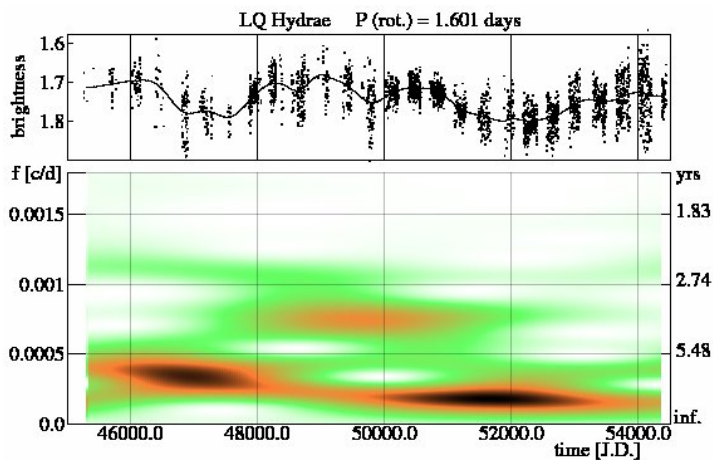


A Nap és csillagdinamók éves időskálájú változásai

A pályázat ideje alatt a mágneses dinamó éves időskálájú változásait vizsgáltuk elsősorban. Eközben eredményeket kaptunk a dinamó működésének megfigyelhető jegyeire rövidebb időskálákon is, amelyeket később felhasználhatunk további hosszútávú vizsgálatainkhoz. Az új megfigyelési anyag a terv szerint fotometria és spektroszkópia volt, melyet teljesítettünk.

Aktív csillagok és a Nap ciklusaival kapcsolatos eredmények

A Nap fotoszféráján mutató aktivítási ciklusok, mint a ~11 éves Schwabe és a ~80 éves Gleissberg ciklus, melyek pl. a napfoltok által követhetők, az időben folytonos változást mutatnak. Ebből kiindulva analizáltuk 20 aktív csillag rendelkezésre álló hosszútávú adatsorát. 14 csillag esetén a fotoszféra foltosságát mutató fotometriai, 6 csillagra pedig a kromoszférára jellemző Ca index mérések álltak rendelkezésünkre. Kifejlesztettünk egy módszert, mely kezeli az éves adathiányokat és spline-interpolációval-simítással lehetővé teszi egy ekvidisztans adatsor képezését az idő-frekvencia analízishez. A csillagok rotációjából eredő rövid időskálájú fényváltozást is kiszűrtük az adatokból.

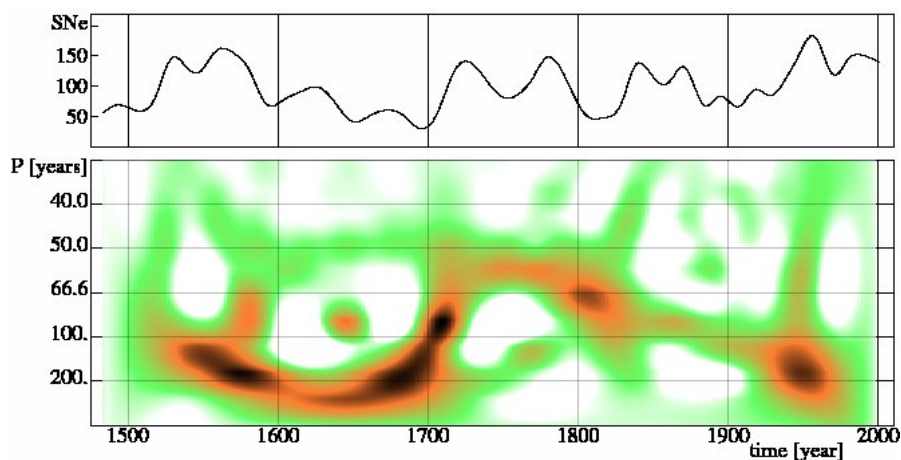


Az LQ Hya ciklusainak időbeli változása

A 20 csillag közül 15-nek kimutathatóan többszörös ciklusai vannak, a fennmaradók esetében a rendelkezésre álló adatsorok túl rövidek ahhoz, hogy több ciklust is kimutathassunk. A meghatározott ciklusok általában változnak az időben, három esetben pedig a két-két ciklus párhuzamosan változik, ami a ciklusokat előidéző dinamó mechanizmus azonosságára utal ezekben az esetekben.

Bemutattuk, hogy az utóbbi 250 év alatt hogyan változott a Nap 11 éves ciklusa az időben. Az utóbbi 500 év alatt a Nap hosszú, Gleissberg ciklusa is állandóan változott: 1700 körül hirtelen lecsökkent a periódusa 50 évre, azóta viszont folyamatosan nő, és mára a 200 éves ciklushossz környékén tart már. Az eredmények szükségessé teszik a ciklushossz fogalmának újraértelmezését, és megfigyelési megszorításokat ad a dinamóelméleti számításokhoz.

