

ZÁRÓJELENTÉS

a "Szoláris és asztrofizikai magnetohidrodinamika" c.,
K83133 sz. OTKA pályázathoz, 2011–2015

CÉLKITŰZÉSEK

Jelen projekt célja az ELTE Csillagászati Tanszékén bő négy évtizede működő szoláris magnetohidrodinamikai kutatócsoport működésének folytatólagos finanszírozása volt a 2011–2015 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 mellékelt munkaterv értelmében kutatásainkat az alábbi területekre terveztük összpontosítani:

- (1) A naptevékenység eredete
- (2) A napkorona fűtésének problémája; hullámterjedés a naplégkörben

EREDMÉNYEK

(1) 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 dinamó-mechanizmus 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) Dinamóelmélet

Egy Babcock-Leighton fluxustranszport-dinamó modell segítségével vizsgáltuk a Nap északi és déli féltekéje között megfigyelhető aszimmetriát. A fluxustranszport-dinamók jelentős sikert értek el a napciklus számos tulajdonságának reprodukálásában. Alapvetően a meridionális cirkulációval illetve az α -effektussal állítottunk elő aszimmetriát. Megállapítottuk, hogy a két félteke között nincs prominens kapcsolat. A déli félteke α -effektusának kikapcsolásával az északi félteke dinamója tovább fejlődik. Megállapítottuk továbbá, hogy az α -effektus erőssége egyenesen arányos a mágneses tér erősségével.

Ugyanebben a fluxustranszport-dinámóban vizsgáltuk a több cellás meridionális cirkuláció hatását a keletkező mágneses térre. Azt találtuk, hogy egy gyenge másodlagos cella jelenléte a magas szélességeken lerövidíti a napciklust és kissé megerősíti a pillangó-diagram pólus felé tartó ágát, míg ha a második cella az első alatt helyezkedik el, a dinamóhullám terjedési iránya átfordul, antiszolárisrá válik. Ezek az eredmények a vizsgált paramétertartományban függetlenek a mágneses diffuzivitás értékétől. Négy cellás modelleket is vizsgáltunk: ha a négy cella egymás mellett sorakozik különböző szélességeken, akkor nagy diffuzivitások mellett Nap-jellegű pillangódiagramok adódnak, alacsonyabb diffuzivitások mellett annál jóval komplexebb struktúrát kapunk. Végül szélesség és mélység szerint is 2–2 cellára tagolt áramlási képnél az egyensúlyi mágneses téreloszlás kellően nagy áramlási sebességek esetén kvadrupoláris lesz.

Korábban kifejlesztett gyors tachoklína-modellünknek a Nap-dinamó modelljeivel való összeegyeztethetőségét tovább vizsgáltuk oly módon, hogy egy fluxustranszport-dinamó esetében a tachoklína vastagságát nem rögzítettük, hanem a mágneses tér függvényében változni engedjük. A számítást a Surya dinamókód felhasználásával végeztük. A változást a gyors tachoklínamodell alapján felállított egyszerű algebrai összefüggések szabályozták. A dinamó működőképességét és a kapott pillangódiagram általános vonásait ez a visszacsatolás egyik esetben sem befolyásolta számottevően, ami arra utal, hogy a gyors tachoklína-mechanizmus és a dinamómodell kompatibilis. A legjobb egyezést a helioszeizmológiai adatokkal abban az esetben kaptuk, ha — mint azt modellünk jósolta — a tachoklína vastagsága a Maxwell-feszültség helyi, pillanatnyi értékének négyzetgyökével fordított arányban állt. Ebben az esetben nemcsak a tachoklína vastagságának nagyságrendje egyezett jól a megfigyelésekkel, de az adatokkal összhangban a tachoklína magasabb naprajzi szélességen vastagabbnak mutatkozott.

Monte Carlo szimulációk segítségével szisztematikusan megvizsgáltuk a van der Pol-oszcillátor viselkedését abban az esetben, ha annak μ csillapításához vagy ξ nemlinearitási paraméteréhez additív vagy multiplikatív zaj tevődik. Az oszcillátorváltozó és a napfolt-relatívszám közötti kapcsolatot 1, 3/2 vagy 2 kitevőjű hatványfüggvénynek tekintve minden esetre feltérképeztük a zaj amplitúdója és korrelációs ideje által definiált paramétersíkot és azonosítottuk azt a tartományt, ahol a napfoltszám a megfigyelthez hasonló viselkedést mutat. Egyedül μ perturbációja esetén nem találtunk ilyen viselkedést; ξ 3–4 éves időskálájú, kellően nagy amplitúdójú perturbációja esetén viszont a megfigyelthez hasonló napciklusokat kaptunk. Az eredmények hasznos megkötelésekkel szolgálhatnak a szoláris dinamómodellek számára.

