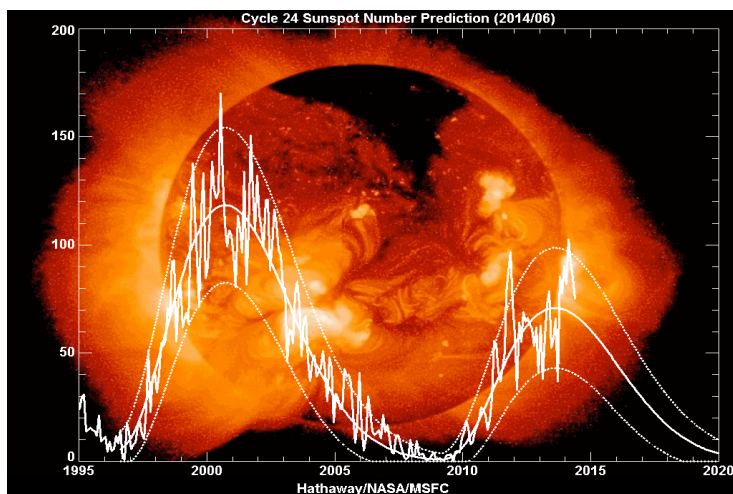


# OTKA K-81421 zárójelentés

## 1. Bevezetés

2010 februárjában, azaz a pályázati munka kezdetekor a 23. napciklus után – az elmúlt száz év legmélyebb napaktivitás minimumát követően – a napaktivitás szintje éppen emelkedni kezdett. A pályázat utolsó szakaszában a 24. ciklus elérkezett a maximumához (ld. az alább mellékelt ábrát).



Ahogy azt a rendkívül gyenge poláris mágneses térerősségek már 2012-ben sejtetni engedték, a napfoltok számát illetően a 24. ciklus jóval alatta maradt az előzőhöz (23.) képest. A napdinamó modellek szerint a napciklus fő fázisai a következők: **1.** A Nap poloidális tere a differenciális rotáció hatására toroidálissá alakul, és megerősödik. **2.** A konvektív zóna aljáról felemelkedő mágneses fluxuscsovek a felszínen napfolt csoportokat vagy aktív vidékeket képeznek, amelyek a ciklus korai szakaszában magas szoláris szélességeken, majd fokozatosan az egyenlítőhöz közelebb jelennek meg (ennek látványos megnyilvánulása az ún. „pillangó diagram”). **3.** A két féltéken a megjelenő napfolt párok ellentétes mágneses polaritásúak (Hale-szabály), és a Nap rotációjának irányában levő „vezető” foltok szisztematikusan közelebb vannak az egyenlítőhöz, mint a „követő” foltok (Joy-törvény), ezért a foltcsoportok diszperziója során a követő foltok mágneses tere nagyobb valószínűséggel éri el a két pólust, ahol kioltják, majd átfordítják a pólusok polaritását (Babcock-Leighton mechanizmus). A nap pólusainak mágneses tere, amely a következő ciklus poloidális terét képviseli, a ciklus minimumakor éri el a maximális értéket. **4.** A dinamó folyamat újra kezdődik, ám fordított polaritású poloidális térrel.

A projekt során a fentiekben vázolt folyamat tanulmányozását négy különböző oldalról közelítettük meg: *a)* elméleti oldalról, a napdinamó modellezésével, *b)* az aktív vidékek esettanulmányain keresztül, a napciklus különféle fázisaiban, különféle aktivitási folyamatokat vizsgálva, *c)* különféle típusú változó csillagok vizsgálatával, ahol a napéhoz hasonló, vagy a napétól eltérő dinamók működnek, és *d)* a csillag- és napaktivitási ciklusok közötti hasonlóságok és különbségek tanulmányozásával. A pályázati munka eredményeként 69 cikk (45 referált nemzetközi folyóiratban, 24 konferencia kiadványban) született, amelyekre eddig 80 független idézetet kaptunk. A publikációk összesített impakt faktora 190 fölött van. A legfontosabb eredményeket az alábbiakban foglaljuk össze.

A nap- és csillagciklusokat tanulmányozó projekt fontos eredménye volt egy meghívott előadás (Oláh & van Driel-Gesztelyi: „*Modulated solar and stellar cycles: parallels and differences*”) az IAU 286-os szimpóziumán, Mendozában (Argentína), valamint három meghívott előadás az *International Space Science Institute* (ISSI, Bern, Svájc) „*The solar activity cycle: Physical causes and consequences*” címmel megrendezett nemzetközi konferenciáján (van Driel-Gesztelyi: *Solar cycle in the corona*, Petrovay: *Solar cycle precursors in models and in observations*, Kővári: *Surface flows from tracking starspots—observing the stellar dynamo*) és öt áttekintő cikk, amelyek az előadások nyomán születtek (Oláh, van Driel-Gesztelyi & Strassmeier, 2012; Petrie, Petrovay & Schatten, 2014; Pevtsov et al., 2014; Ermolli et al., 2014; Kővári & Oláh, 2014), az utóbbi négy cikk terjedelme átlagosan kb. 50 oldal, és a *Space Science Reviews* egy speciális kötetében, majd ezt követően könyv formában fog megjelenni. Egy hatodik, közel 100 oldalas áttekintő cikk is született a szoláris aktív vidékek fejlődéséről, amely szintén a napsíkulus kulcsfontosságú eleme (van Driel-Gesztelyi & Green, 2014; *Living Reviews in Solar Physics*). Fontosnak tartjuk kiemelni, hogy az imént felsorolt áttekintő (review) cikkek mind meghívásos alapon készültek, ami már önmagában is a pályázat résztvevőinek jelentős nemzetközi elismertségét tükrözi a nap- és csillagaktivitás ciklusok kutatása terén.

Pályázatunk záró beszámolójában az eredményeinket három fő témakörbe rendeztük: az első csoportba a *rövid periódusú aktív csillagokkal* kapcsolatos eredményeket gyűjtöttük, a másodikba azokat, amelyek alapja nagyfelbontású spektroszkópiai adatokból készült *csillagfelszín rekonstrukció*. Eredményeink harmadik nagy csoportja a *napaktivitás kutatása*, valamint annak kapcsolata a csillagaktivitással.

## **2. Rövid periódusú változók vizsgálata**

A gyorsan forgó aktív csillagok vizsgálata a projekt négy éve alatt mindvégig előtérben volt. A témából számos fontos eredmény született. Munkánkat saját fotometriai és spektroszkópiai mérésekre alapoztuk, emellett űrfotometriai észleléseket és archívumok adatait is felhasználtuk.

A V374 Peg egy 0.28 naptömegű, teljesen konvektív csillag. Korábbi vizsgálatok csaknem merevtestszerű rotációt és stabil, tengelyszimmetrikus poloidális mágneses mezőt mutattak ki. A csillagról az MTA CSFK CSI Piskésetetői Observatóriumában kb. 430 napnyi fotometriai észlelést sikerült összegyűjtenünk. A fénygörbéken egy minimumhely van, amely egy nagyobb kiterjedésű aktív fészekre utal a csillag felszínén, foltokkal és fáklyamezőkkel. A felszín azonban nem teljesen változatlan, kisebb változások és gyakori flerezés figyelhető meg napos időskálán. A flerek a felszín fényesebb részén, tehát az aktív fészekkel átellenes oldalon gyakoribbak. A fénygörbe rövid távú változásai az aktív fészekben felbukkanó új fluxuskötegekre utalnak, amelyek a Napon megfigyelt jelenségekhez hasonlóan új foltok megjelenését jelzik. A fénygörbén a flerezés hónapos időskálán aktívabb és kevésbé aktív időszakokat mutat. A jelenségre nincs példa az irodalomban, az különleges észlelési sorozat elméleti vizsgálatát a közeljövőben folytatjuk.

