

ZÁRÓJELENTÉS

a “Szoláris és asztrofizikai magnetohidrodinamika” c.,
T043741 sz. OTKA pályázathoz, 2003–2006

CÉLKITŰZÉSEK

Jelen projekt célja az ELTE Csillagászati Tanszékén közel négy évtizede működő szoláris magnetohidrodinamikai kutatócsoport működésének folytatólagos finanszírozása volt a 2003–2006 években. Tehát olyan átfogó keretpályázatról van szó, amelynek a kutatócsoport működésével kapcsolatos összes költséget (konferencia részvételek, külföldi kollégák meghívása, számítógép- és szoftverbeszerzések, szakkönyvvásárlás) kellett biztosítani.

A pályázathoz, illetve a szerződéshez mellékelte munkaterv értelmében kutatásainkat az alábbi területekre terveztük összpontosítani:

- (1) Szoláris dinamóelmélet, a naptevékenység eredete
- (2) Hullámterjedés vizsgálata a naplégkörben
- (3) MHD diszkontinuitások mentén fellépő abszolút ill. konvektív instabilitások vizsgálata
- (4) Egyéb asztrofizikai objektumokban zajló magnetohidrodinamikai folyamatok vizsgálata

EREDMÉNYEK

(1) Szoláris dinamóelmélet, a naptevékenység eredete

A Nap aktív vidékeinek (napfoltcsoportok, fáklyamezők) létrejötte a Nap belsejében húzódó, *tachoklína* néven ismert rétegben keletkező erős mágneses térre vezethető vissza.

A Nap külső burkát alkotó konvektív zónában a konvektív mozgásban részt vevő anyagra ható, a naprajzi szélességtől függő Coriolis-erő következtében a konvektív zóna és a fotoszféra anyaga nem merev testként vesz részt a Nap mintegy egy hónapos periódusú tengelyforgásában. Ehelyett az egyenlítő vidéke mintegy 15-20 százalékkal gyorsabban forog, mint a magas szélességek. Ezt a jelenséget differenciális rotációnak nevezzük. A konvektív zóna alatt fekvő sugárzási zóna ugyanakkor már merev testként forog. A két tartomány között egy vékony átmeneti réteg húzódik, ez az úgynevezett tachoklína. Ennek vizsgálata kulcsfontosságú a naptevékenységet létrehozó dinamómechanizmus szempontjából, ui. mai elképzeléseink szerint a tachoklínában zajló erős differenciális rotáció ”tekeri fel” a nap dipól-szerű gyenge általános mágneses terét erős kelet-nyugati irányú (ún. toroidális) térré. Az erős toroidális fluxuskötegek felszínre törése okozza aztán a naplégkörben az aktív vidékeket, és bennük a naptevékenység ismert jelenségeit (napfoltok, napkitörések stb.).

E folyamatok vizsgálatában az alábbi főbb eredményeket értük el.

(1a) A gyors tachoklína-modell továbbfejlesztése

A világon elsőként kifejlesztett gyors tachoklínamodellünket (ld. a T032462 OTKA pályázat zárójelentését) továbbfejlesztettük és realizisztikusabbá tettük, felső határfeltételként a megfigyelt nagyléptékű mágneses tér tér-időbeli eloszlását használva, továbbá szisztematikusan megvizsgálva különféle eddig figyelembe nem vett effektusok hatását.

A kapott eredmények általában véve megerősítik a korábbi egyszerűbb modellek eredményeit, ugyanakkor a megfigyelésekkel való összhangjuk javult, mivel a szögsebesség eloszlásában mutatkozó poláris "gödör" jelentősen mérséklődött. A tachoklína jellemzőinek hely- és időfüggésére viszont a megváltozott határfeltétel komoly hatással van. Modellünk eredménye az észlelési hibán belül egyezik a helioszeizmológiából leszármaztatott adatokkal (Forgács-Dajka 2004).

