

## ZÁRÓJELENTÉS

a “Szoláris és asztrofizikai magnetohidrodinamika” c.,  
K67746 sz. OTKA pályázathoz, 2007–2011

### CÉLKITŰZÉSEK

Jelen projekt célja az ELTE Csillagászati Tanszékén bő négy évtizede működő szoláris magnetohidrodinamikai kutatócsoport működésének folytatólagos finanszírozása volt a 2007–2011 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, szoláris dinamoelmélet
- (2) A napkorona fűtésének problémája; hullámterjedés a naplégkörben
- (3) Asztrofizikai turbulenciaelmélet és magnetohidrodinamika (egyéb asztrofizikai objektumokban zajló MHD folyamatok vizsgálata)

### EREDMÉNYEK

#### (1) A naptevékenység eredete, szoláris dinamo

A Nap aktív vidékeinek (napfoltcsoportok, fáklyamezők) létrejötte a Nap belsejében húzóódó, *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 dinamo-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) *Bimodális szoláris dinamo*

Korábban kifejlesztett gyors tachoklínamodellünket a munkatervnek megfelelően az elterjedt határfelületi dinamo-moddellel kombináltuk, feltételezve, hogy a dinamo nemlineáris telítődését kvadrátikus effektus okozza, és hogy a nyírás réteg véges vastagságának a diszperziós relációra gyakorolt hatása a sekélyvízi felületi nehézségi hullámok esetével analóg. A modell egyetlen szabad paraméterét az az empirikus megkötés rögzíti, hogy a megoldásnak reprodukálnia kell, a tachoklína

helioszeizmológiailag meghatározott vastagságát. Azt találtuk, hogy ebben az esetben a megfigyelt tachoklínavastagságot visszaadó megoldás mellett az egyenleteknek egy másik megoldása is létezik, négyszer vastagabb tachoklínával és 4-5-ször gyengébb mágneses térrel. Felvetettük annak lehetőségét, hogy ez a második megoldás a naptevékenység főminimumai (pl. a 17. századi Maunder-minimum) idején valósul meg.

#### *(1b) Véges tachoklínavastagság hatása határfelületi dinamóra*

A Nap-dinamó lehetséges működési mechanizmusai közül az egyik legnépszerűbb az ún. határfelületi dinamó, melyben a 22 éves periódussal oszcilláló mágneses tér a tachoklína és a konvektív zóna határán, felületi hullámként gerjesztődik. Ennek legegyszerűbb, s így a fontosabb effektusok kölcsönhatásába leginkább betekintést engedő leírása a Parker-féle analitikus határfelületi dinamómodell. Ennek további általánosításaként levezettük és grafikusán megoldottuk a felületi hullám viselkedését leíró diszperziós relációkat arra az esetre, ha a tachoklína véges vastagságú (szemben az eredeti modellel, ahol két félvégteles réteg szerepel). Azt találtuk, hogy a véges rétegmélység hatása igen összetett, és a véges mélységű vízrétegen terjedő felületi hullámok analógiája nem alkalmazható.

#### *(1c) Magnetokonvekciós kód kifejlesztése*

Kifejlesztettünk egy numerikus kódot a csillagok belsejében zajló magnetohidrodinamikai konvekció háromdimenziós szimulációjára. A kód elméleti szempontból igen érdekes, mivel alapelve a hidrodinamikai egyenletek Boltzmann-rácsos megoldási technikái csoportjába tartozó BGK-módszer. Az ezen módszert alkalmazó korábbi hidrodinamikai kódunkat bővítettük ki a mágneses tér figyelembe vételével, és parallelizáltuk az OpenMP API direktívakészlet felhasználásával.