A V405 Andromedae egy gyorsan forgó fedési kettős, amelynek rotációs- és pályaperiódusa 0,46 nap, A rendszer mindkét komponense aktív csillag. Többszín fotometriai és radiális sebességmérések alapján azt találtuk, hogy a főkomponens és a mellékkomponens sugara 0,49 és 0,21 napsugár, amely alapján feltételezhető, hogy a főkomponens radiatív magból és konvektív burokból áll, míg a másodkomponens feltehetőleg teljesen konvektív. A csillagszerkezeti modellek szerint a csillag aktivitása miatt a mágnesesen aktív M törpék sugara nagyobb lesz, mint a hasonló, de inaktív csillagoké. Korábbi fénygörbemodellek ezt a jelenséget támasztották alá. Azt találtuk, hogy a főkomponens sugara jelentősen nagyobb az inaktív fősorozati csillagokra számított sugárértéknél. Sőt, az eltérés valamennyi ismert csillag között a V405 And esetében a legnagyobb. A másodkomponens jól illeszkedik a tömeg-sugár relációra. Az újabb, korábbiaktól jelentősen eltérő felszíni struktúrákra utaló fénygörbéket modellezve további bizonyítékot találtunk erre az aktivitással összefüggésbe hozható méretbeli eltérésre.

A V889 Her (HD 171488,  $P_{\text{rot}}=1,337$  nap) gyorsan forgó fiatal, aktív csillag azért különösen érdekes, mert a fiatal Naphoz hasonlít. Kromoszférájáról és fotoszférájáról összegyűjtött észlelések feldolgozásával végeztük el a légkör rétegeinek feltérképezését. A felhasznált adatok a Calar Alto Observatory Echelle FOCES spektrumai 2006. aug. 13-16. időszakból és Johnson  $BV$  fotometria. Először a csillag tulajdonságait, paramétereit pontosítottuk, illetve magas szélességeken megjelenő foltosodást valószínűsítettünk kb. 1500K hőmérsékletkontraszttal. Ez utóbbit a felszín Doppler-rekonstrukciója alapján is megerősítettük. A kromoszférikus emisszió rotációs modulációját foltmodellezés alapján a Napon megfigyelhető fáklyamezőkre emlékeztető aktív területekkel magyaráztuk. A Doppler-leképezést egy differenciális rotációt feltételező paraméter-kereső eljárással kiegészítve végeztük el, amelynek eredményeként gyenge ám egyértelmű Nap-típusú felszíni nyírást tapasztaltunk  $\alpha \approx 0.009$  nyírási paraméterrel. Ez az eredményt a korábbi észlelésekkel összhangban van és további kritikai megfontolások alapján is megalapozottnak találtuk. Az empirikus modellek szintén ekkora értéket jósolnak.

## 2.1 Rövid periódusú csillagok aktivitási ciklusai

A program során 1 napnál rövidebb forgási periódusú, különböző szerkezetű magányos és kettőscsillagok több évre nyúló fotometriai adatsorait vizsgáltuk. A méréseket az MTA CSFK CSI Piszkéstetői Observatóriumában végeztünk el. A forgási periódus és az aktivitási ciklus hossza között gyenge korrelációt találtunk a csillagok evolúciós állapotától és fizikai paramétereitől függően. Megállapítottuk, hogy a legrövidebb, kb. 1-2 éves aktivitási ciklusok a leggyorsabban forgó csillagokon várhatók.

A gyorsan forgó csillagok ciklusaival kapcsolatban a Kepler-űrtávcső adatai újszerű vizsgálatokra is alkalmat adtak. A Kepler-adatokat felhasználva idő-frekvencia analízist végeztünk 39 gyorsan forgó (1 napnál rövidebb rotációs periódusú) késői csillag négy évet lefedő adatsorára. A kutatás célja aktivitási ciklusok detektálása volt annak a jelenségnek a felhasználásával, amely szerint a csillagaktivitás jellemző csillagfelszíni szélessége (tehát az egyenlítőtől mért távolsága) a ciklussal oly módon változik, ahogyan azt a Napon az ún. „pillangó-diagramon” látjuk. A differenciális rotáció miatt a különböző szélességeken megjelenő foltok forgási periódusa eltér. Ebből kiindulva az adatokban éppen ilyen változásokat kerestünk, amikor a forgási periódus időben kváziperiodikusan változik. A 39 kiválasztott csillagból 8 esetben találtunk 300–900 napos aktivitási ciklust. Meghatároztuk a differenciális rotáció nyírási paraméterének legkisebb értékét is, amelynek átlagos értéke kb. 0,001. Az eredmények a rotáció–ciklushossz diagram gyorsan forgó csillagokat tartalmazó (eddig kevésbé tanulmányozott) részéről adnak új információt.

## 3. Aktív óriáscsillagok vizsgálata

### 3.1 Tesztvizsgálatok foltos csillagok differenciális rotációjának meghatározásáról

A csillagfelszínek vizsgálata jelenleg nagyfelbontású spektrumok alapján készített ún. „Doppler-térképek” segítségével lehetséges. Időben egymást követő két Doppler-kép keresztkorrelációjából pedig következtetni lehet a csillagon működő felszíni differenciális rotációra. Azonban a keresztkorrelációs mintázatot jelentősen megzavarhatja a foltok gyors fejlődése. Egy másik módszer a differenciális rotációt leíró paramétert a Doppler-leképezés inverziós algoritmusában adott paraméterként feltételezi („nyírt térkép”). Ugyanakkor kimutatható, hogy bizonyos speciális, bár nem szokatlan folteloszlások (pl. nagy kiterjedésű poláris folt, vagy az egyenlítő körül egyenletesen, sűrűn elszórt kisebb foltok) esetén a rotációs vonalprofil torzulása hasonló ahhoz, mint amit a differenciális rotáció miatt várnánk. Megmutattuk, hogy ilyen esetekben

a „nyírt térkép” módszer hamis eredményre vezet. Ezeket a problémákat küszöböli ki az általunk kifejlesztett „átlagolt keresztkorrelációk módszere” (*ACCORD*), amely idősorba rendezett Doppler-képek esetén megbízható eredményre vezet. A megbízhatóságot mesterséges adatokon demonstráltuk.

### 3.2 Az RS CVn-típusú rendszerek vizsgálata

Az RS CVn-típusú rendszerekben működő mágneses dinamónak fontos feltétele a csillag konvektív burkának differenciális rotációja. Az árapályerők által kialakított kötött keringés biztosítja a gyors forgást, ami a mágneses aktivitás hatékonyságát fokozza. Két jól ismert RS CVn-típusú rendszer, a hosszú periódusú  $\sigma$  Geminorum és az ellipsziodális változó  $\zeta$  Andromedae fizikai tulajdonságait összehasonlítva azt vizsgáltuk, milyen tényezők befolyásolják a kialakuló differenciális rotációt. Az összehasonlításhoz az idősoros Doppler-térképeken alapuló átlagolt keresztkorrelációk módszerét és eredményeit használtuk.

