 136-148, 2018. ISSN: 0004-637X

DOI: <http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/aa9ffe>

IF: 5.58

Informational/educational articles (3)

10 Zsánberger, N K, Erdélyi, R: Kócosfát és mágneses hullámok miért fontosak a Nap légkörére?
Fiz. szle. 70(3), 80-89, 2020. ISSN: 0015-3257.

11 Nagy, M, Zsánberger, N K, Pávó, G.: A pozitron emissziós tomográfia (PET) elvi alapjai és felbontási lehetőségei a középiskolában I.
Nukleon 6(150), 1-5, 2013. ISSN: 1789-9613



**UNIVERSITY of
DEBRECEN**

UNIVERSITY AND NATIONAL LIBRARY

UNIVERSITY OF DEBRECEN

H-4002 Egyetem tér 1, Debrecen

Phone: +3652/410-443, email: publikaciok@lib.unideb.hu

**12 Zsánberger, N K, Nagy, M, Pávó, G.: A pozitívemissziós tomográfia (PET) elvi alapjai és
feldolgozási lehetőségei a középiskolában II
Nukleon 6(151), 1-6 2013 ISSN: 1789-9613**

Total IF of journals (all publications): 43,423

Total IF of journals (publications related to the dissertation): 98

**The Candidate's publication data submitted to the IDEa Tudóstér have been validated by DEENKon
the basis of the Journal Citation Report (Impact Factor) database.**

12 July, 2024

Parts of this Thesis are based on the following publications:

- Allcock, M., Shukhobodskaia, D., Zsámberger, N. K. and Erdélyi, R. (2019): Magnetohydrodynamic waves in multi-layered asymmetric waveguides: solar magneto-seismology theory and application. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, Volume 6, 48.
- Zsámberger, N. K., Sánchez Montoya, Carmen M., and Erdélyi, R. (2022): Magnetohydrodynamic waves in an asymmetric magnetic slab with different external flows *The Astrophysical Journal*, Volume 937, 23.
- Zsámberger, N. K., Tong, Yihui, Asztalos, Balázs, and Erdélyi, R. (2022): MHD wave propagation and the Kelvin-Helmholtz instability in an asymmetric magnetic slab system *The Astrophysical Journal*, Volume 935, 41.
- Zsámberger, N. K., and Erdélyi, R. (2024): On instabilities in dynamic magnetic slabs driven by kink waves [in preparation]

List of additional publications that are not parts of this thesis²:

- Zsámberger, N. K., Allcock, M. and Erdélyi, R. (2018): Magnetoacoustic Waves in a Magnetic Slab Embedded in an Asymmetric Magnetic Environment: The Effects of Asymmetry. *The Astrophysical Journal*, Volume 853, 136.

²The publications listed here are not included in the main results listed in the current thesis for two related reasons: as (1) they detail the specifics of MHD wave propagation in static slab systems, as opposed to ones containing bulk background flows, (2) they were included in a separate PhD thesis submitted at The University of Sheffield (Zsamberger, 2022).

- Zsámberger, N. K. and Erdélyi, R. (2020): Koronafés és mágneses hullámok: Miért forró a Nap légköre? *Fizikai Szemle*, Vol. 70/3. pp. 80-89.
- Oxley, W., Zsámberger, N. K. and Erdélyi, R. (2020): Standing MHD Waves in a Magnetic Slab Embedded in an Asymmetric Plasma Environment: Slow Surface Waves *The Astrophysical Journal*, Volume 890, 109.
- Oxley, W., Zsámberger, N. K. and Erdélyi, R. (2020): Standing MHD Waves in a Magnetic Slab Embedded in an Asymmetric Magnetic Plasma Environment: Surface Waves *The Astrophysical Journal*, Volume 898, 19.
- Zsámberger, N. K. and Erdélyi, R. (2020): Magnetoacoustic Waves in a Magnetic Slab Embedded in an Asymmetric Magnetic Environment. II. Thin and Wide Slabs, Hot and Cold Plasmas. *The Astrophysical Journal*, Volume 894, 123.
- Zsámberger, N. K. and Erdélyi, R. (2021): Magnetoacoustic Waves in a Magnetic Slab Embedded in an Asymmetric Magnetic Environment. III. Applications to the Solar Atmosphere. *The Astrophysical Journal*, Volume 906, 122.

References

- Allcock, M. and R. Erdélyi (Feb. 2017). "Magnetohydrodynamic Waves in an Asymmetric Magnetic Slab". In: *Solar Phys.* 292, 35, p. 35. doi: 10.1007/s11207-017-1054-y.
- Allcock, Matthew et al. (July 2019). "Magnetohydrodynamic waves in multi-layered asymmetric waveguides: solar magneto-seismology theory and application". In: *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* 6, p. 48. doi: 10.3389/fspas.2019.00048.