#### *(1d) Napciklusok előrejelzési lehetőségeinek vizsgálata*

A jelenlegi szokatlanul mély és hosszú naptevékenységi minimum felélénkítette az érdeklődést a napciklusok előrejelzésének lehetősége iránt. Az utóbbi ciklusok adataival kiegészítve az idevágó régebbi munkákat ismét megvizsgáltuk a napfolt-relatívszám adatok teljesítményspektrumát, megállapítandó, melyek az ebben mutatkozó valós fizikai periódusok, és azok elég stabilak-e ahhoz, hogy előrejelzésre legyenek használhatók. Azt találtuk, hogy a prekursor-módszerhez hasonlóan a harmonikus analízisen alapuló előjelzési technikák esetében is meghatározó a Waldmeier-effektus szerepe, mely szerint az erősebb ciklusok felszálló ága meredekebb. Eszerint, bár évszázados-évezredes időskálán létezhetnek statisztikailag előrejelezhető kváziperiodikus változások, a legnagyobb gyakorlati jelentőségű, ciklusról ciklusra történő naptevékenységi ingadozások előrejelzése fundamentális korlátokba ütközik.

Témavezető a szerkesztők felkérésére terjedelmes áttekintő cikket írt a napciklusok előrejelzéséről a *Living Reviews in Solar Physics* c. tekintélyes elektronikus folyóiratba, mely kizárólag meghívott cikkeket közöl. Ennek kapcsán saját előrejelzéseket is tett különféle ismert módszerekkel a tavaly kezdődött 24. napciklus amplitúdójára vonatkozólag. Legvalószínűbbnek az látszik, hogy a ciklus 2013 táján tetőzik 80–90 körüli simított havi átlagos relatív számmal, tehát az átlagosnál valamivel gyengébb napciklus várható. Ilyen gyenge ciklusokra legutóbb a 20. század elején volt példa.

## **(2) A napkorona fűtésének problémája; hullámterjedés a naplégkörben**

#### *(2a) Torziós Alfvén-hullámok kimutatása a Nap kromoszférájában*

Keskenysávú, nagy felbontású H-alfa felvételek alapján oszcillációkat mutattunk ki a Nap fotoszférájában mágneses elemek egy csoportjában, mintegy 1 négyzetív másodpercnyi területen. Az oszcillációk a wavelet-analízis szerint 126-700 másodperc periódusúak, 2.6 km/s amplitúdójúak, és

23 km/s sebességű kiáramlás kíséri őket. Gondos elemzéssel kimuattuk, hogy az oszcillációk csak torziós Alfvén-hullámokként értelmezhetőek, melyek szögamplitúdója 22 fok. Ez az ilyen típusú hullámok jelenlétének eddigi legmeggyőzőbb bizonyítéka a Nap légkörében. Energiafluxusuk elegendő lehet a napkorona fűtéséhez is.

### *(2b) Véletlenszerű felszíni áramlások hatása az f-módusra*

Ismeretes, hogy a Nap sajátfrekvenciái a napciklus során szisztematikusan változnak. Ezt a változást a felszínhez közeli rétegekben ill. a naplégkörben zajló változásoknak szokás tulajdonítani. E probléma részletesebb elemzése céljából analitikus számítások végeztünk véletlenszerű felszíni áramlásoknak a felületi nehézségi hullámok (f-módus) diszperziós relációjára gyakorolt hatásának felderítése végett. Az eredmények egybevágóak a megfigyelésekkel.

### *(2c) A kromoszféra és napkorona fűtésének problémája*

Az utóbbi időkben előtérbe került az a lehetőség, hogy a naplégkör felsőbb rétegeit (elsősorban a kromoszférát) olyan, a konvektív zónából felfelé terjedő hanghullámok fűthetik, melyek, bár alacsony frekvenciájuk miatt nagyrészt visszaverődnek a fotoszférából lefelé, bizonyos véges amplitúdóval mégis részben "felszivároghatnak" a magasabb rétegekbe. E folyamat további vizsgálata céljából egy egyszerű kétréteges modellben vizsgáltuk a folyamatot. Az L vastagságú alsó rétegben ("fotoszféra") a hőmérséklet a magassággal lineárisan csökken, míg a félvégtelen felső rétegben ("kromoszféra") állandó. Azt találtuk, hogy a paraméterek megfelelő, a Nap esetében nem irreális értékei mellett az alsó tartományban, mint hullámvezetőben fellépő rezonáns frekvenciák közül legalább egy áthaladhat a hőmérsékletminimum körüli evanescens tartományon és a kromoszférában tovább terjedhet. (A rétegzett közegben terjedő hanghullám egyenlete alakilag Klein-Gordon egyenlet, így az áthaladás lényegében a kvantummechanikai alagúteffektus megfelelője.)