A  $\zeta$  Andromedae-t nagyfelbontású spektroszkópiai adatok, optikai interferometria és hosszú időskálájú fotometriai észlelések alapján vizsgáltuk. Pontosítottuk a csillag alapvető paramétereit és alaposan megvizsgáltuk a K-óriás komponens felszínén megjelenő aktivitási jegyek időfejlődését. A kromoszférikus aktivitás tanulmányozásához  $H\alpha$  spektrumokat használtunk, amelyek protuberanciákról és abszorpciós közegekről árulkodtak. Az optikai interferometria segítségével a csillag látszó átmérőjére  $2,55 \pm 0,09$  milli-ívmásodperc értéket kaptunk. A K-óriás korábban kimutatott elliptikusságot azonban a jelen észlelésekből nem sikerült megerősíteni, mivel annak hatása az adatokból nyerhető 4%-os pontosság alatt volt. A 12 évre nyúló fotometriai adatok alapján a Doppler-képekből következtethető eredményhez hasonló ciklikusság feltételezhető. A  $\zeta$  And-ról kivételes lehetőségként sikerült időben folyamatosan három rotációt lefedő nagyfelbontású spektroszkópiai adatsort összeállítanunk három különböző helyszínről. Mindegyik adatsor időben kb. egy teljes rotációt fedett le kedvező fázismintavétellel, így mindegyik alkalmas volt arra, hogy a Doppler-leképezés segítségével a csillag felszíni hőmérsékleteloszlását rekonstruáljuk, a csillagfoltok időbeli átrendeződését, a differenciális rotáció nyomait vizsgáljuk. A keresztkorrelációs vizsgálat nap-típusú differenciális rotációt mutatott, átlagosan  $\alpha \approx 0,055$  nagyságú felületi nyírási paraméterrel, jó egyezésben a korábbi eredményekkel.

A  $\sigma$  Geminorum egy hosszúperiódusú RS CVn-rendszer, amelyben a K1-óriás komponens antiszoláris differenciális rotációját (tehát a Napon megfigyelhez képest éppen fordított, azaz az egyenlítőhöz képest a magasabb szélességek gyorsabban forognak) már korábban sikerült kimutatnunk. Jelen vizsgálatunkban a módszert jobb időfelbontással megismételtük és ezáltal sokkal megbízhatóbb eredményhez jutottunk. Megnyugtató módon sikerült ismét kimutatnunk az antiszoláris differenciális rotációt. Emellett határértéket adtunk a csillag geometriai torzultságára. Ezután egy új – a korábban használttól eltérő Doppler-leképező eljárást alkalmaztunk egy egészen új spektroszkópiai adatsorra. Az eredmények ismét megerősítették a csillag antiszoláris differenciális rotációját. A felszíni nyírási paraméter értéke  $\alpha = -0,04 \pm 0,01$ . A csillagon korábbi vizsgálatok erős pólusirányú áramlást mutattak. Az újonnan elvégzett vizsgálatainkkal sikerült ezt megerősíteni. A felszíni áramlás mért értéke  $0,21 \pm 0,03$  km/s volt. A tapasztalt jelenség összhangban van azzal az elméleti jóslattal, amely szerint az antiszoláris differenciális rotáció magyarázata lehet a kellően erős meridionális áramlás. A kapott eredmény nagy jelentőségű, hiszen az elméleti dinamómodellek kalibrációja csak hasonló, megbízható észlelési adatok alapján lehetséges.

Az IL Hya egy aktív szubóriás csillag egy RS CVn-típusú rendszerben, amely keringési periódusa 12,905 nap. A csillagot idősoros spektroszkópiai adatok felhasználásával Doppler-leképezéssel vizsgáltuk. A 70 napot átfogó adatsor segítségével mód nyílt a felszíni differenciális rotáció precízebb meghatározására. Az eredményül kapott szoláris differenciális rotáció erőssége

5%-os ( $\alpha=0,05$ ), amely korábbi (bár pontatlanabb) becslésekkel is összhangban van. Kidolgoztunk egy módszert a meridionális irányú felszíni áramok detektálására. Az eredményből pólusirányú meridionális cirkulációra lehetett következtetni.

Kifejlesztettünk egy iteratív, Doppler-leképezéssel kombinált spektrumszétválasztó technikát, amely segítségével olyan spektroszkópai kettőscsillagok felszínét is rekonstruálhatjuk, amelynek mindkét komponense foltos csillag. Erre a problémára a korábban született megoldási kísérletek csak részben és erős megkötések mellett adtak lehetőséget. A módszerünk lehetővé teszi, hogy úgy válasszuk szét a két komponens spektrumvonalait, hogy a lehető legkevesebb olyan vonalprofil-torzulás maradjon a profilokon, mely a másik csillagról származik. A módszer hatékonyságát az RS CVn-típusú V824 Ara kettősrendszer adatain demonstráltuk. Az eredményül született Doppler-térképeken jelentős poláris és alacsony szélességű foltosodás figyelhető meg mindkét csillagon. Ezenkívül mindkét csillagon forró foltok figyelhetők meg az egymással szemberforduló féltekéken, ami a csillagok mágneses tereinek a kölcsönhatásával magyarázható.

### 3.3 A felszíni Li-feldúsulás és a felszíni aktivitás vizsgálata egyes óriáscsillagokon

Két gyorsan forgó K-óriáscsillag, a DP CVn és a DI Psc felszíni Doppler-leképezése alapján vizsgáltuk a csillagok fejlődését. Optikai spektroszkópai és fotometriai adatokat használtunk az alapvető asztrofizikai tulajdonságok meghatározásához. Mindkét csillag esetében a normálisnál nagyobb felszíni lítium abundanciát találtunk (DP CVn:  $\log n = 2,28$  és DI Psc:  $\log n = 2,20$ ), amely alapján azt gondoljuk, hogy a csillagok fejlődése az RGB-n az első Li-felkeveredési fázis végén tart. A fotometriai megfigyelések szerint a rotációs periódus legvalószínűbb értéke 14,010 nap (DP CVn) és 18,066 nap (DI Psc). A csillagok felületi hőmérséklet-eloszlásának rekonstrukcióját Doppler képalkotással végeztük el, míg a DP CVn esetén a felszíni aktivitás hosszútávú változását fotometriai fénygörbék inverziójával tanulmányoztuk. A felszíni foltok leginkább alacsony szélességeken fordulnak elő mindkét csillag esetében, kb. 600-800 K hőmérsékleti kontraszttal a foltatlan fotoszférához viszonyítva. Foltok magasabb szélességeken is találhatóak, ám vagy kisebb kontraszttal (DP CVn) vagy kisebb kiterjedéssel (DI Psc). A DP CVn esetében a felszíni differenciális rotációt a rendelkezésre álló két egymást követő Doppler kép alapján sikerült megbecsülni. Eszerint a csillag felszínén antiszoláris differenciális rotáció működik  $\alpha = -0,035$  nyírási paraméterrel. Ezt az eredményt a hosszútávú fotometriai adatokból levonható következtetések is alátámasztják.