(1b) Fluxusfeltörés és fotoszferikus mágneses terek

A Nap fotoszférájában mindenfelé mutató turbulens mágneses teret a tubulens vezető plazmában lokálisan fellépő kisléptékű dinamóhatásnak szokás tulajdonítani (egyébként kutatócsoportunk 1993-as javaslata nyomán). A fotoszferikus turbulencia numerikus szimulációi ezt megerősíteni látszanak, és azt mutatják, hogy a turbulens tér főként az 1 Mm körüli vagy annál is kisebb, inerciális tartományban generálódik, így a mágneses energiaspektrum lapos vagy a hullámszámmal nő. Ezek a modellek azonban a Napon ténylegesen uralkodó viszonyoktól távoli paramétertartományt szimulálnak. Rámutattunk, hogy az eredmény tesztelésére alkalmas eszközt jelenthet, hogy a turbulens mágneses tér erőssége az érzékelő műszerek térbeli felbontásától is függ; ezt a kapcsolatot az ún. kioltási függvény írja le. Analitikusan megmutattuk, hogy bizonyos egyszerű feltevések (önhasonló, fraktális térszerkezet és kellően lapos mágneses energiaspektrum) teljesülése esetén egyszerű direkt összefüggés van a mágneses energiaspektrum illetve a kioltási függvény kitevői között. Az analitikus modell következtetéseit Monte Carlo szimulációk segítségével is megerősítettük, továbbá kiterjesztettük a feltevések érvényességi tartományán túl is. Eredményeiket a kioltási függvényre vonatkozó észlelési korlátokkal összevetve az adódik, hogy a turbulens mágneses energiaspektrum a 2–20 Mm mérettartományban csökkenő amplitúdót mutat, szemben a kisléptékű dinamó mai szimulációival. Ez arra utal, hogy a mai numerikus kísérletekkel ellentétben valós szoláris körülmé-

nyek között a dinamóhatás nem az inerciális tartományban, csak a turbulencia integrális skáláján érvényesül, így esetleg fizikai mechanizmusa is alapvetően eltér a modellek működésétől.

A napfoltokban zajló kompresszibilis magnetokonvekciót idealizált háromdimenziós numerikus kísérletsorozat keretében vizsgáltuk. Felülről stabil réteggel határolt, alulról nyitott dobozban zajló, teljesen kifejlett turbulens konvektív áramlásba B_0 erősségű vertikális mágneses teret bevezetve, a rendszer relaxációja után megvizsgáltuk az áramlás és a mágneses tér szerkezetét. A gyengén mágnesesezett konvekcióra jellemző jól ismert granuláris szerkezet helyett nagy térerősségek esetén a hőt oszlopszerű szerkezetű, kisléptékű konvekció szállítja ki. A keskeny, perzisztens, felszálló konvektív oszlopok szomszédságában foltokba koncentrálódó leáramlások mutatkoztak, amelyek a korábbi szemianalitikus modellek "konvektonjaival" azonosíthatók. Közepes térerősségek mellett megfigyelhető volt a fluxusszeparáció jelensége, azaz a kisléptékű konvekciót mutató, erősen mágnesezett plazmába mágnesezetlen, heves granuláris konvekciót végző szigetek ékelődtek. A fluxusszeparációval és a tiszta kisléptékű konvekcióval jellemzett térerő-tartományok között sikerült egy olyan átmeneti tartományt azonosítanunk, melyben a konvektonok és a többszörösen szegmentált granuláris inklúziók dinamikus egymásba alakulása figyelhető meg. Eredményeink a korábbi idealizált numerikus kísérleteknél bizonyos tekintetben jobban hasonlítanak a napfolt-umbrákban megfigyelt szerkezetekre, amennyiben jól reprodukálják a keskeny feláramló oszlopok szomszédságában látható elszórt, lokalizált leáramlásokat. Az umbrapöttyök (umbral dots) nagyfelbontású észlelései alapján felvetettük, hogy a napfolt-umbrákban uralkodó viszonyok az általunk azonosított átmeneti tartománynak felelnek meg a kisléptékű konvekció és a fluxusszeparáció között.