- Andries, J. et al. (Dec. 2009). "Coronal Seismology by Means of Kink Oscillation Overtones". In: *Space Sci. Rev.* 149, pp. 3–29. doi: 10.1007/s11214-009-9561-2.
- Arregui, I. and M. Goossens (Feb. 2019). "No unique solution to the seismological problem of standing kink magnetohydrodynamic waves". In: *Astron. Astrophys.* 622, A44, A44. doi: 10.1051/0004-6361/201833813. arXiv: 1812.07266 [astro-ph. SR].
- Arregui, I., R. Oliver, and J. L. Ballester (Apr. 2012). "Prominence Oscillations". In: *Living Reviews in Solar Physics* 9, 2, p. 2. doi: 10.12942/lrsp-2012-2.
- Banerjee, D. et al. (Nov. 2007). "Present and Future Observing Trends in Atmospheric Magnetoseismology". In: *Solar Phys.* 246, pp. 3–29. doi: 10.1007/s11207-007-9029-z.
- Barbulescu, M. and R. Erdélyi (June 2018). "Magnetoacoustic Waves and the Kelvin-Helmholtz Instability in a Steady Asymmetric Slab. I: The Effects of Varying Density Ratios". In: *Solar Phys.* 293.6, 86, p. 86. doi: 10.1007/s11207-018-1305-6.
- De Moortel, I. and V. M. Nakariakov (July 2012). "Magnetohydrodynamic waves and coronal seismology: an overview of recent results". In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A* 370, pp. 3193–3216. doi: 10.1098/rsta.2011.0640. arXiv: 1202.1944 [astro-ph. SR].
- Edwin, P. M. and B. Roberts (Mar. 1982). "Wave propagation in a magnetically structured atmosphere. III - The slab in a magnetic environment". In: *Solar Phys.* 76, pp. 239–259. doi: 10.1007/BF00170986.
- Erdélyi, R. (Feb. 2006a). "Magnetic coupling of waves and oscillations in the lower solar atmosphere: can the tail wag the dog?" In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A* 364, pp. 351–381. doi: 10.1098/rsta.2005.1703.

- (Oct. 2006b). "Magnetic seismology of the lower solar atmosphere". In: *Proceedings of SOHO 18/GONG 2006/HELAS I, Beyond the spherical Sun*. Vol. 624. ESA Special Publication, 15.1, p. 15.1.
- Erdélyi, R. and C. J. Nelson (Apr. 2016). "On The Role of MHD Waves in Heating Localised Magnetic Structures". In: *Coimbra Solar Physics Meeting: Ground-based Solar Observations in the Space Instrumentation Era*. Ed. by I. Dorotovic, C. E. Fischer, and M. Temmer. Vol. 504. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, p. 153.
- Habbal, S. R., T. E. Holzer, and E. Leer (Jan. 1979). "Heating of Coronal Loops by Fast Mode Mhd-Waves". In: *IAU Colloq. 44: Physics of Solar Prominences*. Ed. by E. Jensen, P. Maltby, and F. Q. Orrall, p. 228.
- Mathioudakis, M., D. B. Jess, and R. Erdélyi (June 2013). "Alfvén Waves in the Solar Atmosphere. From Theory to Observations". In: *Space Sci. Rev.* 175, pp. 1–27. doi: 10.1007/s11214-012-9944-7. arXiv: 1210.3625 [astro-ph. SR].
- Nakariakov, V. M. and E. Verwichte (May 2005). "Coronal Waves and Oscillations". In: *Living Reviews in Solar Physics* 2, 3, p. 3. doi: 10.12942/lrsp-2005-3.
- Roberts, B. (Jan. 1981). "Wave Propagation in a Magnetically Structured Atmosphere - Part Two - Waves in a Magnetic Slab". In: *Solar Phys.* 69, pp. 39–56. doi: 10.1007/BF00151254.
- Ruderman, M. S. and R. Erdélyi (Dec. 2009). "Transverse Oscillations of Coronal Loops". In: *Space Sci. Rev.* 149, pp. 199–228. doi: 10.1007/s11214-009-9535-4.
- Uchida, Y. (May 1968). "Propagation of Hydromagnetic Disturbances in the Solar Corona and Moreton's Wave Phenomenon". In: *Solar Phys.* 4, pp. 30–44. doi: 10.1007/BF00146996.

- Wang, T. (July 2011). "Standing Slow-Mode Waves in Hot Coronal Loops: Observations, Modeling, and Coronal Seismology". In: *Space Sci. Rev.* 158, pp. 397–419. doi: 10. 1007/s11214-010-9716-1. arXiv: 1011. 2483 [astro-ph. SR].
- Zaqarashvili, T. V. et al. (May 2021). "Kink instability of triangular jets in the solar atmosphere". In: *Astron. Astrophys.* 649, A179, A179. doi: 10. 1051/0004-6361/202039381. arXiv: 2102. 09952 [astro-ph. SR].
- Zsamberger, Noemi (2022). "Mathematical Modelling of MHD Waves in Asymmetric Waveguides with Applications to Solar Physics". url: <https://etheses.whiterose.ac.uk/33022/>.
- Zsámberger, N. K., M. Allcock, and R. Erdélyi (Feb. 2018). "Magnetoacoustic Waves in a Magnetic Slab Embedded in an Asymmetric Magnetic Environment: The Effects of Asymmetry". In: *Astrophys. J.* 853, 136, p. 136. doi: 10. 3847/1538-4357/aa9ffe.
- Zsámberger, Noémi Kinga and Róbert Erdélyi (2024). "On instabilities in dynamic magnetic slabs driven by kink waves". In: *Astrophys. J.* [in preparation].
- Zsámberger, Noémi Kinga, Carmen M. Sánchez Montoya, and Róbert Erdélyi (Sept. 2022). "Magnetohydrodynamic Waves in an Asymmetric Magnetic Slab with Different External Flows". In: *Astrophys. J.* 937.1, 23, p. 23. doi: 10. 3847/1538-4357/ac8427.
- Zsámberger, Noémi Kinga et al. (Aug. 2022). "MHD Wave Propagation and the Kelvin-Helmholtz Instability in an Asymmetric Magnetic Slab System". In: *Astrophys. J.* 935.1, 41, p. 41. doi: 10. 3847/1538-4357/ac7ebf.