Nagyátvcsövek nemzetközi pályázatán (OPTICON) nyert észlelési adatok alapján a Doppler-leképezéssel rekonstruáltuk a DI Psc felszíni hőmérsékleteloszlását két egymást követő rotációs ciklusban. A felszíni differenciális rotációt az egymást követő Doppler-képek keresztkorrelációja segítségével határoztuk meg. A módszer  $\alpha = -0,083$  0,021 nyírási együtthatót eredményezett, azaz antiszoláris rotációt. A Doppler-térképek és a Li-6708 vonal ekvivalens szélessége rotációs modulációjának összevetéséből arra következtettünk, hogy a Li feldúsulás nincs kapcsolatban az aktivitással.

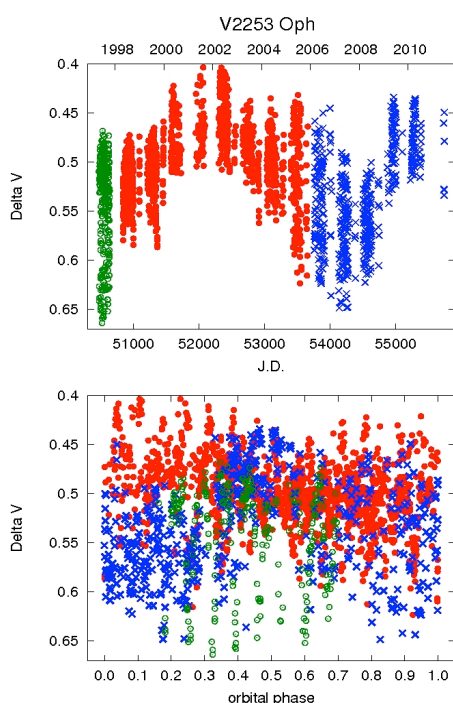
A két magányos óriáscsillagon tapasztalt Li feldúsulás és a viszonylag ritkán előforduló antiszoláris differenciális rotációra vezető eredmények felvetik a lehetőségét annak, hogy a két jelenség között esetleg ok-okozati összefüggés áll fenn. Elképzelésünk szerint a Li-ban gazdag anyag felkeveredésével egyidőben a mélyből a külső régiók felé perdülettranszfer is zajlik, ami magyarázhatja az antiszoláris differenciális rotációt.

### 3.4 Óriáscsillagok aktivitási ciklusai

Az aktív óriáscsillagok ciklusainak vizsgálata nehéz, mivel a ciklusok, és többszörös ciklusok több év-évtized hosszúak, és az összegyűjtött adatsorok csak mostanában érik el azt a szükséges hosszúságot, amely lehetővé teszi a ciklusok vizsgálatát. Összesen hat K-típusú óriáscsillagot vizsgáltunk részletesen, mindegyik szoros kettősrendszer főkomponense (közülük ötnek a másodkomponense ismeretlen).

Először három aktív csillag (V2253 Oph, IT Com, IS Vir) hosszútávú optikai-fotometriai méréseinek analízisét végeztük el. A csillagok a keringési-forgási szinkronizációs folyamat különböző fázisaiban vannak. Mindhárom rendszer SB1 típusú spektroszkópiai kettős egy korai K-óriás főkomponenssel. Az optikai fénygörbéink mellett rendelkezésre álló 2MASS és WISE műholdakról származó közeli és közép-infravörös mérések segítségével pontosan meghatároztuk az effektív hőmérsékleteket és az extinkció mértékét a három csillag irányában. A V2253 Oph és az IT Com esetén tiszta fotoszferikus emisszióra jellemző spektrális energiaeloszlást detektáltunk. Az IS Vir esetén gyenge közép-IR többletet észleltünk, ami porkorong jelenlétére utal. Az IT Com forgási és keringési síkja koplanárisnak bizonyult, szemben az irodalomban fellelhető információval. Fourier-spektrumokból meghatároztuk a fotometriai periódusokat és lehetséges változásait naptól évtizedig terjedő skálán. Az új forgási periódusok a V2253 Oph-ra  $21,55 \pm 0,03$  nap, az IT Com-re  $65,1 \pm 0,3$  nap, az IS Vir-re pedig  $23,50 \pm 0,04$  nap.

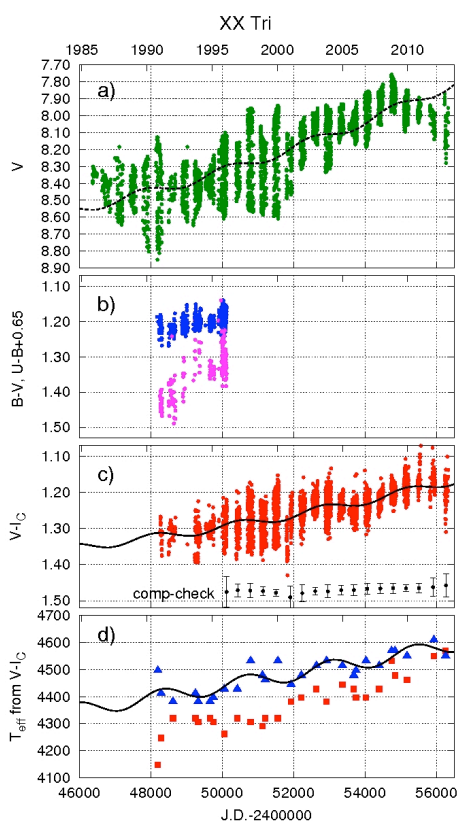
A periódusok felhasadásából megbecsült felszíni differenciális rotáció paramétere a V2253 Oph-ra  $\Delta P/P \sim 0,02$ , az IT Com-ra  $0,07$ -nek adódott. Idő-frekvencia analízis segítségével bizonyítékokat találtunk a V2253 Oph esetében egy 10 éves, valamint az IS Vir esetében egy 5-6 éves aktivitási ciklusra. Az IT Com esetén egy 2-3 év hosszúságú flip-flop jelenséget észleltünk, ami azt jelenti, hogy az aktivitás súlypontja hirtelen mintegy fél csillagkerülettel (kb. 180 fokkal) eltolódott, majd visszakerült a korábbi pozícióba. Az aktív hosszúság cseréje a periasztron-átmenet közelében történt, ami jele lehet a keringési fázis aktivitásra gyakorolt hatásának. A V2253 Oph 21,44 napos rotációs modulációja fázis-koherenciát mutatott a keringési periódussal, amely 15-ször hosszabb a forgási ciklusnál az aszinkron keringés következtében. Ez szintén utalhat árapály-visszacsatolásra.