Új mechanizmust javasoltunk turbulencia keltésére a szoláris tachoklínában. E turbulencia létrehozott bizonyítékok utalnak. A mechanizmus a szélesség szerinti differenciális rotáció által keltett vízszintes mozgások másodlagos nyírési instabilitása, melyet az erősen stabil rétegződés sem képes meggátolni. Levezettük az ilyen turbulencia diffuzivitását megadó összefüggést, és azt alkalmaztuk a tachoklína egy egyszerűsített egydimenziós modelljében. A kapott eredmény szerint már néhány száz gauss erősségű poloidális mágneses tér is képes a tachoklínát néhány száz kilométeres vastagságúra korlátozni. Ennél vastagabb viszont e modellben nem lehet a tachoklína, mivel a mágneses tér az adott difuzivitás mellett nem hatol be mélyebbre. (Petrovay 2003)

(1b) Meridionális cirkuláció hatása a dinamóra

A Nap mágneses terének eredetére vonatkozó ún. Parker-féle határfelületi dinamómodellt általánosítottuk arra az esetre, ha a felső, nagy diffuzivitású féltérben meridionális áramlás van jelen. Ez feltehetőleg első közelítésben jó reprezentációja a szoláris konvektív zóna alján uralkodó helyzetnek, tekintve, hogy az erős szubadiabatikus rétegződés megakadályozza a meridionális áramlások behatolását a zóna alá (az alsó féltérbe). Meghatároztuk az így felírt sajátérték-probléma analitikus megoldásait több fontos speciális esetben. A homogén áramlás triviális esetével ellentétben a meridionális áramlás a Nap esetében releváns paraméter-értékek mellett nem képes a Parker-Yoshimura-féle előjelszabály feloldására, vagyis a dinamóhullám terjedési irányának megfordítására. Ez az eredmény nehézséget jelenthet a fluxustranszporton alapuló dinamómodelleknek, ugyanakkor a dinamóhullámon alapuló modelleket támogatja. (Petrovay & Kerekes 2005)

(1c) Aktív vidékek mágneses helicitásának eredete

A megfigyelések azt mutatják, hogy a Nap aktív vidékein a mágneses tér helikális jellegű (dugóhúzószerű). A helicitás előjele az északi féltekén negatív, a délin pozitív. Ennek eredetére egyik lehetséges magyarázata, hogy miközben az aktivitást okozó mágneses fluxuscső felszáll a konvektív zónán át, a gyenge külső poloidális mágneses tér köréje tekeredik, s a cső belsejébe diffúzió útján behatolva, a térnek helikális jelleget ad.

Ahhoz, hogy a cső ténylegesen megcsavarodjon, a köré tekeredett poloidális térnek be kell a csőbe hatolnia a turbulens diffúzió révén. A csőben viszont a mágneses tér erősen gátolja a turbulens diffúziót. Indiai kutatókkal együttműködve kidolgoztuk ezen nemlineáris diffúziós folyamat modelljét, követve a mágneses tér alakulását a felszálló fluxuscsőben, miközben egyre több poloidális fluxust söpör fel.

Az eredmények azt mutatják, hogy a modell paramétereinek legkézenfekvőbb megválasztása mellett a kapott csavarodás mértéke a megfigyelt értékekkel nagyságrendileg megegyezik. Modellünk meglehetősen erős predikciója, hogy az aktív vidékek periferiáján - valahol a pláza peremén - ellentétes helicitású gyűrűnek kell jelentkeznie. A jövőben a mainál érzékenyebb magnetográfok segítségével ezt várhatóan tesztelni lehet. (Chatterjee et al. 2006, 2007; Petrovay et al. 2006).

(1d) A naptevékenység nagyléptékű ill. hosszútávú változásai; torziós oszcillációk

Érdekes eredményeket kaptunk a napfoltcsoportok szélesség és idő szerinti eloszlásában mutatkozó, napciklusnál hosszabb távú statisztikai változásokkal kapcsolatban. A greenwichi napfoltkatalógus adatainak statisztikai elemzésével megerősítettük azt a korábbi eredményt, hogy a foltcsoportok

közepes szélessége hosszú távú, évszázados ciklikus változást mutat. Ezen túlmenően kimutattuk, hogy az egyes féltékeken vett átlagszélesség mellett a teljes Napra számított átlagos szélesség is mutat ilyen változást. Vizsgáltuk az egyes napciklusok közötti átfedés mértékének változását is

Vizsgáltuk a napfoltcsoportok pillangódiagramjának finomszerkezetét a greenwichi napfoltkatalógus adatainak felhasználásával az 1874–1976 évekre. Azt találtuk, hogy a foltcsoportok szélesség szerinti eloszlása mindkét féltékét tekintve kettős csúcsot mutat, 10–15 fok ill. 20 fok táján.