Vizsgáltuk a Nap H-alfa felvételeiben észlelhető hirtelen, kompakt kifényesedések - az ún. Ellerman-féle bombák - tulajdonságait a Dunn naptávcső IBIS és ROSA műszereinek adatait az SDO és a Hinode űrobszervatóriumok adataival összevetve egy születő aktív vidéken. Kifejlesztettünk egy algoritmust a bombák kimutatására. Azt találtuk, hogy a bombák méret és élettartam szerinti eloszlása jóval túlerjed az eddig ismert határokon, és akár 0,3" méretű és 1 percnél rövidebb életű bombák is megfigyelhetők. Korrelációt találtunk a bombák és a G-sávbeli fényes pontok helyzete között. A bombák egyaránt előfordulnak erős unipoláris fluxusú helyeken illetve kétféle polaritás választóvonalán. Energiaeloszlásuk hatványtörvényt követ és a nanoflerék energiatartományába (10^{22} – 10^{25} erg) esik. A bombák gyakran a Fe I 6302.5 vonalban is jelentkeznek, a magnetogramokon pedig fluxussemlegesítés történik itt. A MuRAM kóddal végzett numerikus szimulációkkal való egybevetés alapján a bombákat fotoszferikus mágneses átkötődési eseményekként értelmeztük.

(2) A napkorona fűtésének problémája; hullámterjedés a naplégkörben

(2a) A koronafűtés integrált megközelítése; direkt és inverz modellek

Háromdimenziós numerikus szimulációkban vizsgáltuk az MHD hullámok terjedését egy szoláris mágneses fluxuscsőben. Két lehetőséget tekintettünk a hullámok eredetére: a granuláris mozgások általi hullámkeltést s örvényszerű fotoszferikus mozgásokat. Kimutattuk, hogy a granuláris mozgások szerepe nagyobb lehet a magnetoakusztikus hullámok keltésében és felvetettük, hogy a mágneses elemek fejlődése során a domináns hullámkeltő mechanizmus változhat.

A Hinode űrtávcső adatai alapján kiterjedt statisztikai mintán vizsgáltuk egy nyugodt protuberanciában a kisamplitúdójú transzverzális rezgéseket. A mintában 3436 hullámot azonosítottunk, 50 és 6000 s közötti periódusidőkkel és 0.2 és 23 km/s közötti sebességgel. A detektált hullámok nagy száma lehetővé tette a sebességre vonatkozó teljesítményspektrum felvételét is. 7 mHz alatti frekvenciákon a spektrum konzisztens a fotoszferikus talppontmozgások által generált hullámok esetével. Magasabb frekvenciákon azonban a megfigyelt hullámteljesítmény lényegesen magasabb a modellből vártnál.

A Dunn naptávcső nagy szög- és időfelbontású ROSA műszerének adatai alapján eddig egyedülálló

részletességgel vizsgálhattuk a napkorong közepe táján található finom kromoszférikus struktúrákban mutatkozó transzverzális rezgéseket. Az oszcillációkat álló és haladó magnetohidrodinamikai hajlítási (kink) módusú hullámokként értelmeztük, és meghatároztuk jellemzőiket, majd szoláris magnetoszeizmológiára használtuk fel őket, meghatározva ezzel a struktúrákban a plazma jellemző paramétereit.

A RHESSI űrtávcső 2002 óta több, mint 80 000 flert detektált. A flerek adatai alapján azt találtuk, hogy az egymást követő flerek közötti térbeli ill. időbeli távolság, R és t , egymással hatványtörvény szerinti kapcsolatban áll: $R \sim t^p$ ahol $p = 0.327 \pm 0.007$. Diszkutáltuk az eredmény lehetséges értelmezéseit.

A Svéd Naptávcsővel felvett adatokat, valamint az SDO AIA műszerének méréseit kombinálva először mutattunk ki kifutó "penumbrális" hullámokat egy pórusban (azaz penumbra nélküli napfoltban). Tekintettel a penumbra hiányára ez önmagában is megerősíti azt a közelmúltban javasolt értelmezést, miszerint a penumbrális hullámok valójában felfelé terjednek a mágneses tér mentén. Az AIA által mért különböző vonalakban terjedésük egészen az átmeneti tartományig, sőt az alsó koronáig volt követhető. Vízszintes sebességük legalább 17 ± 0.5 km/s, függőleges sebességük legalább 42 ± 21 km/s. Becsült energiafluxusuk kb. 150 W/m², ami marginálisan elég lehet akár a nyugodt napkorona fűtésére is. Ezzel a kromoszférában és koronában terjedő hullámok egy új, eddig figyelembe nem vett forrását tártuk fel.