*A V2253 Oph ciklusai és az aktivitás változás a pályaperiódus függvényében*

Több évtized hosszúságú többszín fotometriai adatsorok a fokozott aktivitású foltos csillagok esetén azt mutatják, hogy a változás szélsőértékei közötti különbség akár egy teljes magnitúdó, vagy annál több is lehet. Ekkora változás túl nagy ahhoz, hogy kizárólag hideg foltok rotációs modulációjával illetve a foltok időszakos megjelenésével ill. eltűnésével meg lehessen magyarázni. Az IL Hya, az XX Tri és DM UMa három olyan óriáscsillag, amely hosszútávon igen nagy amplitúdójú változást mutat. A fényváltozások értéke 0,65-1,05 magnitúdó között van. (1 magnitúdó fényváltozás 2,5-szeres intenzitásváltozást jelent, amiből az következne, hogy a csillag átlaghőmérséklete többszáz fokkal változna). Kísérletet tettünk arra, hogy a nagymértékű változás eredetére magyarázatot adjunk, amelyhez az IL Hya esetén 42 év, az XX Tri esetén 28 év, míg a DM UMa

esetén 34 év hosszú többszín fotometriai adatsort használtunk fel. A rotációs moduláció során az effektív hőmérsékletek az IL Hya és az XX Tri esetén kb. 50-200K-t változtak, ami jól leírható a foltok okozta hőmérsékletkülönbségekkel. Ugyanakkor évtizedes időskálán a csillagok maximális fényessége (az adott időben a legkevésbé foltos állapot) a bolometrikus fluxusban nagy változást mutatott: ez 39% az IL Hya, míg 54% az XX Tri esetében.



*Az XXTri óriás fényváltozása, színindexváltozásai, V-Ic színindex ciklikussága, ami kimutatható a csillag rotációs modulációjának maximumaiban (legkevesebb folt) kapott átlaghőmérsékletében is.*

Ennek az óriási változásnak az IL Hya esetében a fele, míg az XX Tri esetében csak a harmada magyarázható a felszín átlagos hőmérsékletének változásával a foltok illetve fátklyamezők miatt. A DM UMa esetén a  $B-V$  színindex nem mutat semmilyen hosszútávú változást. A csillagok Hertzsprung-Russell diagramon olyan helyet foglalnak el, ahol elméletileg nem is lehetnének, mivel a mért luminozitásuk túl alacsony. Egy esetleges megoldás lehet a problémára a csillagok sugarának olyan lassú változása a mágneses ciklus alatt, ami színfüggetlen fényességváltozást okoz, azaz nem jár vele hőmérsékletváltozás. Az IL Hya esetében az általunk számolt sugárváltozás kb. 9%, amit a mért bolometrikus fényességből és a színindexből számolt effektív hőmérsékletekből kaptunk. A változás létét alátámasztják a csillagra vonatkozó független  $\nu \sin i$  mérések. A fényváltozásra vonatkozó egyéb esetleges magyarázatokat - változó sűrűségű csillagközi por, pulzáció, fejlődési effektusok - kizártuk.

## 4. A napaktivitás vizsgálata

### 4.1 Nap-csillag analógiák

A csillagaktivással kapcsolatos kutatásainkban a Nap mindvégig kiemelt szerepet kapott. A Nap aktivitásának ciklikus változása több időskálán történik. Emellett a Nap hatással van a földi életre is, ezért a napciklusok ismerete kiemelten fontos. Kézenfekvő, hogy a Nap ciklusait összehasonlítsuk a csillagokon talált ciklusokkal és a hosszútávú változásokkal.

A Nap változásai és azok következményei komplex jeleket produkálnak kozmikus környezetünkben. Legalább négy különböző ciklikus komponens figyelhető meg, amelyek időben változásokat is mutatnak. Ezen komplex változások felderítésére idő-frekvencia analízist használtunk. Az analízis során az idősorokban különböző tulajdonságokat találunk, mint frekvencia-felhasadás vagy modulációk, amelyek hasonlóan mutatkoznak meg a napfoltszám idősorában, a bolygóközi mágneses tér méréseiben és a földi klímára jellemző adatokban. A felhasznált pseudo-Wigner eloszlásban, mindhárom ciklikus komponensben (Gleissberg- és Schwabe-ciklus, és ez utóbbi fele, ami a ciklusok aszimmetriájából származik) felhasadást találtunk 1950 után. Ugyanez a felhasadás megtalálható a bolygóközi mágneses tér adataiban és a mikrohullámú rádiófluxusban,

valamint a földfelszíni adatok közül az armaghi (Észak-Írország) hőmérsékleti adatokban is. A globális óceáni hőmérséklet változásában pedig egy újabb periodikusság jelent meg a napaktivitás ciklusfrekvencia-felhasadásának idején. Eredményünk kapcsolatot igazol a Nap ciklikus változása és a földi időjárás között.

A Nap-aktív csillag analógiákat feltáró összehasonlító vizsgálatunkban különböző rotációs periódusú aktív csillagok, kis tömegű törpék és nagyobb óriáscsillagok ciklusainak időskáláit hasonlítottuk össze a Napról mért összkisugárzási adatok ciklusával és azok modulációival. Egy speciális adatsort használtunk erre a célra, amely évi egy-egy rekonstruált teljes napspektrumból áll, ezekből pedig származtathatók a Nap fényességének adatai azokon a hullámhosszakon, amik a csillagok fényességének mérésére használatosak. Ily módon nemcsak a ciklushosszak, hanem azok amplitúdói is összehasonlíthatók a Nap és más csillagok adatait felhasználva. A ciklusoknak többszörös időskálájuk van, és ezek az időben változnak is. Amennyiben az aktivitásban a (hideg) foltok dominálnak, több folt esetén a csillag vörösebb lesz, míg ha a fáklyamezők vannak többségben, akkor nagyobb aktivitás esetén a csillag kékebb lesz. A mérések szerint a Nap az előző csoporthoz tartozik, tehát nagyobb aktivitás esetén vörösebb.

## 4.2 A szoláris dinamó és részfolyamatainak modellezése

A napciklus a Nap tachoklínájában működő dinamó eredménye. Demonstráltuk korábban kifejlesztett gyors tachoklína-modellünknek a Nap-dinamó modelljeivel való összeegyeztethetőségét oly módon, hogy egy fluxustranszport-dinamó esetében a tachoklína vastagságát nem rögzítettük, hanem a mágneses tér függvényében változni engedjük. A számítást a Surya dinamó kód felhasználásával végeztük. A változást a gyors tachoklína-modell 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 jóslta – 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 szoláris szélességen vastagabbnak mutatkozott.

A Babcock-Leighton kinetikus fluxus-transzport dinamó segítségével vizsgáltuk a napaktivitásban megfigyelhető észak-déli aszimmetriát. A modell egy korábbi, Dikpati & Charbonneau (1999) által készített dinamó-modell továbbfejlesztése, amely a konvektív zóna teljes gömbhéjában működik. A modell fő komponensei: napszerű belső differenciális forgási profil, mélységfüggő diffuzivitás, és Babcock-Leighton-típusú poloidális forrástag. Célunk volt a napaktivitás mintázatában megfigyelhető észak-déli aszimmetria tanulmányozása, ha a poloidális forrástag különböző a két félteke között. A pillangó-diagram segítségével mutattuk be eredményeinket, ahol ábrázoltuk a toroidális tér eloszlását a tachoklínában, valamint a felszíni radiális mágneses teret, és összehasonlítottuk az észlelésekkel. Azt találtuk, hogy két féltekén működő dinamó „függetlennek” tekinthető egymástól - ha a Babcock-Leighton forrástag jóval gyengébb a déli féltekén az északihoz képest, akkor a déli féltekén működő dinamó egyre gyengébb és gyengébb lesz, míg az északi féltekén működő dinamót a déli félteke gyengébb dinamójának hatása nem befolyásolja.