A greenwichi napfoltkatalógus felhasználásával megvizsgáltuk az összefüggést a napfoltcsoportok eloszlása és az összterületükben mutatkozó 70–100 éves ún. Gleissberg-ciklus között. Wavelet analízissel mintegy 104 éves periódusú változást találtunk a napfoltcsoportok előjeles átlagos szélességében, ami a periódusban mutatkozó csekély eltéréssel egybevág a más szerzők által más módszerekkel kapott eredményekkel. Ezen túlmenően kimutattuk, hogy hasonló viselkedést mutat a napfoltcsoportok féltékénkénti összterületeinek különbsége is. (Forgács-Dajka et al. 2004, 2007)

(2) Hullámterjedés vizsgálata a naplégkörben

(2a) Oszcillációk a felső naplégkörben; a szpikulák eredete

Új mechanizmust javasoltunk a naplégkörben régóta ismert ún. szpikulák eredetére vonatkozóan. A nemlineáris, disszipatív MHD egyenleteken alapuló modellünk egydimenziós mágneses fluxuscsőben terjedő magnetohidrodinamikai hullámokat tekint. Kimutattuk, hogy a szpikulák kialakításában és jellegzetes tulajdonságainak meghatározásában elsősorban a fotoszférikus p-módusok keltette hullámoknak van szerepe, míg a granuláris mozgások keltette hullámok szerepe másodlagos. Az ionok és semleges atomok közötti ütközések okozta csillapodás szerepe jelentős lehet a vizsgált mechanizmusban. Ez a csillapítás a felső kromoszférában válik jelentőssé, 0.1 Hz fölötti frekvenciáknál.

TRACE észlelések wavelet-analízisével 200-600 s periódusú oszcillációkat mutattunk ki a naplégkör átmeneti tartományában egy aktív vidék fölött. (DePontieu, Erdélyi et al. 2003, 2004, 2005)

(2b) Kisléptékű áramlások és mágneses terek hatása a hullámterjedésre a napfelszín közelében

Az észlelések szerint az aktív vidékeken, a napfoltokon kívül (az ún. plázsban) a hanghullámok terjedése gyorsabb, mint a nyugodt napfelszínen. Ennek végső oka nyilvánvalóan a mágneses tér jelenléte, de a pontos mechanizmus, amelyen keresztül a tér kifejti hatását, ma még nem ismeretes. Az egyik lehetőség azon a megfigyelési tényen alapszik, hogy a granulációs mozgások a plázs területén kissé abnormálisak, tompítottak. Egy szemianalitikus modell keretében megvizsgáltuk, milyen hatással van ez a jelenség a hanghullámok terjedésére. Eredményeink szerint a hatás egy sekély rétegre korlátozódik, melyben a megfigyelt hullámok közel függőleges irányban terjednek. A turbulencia mágneses csillapítása folytán a hangsebesség nagyobb lesz, így a terjedési idők lerövidülnek. Ez a rövidülés független a terjedési úttól, a plázs tér erősségétől viszont jellemző függést mutat. Mivel az akusztikus levágási frekvencia a magasság függvényében változik, a rövidülés magasabb frekvenciájú hullámokra erősebb. Ezek a megjósolt hatások egybevágóak a megfigyelésekkel. Az idő és frekvenciaeltolódások számított mértéke nagyságrendileg összevethető a megfigyelttel, de azért jelentősen (kb. 2–5-ös faktossal) kisebb annál. (Petrovay, Erdélyi & Thompson 2007)

Vizsgáltuk véletlen sebességmezők és mágneses terek hatását a szoláris f-módusra is. (Erdélyi, Kerekes & Mole 2005)

(2c) MHD hullámok terjedése hullámvezetőkben

Megvizsgáltuk lineáris és nemlineáris magnetohidrodinamikai hullámok terjedését, stacionárius áramlás jelenlétében, egy egyenes mágneses fluxuscsőben, mely homogén külső mágneses térbe

ágyazódik. Kimutattuk, hogy az áramlás megváltoztathatja a hullámok terjedési tulajdonságait; ennek folytán a fotoszférára jellemző feltételek között a lassú felületi hullámok eltűnhetnek, s helyettük gyors testhullámok jelenhetnek meg. Móduskereszteződés is felléphet. Az eredményeknek a naplékör megfigyelt MHD hullámok alapján történő diagnosztikája szempontjából van jelentősége. (Terra-Homem, Erdélyi & Ballai 2003)

(3) MHD diszkontinuitások mentén fellépő abszolút ill. konvektív instabilitások vizsgálata

A kutatási tervnek megfelelően megvizsgáltuk a nyílt nyíróáramlásokban fellépő abszolút és konvektív instabilitások jellegét. A vizsgálatot nemlineáris, adiabatikus, kétdimenziós esetre végeztük el, numerikus szimuláció révén. A célannak meghatározása volt, mikor válik az abszolút instabilitás konvektívvá ill. megfordítva. Először inkompresszibilis közelítésben végeztük el a vizsgálatot: eredményeink ekkor megegyeztek Huerre és Monkewitz korábbi, idevágó analitikus eredményeivel. Ezután meghatároztuk a kompresszibilitás és a viszkozitás hatását. Numerikus úton meghatároztuk, milyen sebességű áramlás esetén válik az abszolút instabilitás konvektívvé. Leginstabilabbnak a nemviszkózus kompresszibilis eset bizonyult.