(2b) Koronadiagnosztika MHD hullámokkal

Vizsgáltuk a Nap koronájában terjedő globális hullámok terjedését ideális MHD közelítésben. Az eredményeket alkalmaztuk az alsó koronában a SOHO űrobszervatórium EIT műszerével megfigyelt hullámok ("EIT hullámok") esetére. Ezek a nagy kiterjedésű hullámok hirtelen energetikus események (flerek, koronakidobódások) során keltődnek. Vizsgálatunkban egy, a korona alján elhelyezkedő szférikus sűrűségugrás, mint hullámvezető mentén terjedő gyors magnetoakusztikus-nehézségi hullámoknak tekintettük őket. Levezettük e hullámok diszperziós relációját radiális mágneses térszerkezet esetén abban a közelítésben, ha a hullámvezető napfelszíntől mért távolsága aránylag kicsi. Megmutattuk, hogy a hullámok frekvenciája a sűrűségkontrasztal nő; a mágneses tértől csak gyengén függ, a hullámvezető napfelszín feletti magasságával pedig fordított arányban áll.

Továbbfejlesztettük a korona magnetoszeizmológiájának elméletét. Kimutattuk, hogy a koronahurok transzverzális rezgéseinek P1/P2 (alpmódus/első felharmonikus) periódusaránya függ a hurok és annak környezet közötti hőmérsékletkülönbségtől is. Ezt az effektust figyelembe kell venni, amikor a periódusarány alapján a hurok longitudinális sűrűségeloszlására következtetünk. A longitudinális rezgések esetén a sűrűségeloszlástól való függést analitikusan és numerikusan is megvizsgáltuk, különös tekintettel a vékony fluxucső közelítés érvényességére.

A magnetoszeizmológia eszköztárát alkalmaztuk több megfigyelt koronahurok rezgéseire is. Az észlelési adatok űreszközökről (SDO AIA, Hinode XRT, STEREO, SOHO MDI, TRACE) és földi teleszkópoktól (DST, BBSO) származtak. A napkorong peremén levő szpikulákban korábban kimutatott transzverzális oszcillációkat a Dunn naptávcsövön kapott észlelési idő felhasználásával a napkorong belsejében látható szpikulákban ("szálkák") is sikerült kimutatnunk.

Az SDO ROSA műszere segítségével először sikerült kompresszibilis MHD hullámmódusokat kimutatnunk a Nap kromoszférájában a napkorong előtt végzett megfigyelésekkel. A mérések alapján felső korlátot adtunk a koronába feljutó hullámfluxusra is.

PUBLIKÁCIÓK

Eredményeinket 43 bíralt nemzetközi folyóiratcikkben tettük közzé. A közlő lapok impakt faktora

1 és 7 között mozog.

A KUTATÓCSOPORT ÉLETÉNEK EGYÉB ESEMÉNYEI

2011-től Petrovay Kristóf az ELTE TTK Földrajz- és Földtudományi Intézetének igazgatóhelyettese; emellett továbbra is ellátja a Csillagászati Tanszék vezetését is.

Petrovay Kristóf 2012-ben az Nemzetközi Csillagászati Unió 2012-es közgyűlésén Pekingben megrendezett 294. sz., *Solar and Astrophysical Dynamos and Magnetic Activity* c. IAU szimposium tudományos szervezőbizottságának tagja volt.

2013-ban Petrovay Kristóf társszervezője volt a berni Nemzetközi Űrtudományi Intézetben megrendezett "The Solar Activity Cycle" c. workshopnak.

Fáy-Siebenbürgen Róbert és Petrovay Kristóf szervezésében 2013 augusztusában egyetemünkön került megrendezésre a brit Science and Technology Funding Council évenkénti napfizikai nyári iskolája, *STFC-ELTE Introductory Summer School in Solar and Solar-Terrestrial Physics* címmel. Az iskolát, melyet először rendeztek Nagy-Britannián kívül, az ELTE Természettudományi Kara a rangos Eötvös konferenciasorozat részének nyilvánította. A kurzuson mintegy három tucat diák vett részt, főként Nagy-Britanniából és Magyarországról.

A pályázatunkhoz az OTKA engedélyével menet közben csatlakozott Nagy Melinda egyetemi hallgató (ma doktorandusz) 2012-ben a kari OTDK konferencia csillagászati szekciójában I. díjat, 2013-ban a Műegyetemen megrendezett XXXI. OTDK konferencia csillagászat és asztrofizika szekciójában pedig III. díjat kapott.

2014-től Fáy-Siebenbürgen Róbert tölti be (mellékállásban) az MTA CsFK KTM KI debreceni Napfizikai Observatóriuma vezetői tisztét.

Marschalkó Gábor 2014-ben megvédte PhD értekezését.

2015 szeptember 14.

Petrovay Kristóf

témavezető