Monte Carlo szimulációk segítségével szisztematikusan megvizsgáltuk a van der Pol-oszcillátor viselkedését abban az esetben, ha annak  $\mu$  csillapításához vagy  $\zeta$  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 paramétersíkokat és azonosítottuk azt a tartományt, ahol a napfoltszám a megfigyelthez hasonló viselkedést mutat. Nap-szerű viselkedésnek tekintettük azt, amikor (i) a napciklus felszálló ág meredeksége és a napciklus amplitúdója jó korrelációt mutatott, (ii) viszont a leszálló ág meredeksége és a ciklus amplitúdója között nem volt korreláció, és (iii) a ciklus hosszak és amplitúdók legalább 10%-os véletlenszerű szórást mutatnak. Egyedül a csillapítás perturbációja esetén nem találtunk ilyen viselkedést;  $\zeta$  3–4 éves időskálájú, kellően nagy amplitúdójú perturbációja esetén viszont a megfigyelthez hasonló napciklusokat kaptunk. Az eredmények hasznos megkötésekkel szolgálhatnak a szoláris dinamómodellek számára.

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 mágnesesített 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, amelyben 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 fotoszférájában mért mágneses fluxussűrűség felbontásfüggését, az ún. kioltási függvényt. A Hinode-űrobszervatórium magnetogramjai alapján más kutatók által végzett vizsgálatok azt mutatták, hogy a kioltási függvény jó közelítéssel hatványfüggvény. Célunk e megfigyelés elméleti értelmezése és annak alapján a turbulens mágneses tér jellemzőire vonatkozó következtetések levonása volt. 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. Monte Carlo szimulációk segítségével megerősítettük az analitikus modell következtetéseit és az elemzést kiterjesztettük az analitikus leírás érvényességi tartományán túlra is, arra az esetre ha a turbulens mágneses térben nem mutatkoznak koherens struktúrák.

### 4.3 A naptevékenység megfigyelésen alapuló vizsgálatai

A 23. napciklus leszálló ágában tanulmányoztuk három aktív vidék keletkezését. A 11024-es aktív vidékben nemlineáris erőmentes mágneses extrapolációt használtuk a 3D szerkezet rekonstruálására. Az extrapoláció csavarodottságot jelzett és jól mutatta a „tengerikígyó” formájú fluxuscsovek felemelkedését, amelyek mágneses átkötődés segítségével átrendeződve hosszabb korona hurkokat alakítottak. Ugyanebben az aktív vidékben a Hinode-űrobszervatórium mágneses tér és kromoszférikus Ca II H észlelések alapján felfedeztünk a fluxuscső tengerikígyó formájú áttörésének egy új megnyilvánulását a Nap felszínén: mindössze 2-4 Mm hosszúságú, ~12 perc élettartáú sötét hurkokat, amelyek ellentétes polaritású mágneses koncentrációkat kötnek össze.

2006. december 1-2. között új mágneses fluxus jelent meg egy már létező aktív vidékben. A Hinode/EIS spektrométer forró, gyors plazma kiáramlások megjelenését jelezte. 3D MHD szimulációt végeztünk, hogy tanulmányozzuk a fizikai folyamatokat, amelyek plazma kiáramlások keletkezéséért felelősek. A szimuláció azt mutatta, hogy a kölcsönhatás a felemelkedő és már korábban is létező mágneses terek között két fő csoportba volt sorolható: mágneses átkötődés és kompresszió.

A szoláris aktív vidékek, amelyeknek a Joy-szabálytól jelentősen eltérő egyenlítőhöz viszonyított dőlésszöge van (pl. azzal ellentétes irányú), a mágneses tér modellezői számára komoly kihívást jelentenek. Bár a Joy-szabálytól való jelentős eltérés viszonylag ritka egyszerű bipoláris aktív vidékek esetében, az eltérés okainak megértése a globális dinamo folyamat szempontjából kritikus lehet. Megvizsgáltuk annak a lehetőségét, hogy az felszín alatti lokális plazma mozgások felelősek az aktív vidékek rotációjáért. Meghatároztuk a felszín alatti plazma áramlások irányát egy kis bipoláris aktív vidék környezetében. Eszerint a felszín alatti vorticitást és a Joy-szabálytól való eltérést azonos irányúnak találtuk.

A Nap fotoszférájában felbukkanó erős ( $10^{21}$  -  $10^{22}$  Mx) mágneses fluxuscsovek feszült, csavarodott állapotban vannak. A csavarodottság fontos szerepet játszik abban, hogy a konvektív zóna aljáról a felemelkedő fluxuscsovek képesek legyenek túlélni a több-hetes útjukat, és főként, hogy a nyomukban keletkező örvények ne zilálják szét őket. A csavarodottság felismerése és mértéke a formálódó aktív vidék fler- és CME-aktivitása szempontjából is fontos, mivel az aktivitás során a mágneses térben levő feszültségekben elektromos áramok formájában tárolt energia szabadul fel mágneses átkötődések során. A mágneses csavarodottság felismerése vektor magnetogramokkal lehetséges. Viszont a teljes mágneses vektor redukciója munkaigényes feladat, így a megjelenő aktív vidék pár napos formálódása során nem áll rendelkezésre. A mágneses vektor látóirányú komponense viszont könnyebben mérhető, és gyorsan, automatikusan redukálható mágneses térképeket produkál, pl. SOHO/MDI és SDO/HMI, amelyek az interneten keresztül már néhány órán belül elérhetők. Ezekon a magnetogramokon is felismerhető a fotoszférát áttörő mágneses fluxusköteg csavarodottsága, mivel a spirálszerű kötegben az azimutális mágneses tér látóirányú komponense jellegzetes, kettős nyelv- (vagy csepp-) formát hoz létre. Ez a jellegzetes elrendeződés csak a felemelkedés néhány napja alatt van jelen. A csavarodottság vagy helicitás iránya egy pillantással felismerhető ilyen módon. A csavarodottság okozta mágneses polaritás-nyelveket tanulmányoztuk 40 keletkező aktív vidékben SOHO/MDI magnetogramok felhasználásával. Kimutattuk, hogy a polaritás-nyelvekből kapott helicitás iránya és a más észlelésekből meghatározott helicitás iránya tökéletes egyezést mutat, így a polaritás-nyelvek a helicitás közelítéseként vehetők figyelembe. Egy egyszerű fél-tórusz modellel vizsgáltuk a különböző mértékű csavarodottság hatását a polaritás-nyelvek formájára és a polaritás-elválasztó vonal irányára. Kimutattuk, hogy nagyobb helicitás megnyúltabb polaritás-nyelveket és a Nap egyenlítőjével párhuzamosabb irányú polaritás-elválasztó vonal irányt eredményez. Azonban mivel az aktuális fluxuscso alakja befolyásolja a kialakuló polaritás-nyelveket, pontos analitikus helicitás-meghatározás a polaritás-nyelvekből sajnos nem lehetséges.