Ezt követően megvizsgáltuk a mágneses tér hatását is egy sor nemlineáris, politrop, ideális MHD szimulációban, különféle mágneses konfigurációkra. Itt is kiszámítottuk a kritikus átlagos áramlási sebességet, amely képes a növekvő perturbációkat elsodorni úgy, hogy azok nem nyomják el az őket keltő áramlást. A korábban más kutatók által tárgyalt analitikusan tárgyalt speciális eseteket numerikus számításaink nagy pontossággal reprodukálták. Ezen túlmenően, egyenletes, diszkontinuos, valamint elnyírt mágneses konfigurációk esetében megállapítottuk, hogy a kritikus sebesség értéke növekvő plazma-bétával csökken. Az instabilitás viselkedését diszkontinuos és elnyírt mágneses térszerkezet esetén az alacsonyabb bétájú oldal határozza meg. A mágneses nyírási réteg vastagsága nincs hatással a kritikus átlagsebesség értékére. (Terra-Homem & Erdélyi 2004; Simpson, Ruderman & Erdélyi 2006)

(4) Egyéb asztrofizikai objektumokban zajló magnetohidrodinamikai folyamatok vizsgálata

Kifejlesztettünk egy modellt a turbulens szuperdiffúzió hatásának vizsgálatára csillagközi molekulafelhők szerkezetére, pontosabban az egyes kémiai összetevők felhőn belüli eloszlására. A nehézséget itt az képezi, hogy a szuperdiffúzió semmilyen parciális differenciálegyenlettel nem írható le. Modellezéséhez a diffúzív áramot a Fourier-térben kell kiszámítani, a hullámszámvektortól függő diffuzivitási együttható alkalmazásával. Az első eredmények szerint a szuperdiffúzió számottevően módosítja az egyes molekuláris összetevők gyakoriságát és eloszlását a felhőben. (Marschalkó 2006)

Megkezdjük a kettőscsillagokban fellépő árapály-erők hatásának tanulmányozását a csillagok alakjára, forgására, belső ill. pályamozgásaira. Az első eredmények szerint disszipáció hiányában a nem-tengelyszimmetrikus csillagalakok miatt hirtelen ugrások, fluktuációk léphetnek fel a pályaelemekben, még a már korábban szinkronizált keringés esetében is. A disszipáció figyelembevétele lesimítja ezeket az ugrásokat, ugyanakkor a pályaelemekben az egyes rendszereknél megfigyelthez hasonló nagyságrendű ingadozások tapasztalhatók. (Borkovits, Forgács-Dajka & Regály 2004)

PUBLIKÁCIÓK

Eredményeinket 33 bírált folyóiratcikkben, valamint kb. ehhez hasonló számú egyéb közleményben (pl. konferenciakiadványban) tettük közzé. (A zárójelentés publikációs listája a konferenci cikkek közül csak néhány fontosabbat tartalmaz.)

A KUTATÓCSOPORT ÉLETÉNEK EGYÉB ESEMÉNYEI

2005-ben Forgácsné Dajka Emese az Európai Fizikai Társulat ajánlása alapján a londoni Institute of Physics Fenia Berz Díját kapta.

2006-ban Petrovay Kristóf az MTA Fizikai Díját kapta.

2003-ban Fáy-Siebenbürgen (a publikációkban Erdélyi) Róbert a sheffieldi egyetemen professzori kinevezést kapott.

Petrovay Kristóf 2004-ben MTA doktori címet nyert el.

2005-ben Forgácsné Dajka Emese az ELTE-n adjunktusi megbízást kapott.

2006-ban Petrovay előadást tartott a Mindentudás Egyetemén, melyben a csoport egyes eredményeit is bemutatta a nagyközönségnek.

2007-től csoportunk bekapcsolódik a SOLAIRE (SOLar And Interplanetary REsearch) EU-kutatóképzési hálózat munkájába. A négyéves projekt keretében a csoport budapesti része egy külföldi doktorandusszal és egy posztdoktorális munkatárssal bővül.

2007 február 23.

Petrovay Kristóf

témavezető