Ugyancsak a napkorona egy lehetséges fűtési mechanizmusával függ össze az a munkánk, melyben a rezonáns abszorpció elméletét terjesztettük ki nemlineáris MHD hullámokra, figyelembe véve a Hall-áramokat.

A Hinode űrobservatóriummal végzett EUV spektroszkópia útján oszcillációkat mutattunk ki két szoláris aktív vidék fölötti koronahurkokban. Az egyik esetben a módusazonosítás lassú hurkamódusra utal, míg a másik esetben transzverzális (minden bizonnyal hajlasi) hullámokról van szó, 1.2 ill. 3 mHz frekvenciával. Az EUV vonalarányokból a mágneses térerősséget is meghatároztuk.

## **(3) Asztrofizikai turbulenciaelmélet és magnetohidrodinamika**

### *(3a) Szuperdiffúzió hatása csillagközi molekulafelhők kémiai összetételére*

A csillagközi molekulákra a csillagok ultrabolya sugárzása romboló hatással van, ezért a molekulafelhők sűrű, a káros sugárzástól leárnyékolt belseje és a sugárzásnak kitett széle között jelentős vegyi különbség van. Az egyes molekulák gyakoriságeloszlását a képződés/bomlás dinamikus egyensúlya mellett számottevően befolyásolja a felhő egyes részei közötti turbulens keveredés mértéke is. A molekulafelhőkben azonban a turbulencia integrális léptéke nagyobb a rendszer méreténél, ezért a turbulens diffúzió nem írható le egyetlen skalár diffúziós koefficienssel, ahogy az a korábbi modellekben történt. Az erre az ún. szuperdiffúziós folyamatra vonatkozó korábbi vizsgálatainkat most a munkaterv szerint továbbfejlesztettük. Modellünkben a diffúziós egyenlet megoldásához szükséges Hankel-transzformációt numerikusan számítjuk ki, így a probléma a vizsgált molekula diffúzió nélküli eloszlásának tetszőleges alakja mellett megoldható. A kód egzakt változatában mindazonáltal a felhő fő alkotóeleme (hidrogén) sűrűségeloszlása nem realiztikus (konstans). E korlát kiküszöbölése céljából a problémát megoldottuk realiztikus sűrűségeloszlású felhőre is, de hagyományos diffúzió mellett, majd a kétféle megoldást kombinálva jutottunk el a szuperdiffúzióv,

inhomogén felhőbeli tracereloszlások vélhetőleg legrealisztikusabb modelljéhez.

## **PUBLIKÁCIÓK**

Eredményeinket 35 bírált folyóiratcikkben, valamint kb. ehhez hasonló számú egyéb közleményben (pl. konferenciakiadványban) tettük közzé. (A zárójelentés publikációs listája a konferenciacikkek közül csak néhány fontosabbat tartalmaz.)

## A KUTATÓCSOPORT ÉLETÉNEK EGYÉB ESEMÉNYEI

2007-2011 között, csoportunk részt vett a SOLAIRE (SOLar And Interplanetary REsearch) EU-kutatóképzési hálózat munkájában. A négyéves projekt során a csoport budapesti része átmenetileg egy külföldi doktorandusszal és egy posztdoktorális munkatárssal bővült.

2009-től Petrovay Kristóf tanszékvezetői megbízást kapott az ELTE Csillagászati Tanszékén.

2011-ben Petrovay Kristóf az ELTE-n egyetemi tanári kinevezést kapott.

2011 augusztus 23.

Petrovay Kristóf

témavezető