A Hinode/EIS spektrométer leghosszabb folytonos megfigyelési sora alapján az AR 10978 szoláris aktív vidék pereméről kiinduló gyors plazma áramlásokat vizsgáltuk. Kimutattuk, hogy a plazmaáramlások megfigyelt fejlődése kizárólag vetületi hatásoknak tulajdonítható. A napkorong középpontjától való távolságtól függő szisztematikus sebességváltozásokból levezettük a plazmaáramlások 3D geometriáját. Mágneses extrapolációkkal megegyezésben kimutattuk, hogy a plazmaáramlások leggyezőszerű vékony rétegek, amelyek ún. kvázi-szeparátrix rétegekben (QSL) gyökereznek, és a helyi merőlegeshez képest különböző dőlésszöggel hajlanak az aktív vidék központjától kifelé. A sebesség maximumok és a nemtermális sebességek eloszlása alátámasztja korábbi eredményünket, miszerint a plazma áramlásokat a QSL-ek mentén mágneses átkötődések keltik, amelyek nagy sűrűségű aktív vidék koronahurkokat és alacsony sűrűségű környező koronahurkokat összekapcsolván sűrűség-gradienst hoznak létre. A plazmaáramlásokat ez a sűrűség-gradiens hajtja a mágneses erővonalak mentén. Bármely adott időpontban a korábbi

átkötődések szuperpozícióját észleljük, ezért van a sebességeknek olyan széles diszperziója.

A Hinode-űrobszervatórium spektrális észleléseinek felhasználásával nagy térbeli felbontású koronális elemgyakoriság térképet készítettünk. A  $359'' \times 485''$  területű térkép egy koronalyukba beágyazódott aktív vidéket mutat, és az első ionizációs potenciál (FIP) bias szintjeit, azaz a fotoszférikus gyakoriságtól való eltérést, mutatja különféle korona struktúrákban. Mindent összevetve a FIP bias szintek ebben a kicsi, viszonylag fiatal aktív vidékben alacsonyak, 2 és 3 között vannak. Ez a mérsékelt FIP bias érték az aktív vidék korának, a gyenge koronafűtésnek, és a környező koronalyuk nyitott mágneses terével való gyakori átkötődésnek tulajdonítható. A jellegzetes koronális elemgyakoriságú területek a koronahurkok talppontjai körül találhatóak, mint várható is, hiszen az alacsony és magas FIP-értékű elemek viszonylagos gyakoriságának megváltozása az elképzelések szerint a kromoszférában játszódik le. Az aktív vidékben viszonylag jó korrelációt találtunk a nemtermális sebesség és mágneses fluxussűrűség között – mindkettő a legmagasabb a koronahurkok talppontjai közelében. Nagyobb FIP bias értékeket találtunk ellentétes mágneses polaritásokat összekötő koronahurkok mentén, amelyet a magasabb talppontok körüli FIP bias kezdődő keveredésének tulajdonítottunk. Az inverziós vonal menti filament csatornában talált alacsony (fotoszférikus) FIP bias értékek az ott folytonosan végbemenő mágneses kioltásnak tulajdoníthatók és alacsonyan fekvő „kopasz foltra fésült hajra” emlékeztető erővonal-szerkezet jelenlétére utalnak.

Plazma kiáramlásokat tanulmányoztunk egy aktív vidékben, koronalyuk környezetében. Azt tapasztaltuk, hogy a Hinode/EIS műszerrel mért sebességek 50%-kal nőttek egy koronakitörés (CME) előtt. 3D MHD szimuláció alapján a plazma kiáramlás erősödését a koronakitörés előtt az aktív vidék növekvő szabad energiái következtében végbemenő expanzióknak és az ebből eredő erősödő kompresszióknak tulajdonítottuk. Lényegében tehát egy új típusú jelenséget találtunk a CME-k előrejelzésére.

A RHESSI (Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager) a felbocsátása, azaz 2002. február 12. óta több mint 80000 szoláris eredetű nagyenergiájú fler-eseményt észlelt. Ennek a nagyszámú flermintának köszönhetően lehetőség nyílt a tér- és időbeli kapcsolatok vizsgálatára az egymást követő események között. Eredményeink azt mutatják, hogy statisztikai kapcsolat van az egymást követő flerek tér- és időbeli elhelyezkedésében, amely egy hatványfüggvény segítségével írható le. Erre több lehetséges magyarázatot is kifejtünk, köztük azt az esetet is, amikor a következő esemény a kiváltó esemény által keltett lökéshullámot követő Sedov-Taylor fázisban következik be, máskor pedig a térbeli és időbeli kapcsolatot az egymást követő flerek között egy szubdiffúziós rendszer biztosítja. Ugyanakkor nem zárhatjuk ki annak a lehetőségét sem, hogy a statisztikai összefüggés mögötti fizikai folyamat oka a flerben bekövetkező mágneses tér átrendeződése, vagy akár egy eddig ismeretlen fizikai folyamat.

A jelentősen csavarodott fluxuscsovek helicitását a belső csavarodottság és tengelyük helikus deformációjának összege adja, amelyek egymásba átalakulhatnak, de összegük még mágneses átkötődéskor is változatlan marad. A belső csavarodottságot közvetlenül nem tudjuk mérni, ezért érdekes kérdés, hogy vajon az erupció kezdetekor létrejövő helikus deformáció (writhe) mértékéből meghatározható-e. MHD szimulációk segítségével, a kezdeti csavarodottság mértékét változtatva azt találtuk, hogy a  $6\pi$  alatti csavarodottság értékekre, amelyek a napon szokásosak, a writhe szaturálódik, így értékéből az erupció előtti belső csavarodottságra csak felső határt lehet megadni.

Egy protuberancia erupciót, flert, és korona kitörés tanulmányoztunk, amely 2006. július 6-án történt a NOAA 10898-as aktív vidékben. A protuberancia egy domináns nagy napfolt közelében, attól délre helyezkedett el. Az erupciót megelőző fejlődés során és még egy ideig azt követően is, a napfolt mintegy 30 fokos rotációt mutatott. Feltételeztük, hogy a napfolt rotációja okozta az erupciót, mivel a rotáció fokozatosan kiterjesztette (vagyis gyöngítette) a protuberancia fölötti stabilizáló mágneses teret. A feltételezés tesztelésére zérus- $\beta$  MHD szimulációt fejlesztettünk ki, amelyben a protuberanciát képviselő csavarodott fluxuscso fölött kezdetben potenciális stabilizáló teret forgattunk. Először egy egyszerű, szimmetrikus rendszer viselkedését tanulmányoztuk, majd a

megfigyelt konfigurációhoz hasonló, komplikáltabb, aszimmetrikus esetet. Azt találtuk, hogy mindkét esetben a rotáció a stabilizáló mágneses terek kiterjedéséhez vezet. Ennek következtében a terek feszültsége csökkent, ami a csavarodott fluxuscső lassú emelkedését eredményezte. Amint a terek feszültsége eléggé lecsökkent, a fejlődés második (instabil) fázisába lépett, amelyet nagy gyorsulás jellemzett. A szimulációnk egy új CME-keltő mechanizmus lehetőségét demonstrálta forgó napfoltok közelében.

Kifejlesztettünk egy új módszert az eruptív protuberanciák oszlopsűrűségének meghatározására a Solar Dynamics Observatory Advanced Imaging Assembly (SDO/AIA) csúcsminőségű űradatainak felhasználásával. A számos hullámhosszon csaknem egyidejűleg készült SDO/AIA fevételeken a fotoionizációs kontinuum opacitást felhasználva meghatároztuk a protuberancia anyagban a hidrogén térbeli eloszlását. Ez az új „polikromatikus opacitás leképzés” módszer egy viszonylag egyszerű lehetőséget kínál a részben ionizált anyag követésére, ahogyan az az erupció során a Nap légkörében felfelé mozog. A meghatározott sűrűség értékek az erupciós modellek számára adnak információt a tényleges sűrűségeloszlásról. Az új módszert a 2011. június 7-i látványos protuberancia robbanásra (CME-re) alkalmaztuk. Méréseink azt mutatják, hogy a napfelszínre visszahulló protuberancia csomók szokatlanul sűrűek, és esésük közben újra és újra mágneses Rayleigh-Taylor instabilitáson mennek keresztül. Az utóbbi jellegzetes térbeli jellemzőiből meghatároztuk a plazmacsomókban levő mágneses tér erősséget, amire 1 G-os értéket kaptunk. Mivel a napkoronában a mágneses térerősség közvetlenül nem mérhető, így ez az eredmény kiemelt fontosságú.

A 2011. június 7-i látványos protuberancia robbanás (CME) során SDO/AIA észlelések egy kifényesedést mutattak a kiterjedő CME és egy szomszédos aktív vidék találkozásánál. MHD szimulációval és mágneses topológia modell alapján bebizonyítottuk, hogy a CME mágnesesen átkötődött a szomszédos aktív vidék mágneses terével, és a kifényesedés az átkötődési régió körüli in situ plazmafűtés eredményeként jött létre.

A 23. napeciklus utolsó jelentős aktivitását produkáló NOAA 10930-as számú aktív vidéket vizsgáltuk különös tekintettel a két nagy korona kitorést (CME-t) követő változásokra az aktív vidékben és annak környezetében hat napon keresztül, 2006. december 11-15. között. A 13. és 14-én megfigyelt CME-k jelentős ún. „korona elsötétüléshez” (coronal dimming) vezettek, amelynek fejlődését a Hinode/EIS spektrográfjával nagy részletességgel tanulmányoztuk. Az anyagkidobás következtében létrejövő korona elsötétülés az aktív vidéktől nagy távolságra (kb. 300 000 km) is megfigyelhető volt, és a spektrális képeken jelentős Doppler-kékeltolódás jelent meg egy kb. 155 millió km<sup>2</sup> területen. Az anyagkiáramlás sebessége a CME-ket követően volt a legjelentősebb, helyenként megközelítvén a 100 km/s-ot, és a következő órák során fokozatosan csökkent. A Doppler-kékeltolódás nem egyenletesen, hanem „csomókban” jelent meg, mágneses koncentrációk közelében (SOHO/MDI), amelyek hatalmas koronahurkok talppontjainak bizonyultak. Ezek a koronahurkok mágnesesen átkötődtek a CME mágneses terével és átmenetileg „kinyíltak” a bolygóközi tér irányába. A létrejövő nyomáskülönbség vezetett az anyagkiáramláshoz. A CME-ket követően a korona mágneses tere rekonfigurálódott, relaxálódott és a nagy koronahurkok újra megjelentek – ezúttal azonban már Doppler-vöröseltolódás mutatkozott a hurkok mentén, amely a plazma hűlését és ennek következtében lefelé áramlását jelezte.

Felhasználva a naptevékenységi minimum nyújtotta viszonylag egyszerű mágneses struktúrát, Hinode, SOHO, STEREO és ACE adatok és mágneses tér modellezés kombinálásával vizsgáltuk a lassú napszélnyalábok forrásait. A vizsgált időpontban két koronalyuk között két aktív vidék volt a Nap egyenlítője közelében. A bolygóközi térben a korona lyukakból eredő gyors napszélnyalábok között lassú napszélnyalábok voltak jelen. A kérdés, hogy az aktív vidékből kiáramló plazma vajon kijut-e a bolygóközi térbe, vagyis tekinthető-e a lassú napszélnyaláb forrásának. Mágneses modellezéssel kimutattuk, hogy egyes plazmaáramlások zárt mágneses erővonalak mentén történnek, míg mások elérik a napszél ún. forrás-felszínét, tehát a napszélbe folyhatnak. A két aktív vidékhez köthető lassú napszélnyalábok hőmérsékletben, sebességben és kémiai összetételben is

különböztek, amit szintén a mágneses szerkezettel és az aktív vidékek korkülönbségével magyaráztunk. Ezzel a vizsgálattal kimutattuk, hogy aktív vidékekből kiinduló bizonyos plazmaáramlások valóban a lassú napszél forrásai. Következő lépésként megvizsgáltunk egy magányos bipoláris foltcsoportot, amely a globális mágneses tér modellek szerint teljes mértékben a zárt-tér tartományban volt, egy nagy „helmet streamer” alatt. Ennek ellenére azonosítottunk egy lassú napszélnyalábot amely az aktív vidékből kiáramló plazmanyalábokkal azonos összetételű és ion-arányokat mutatott. Részletesebb mágneses modellből kimutattuk, hogy az aktív vidékből a plazma több lépéses mágneses átkötődési folyamat során kerül a bolygóközi tér felé nyitott mágneses erővonalakra, és így találja meg az utat a napszélbe.

A Napból érkező nagyenergiájú részecskék (SEP) eredetét vizsgáltuk a 2007. január 24-én történt észlelések (Hinode XRT/EIS, SOHO MDI/EIT/LASCO, RHESSI, TRACE, STEREO EUVI, WIND WAVES, ACE EPAM) és mágneses tér modellezés felhasználásával. A SEP eredete régóta vitatott. Kérdés, hogy a részecske gyorsítás a Nap alsó koronájában mágneses átkötődés során vagy a bolygóközi térben a koronakitörések (CME) által keltett lökeshullám frontban történik. Vizsgálatainkból megmutattuk, hogy a SEP forrása egy nagyenergiájú röntgensugárzást produkáló fler és jet volt, nem pedig a lassú CME. A kitörést kísérő 295 km/s sebességű CME eleve túl lassú volt ahhoz, hogy részecskéket gyorsító lökeshullámot keltsen.

A 23. napciklus volt a „Modernkori Nagy Maximum” utolsó ciklusa, amelyet az elmúlt száz év legmélyebb napaktivitás minimuma követett 2009-ben. A 24. ciklus az előzőnél 40%-kal alacsonyabb napfoltszámokat produkált, amelyet a magas diffúziót alkalmazó fluxustranszport dinamó modellek jól előre jeleztek. A napciklus átalakulásának időszakában – kihasználva a viszonylag egyszerű mágneses struktúrát – a napaktivitás különféle megnyilvánulásait vizsgáltuk, így egyebek között az aktív vidékek keletkezését, fejlődését, helicitását, a plazma kompozícióját, az aktív vidékekből kiáramló plazmanyalábok eredetét és tulajdonságait, a flereket, a CME-ket, a napkitörések során gyorsított részecskéket, valamint a lassú napszél eredetét. Vizsgálataink fontos eredményekkel szolgáltak a napaktivitás jelenségkörének átfogó értelmezéséhez. Az ilyen eredmények a napaktivitás-csillagaktivitás analógiákat felhasználva segítenek közelebb jutni a csillagaktivitás nyitott kérdéseinek megválaszolásához.