A budapesti automatizált 60cm távcsővel 2005-2008-ban 4-színfotometriai méréseket végeztünk az ultragyorsan rotáló (P=0.459 nap) EY Dra dM1-2e típusú törpecsillagról. A mérések és modellek flareket és hosszú időn keresztül is stabil foltokat mutattak ki a csillag kromoszférájában és fotoszférájában. A csillag fényessége egy ~300 napos aktivítási ciklusban is változni látszik, amely az egyik legrövidebb észlelt aktivítási ciklus. A csillagról spektroszkópia és fotometria is készült a projekt résztvevője által, a Nordic Optical Telescope-al (La Palma, Spanyolország), melynek kiértékelése folyamatban van.



A Gleissbeg-ciklus változása a Napon az utóbbi 500 évben.

Tanulmányoztuk a lehetséges kapcsolatokat a Napon megfigyelhető aktivitási mutatók és a tachoklínában megfigyelt periódikus ingadozások között, ahol vizsgálataink alapján feltételezhető egy szorosabb kapcsolat a tachoklína és a felemelkedő fluxushurkok között. A napaktivásra vonatkozó különböző adatsorokat (mágneses térképek, napfolt relatívszám, fler index, raádiófluxus, bolygóközi mágneses tér, protonsebesség a napszélben) analizáltunk, és közepes időskálájú változásokat kerestünk. Új megközelítésként a mágneses polaritás összefüggéseire koncentráltunk és új mértékeket definiáltunk, mint például a mágneses pozitív-negatív polaritás aszimmetriát. Eredményképpen 1-2 éves periodicitásokat találtunk, mely csaknem minden adatsorban megtalálható, kivéve koronaindexet és a rádióméréseket. Ezek esetében megjegyezzük, hogy az adatok a Nap teljes koronájára vonatkoznak, azaz a mérések úgy készültek, mint egy csillagról. Emellett az utóbbi 10 évben felhalmozódott helioszeizmikus adatok lehetővé tették azt is, hogy tanulmányozzuk a rotációs ráta ingadozását a tachoklína környezetében. Továbbá tanulmányoztuk a lehetséges közös eredetet és az esetleges kapcsolatokat a különböző aktivitási jegyek közt, és azok kapcsolódását a differenciális rotációval.

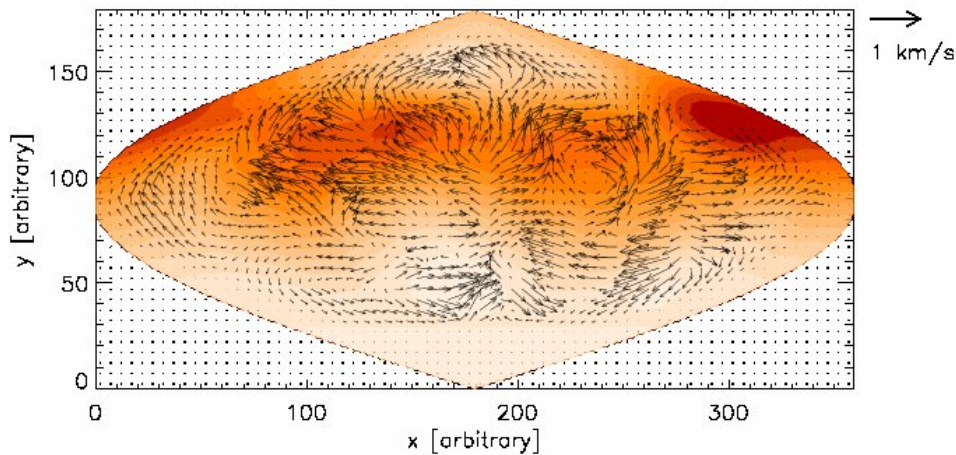
Flip-flop jelenség egy csillag mágneses aktivitásában

Az FK Com idősoros foltmodellezését végeztük el fotometriai adatokra, amelyek 1987-2004 között készültek, hogy nyomonkövessük a foltok hosszúságának időbeli változását. Megállapítottuk, hogy a fényváltozást okozó két folt a csillag két féltekéjén felváltva, de együtt található, emiatt a fényváltozás minimuma hol 0, hol 0.5 fázisnál van. A csillagon még egy foltot feltételeztünk a póluson, mely nem okoz rotációs modulációt. Az idősoros modellek segítségével nyomonkövettünk egy ún. flip-flop jelenséget 1999-ben. A fényváltozást okozó két folt, amelyek egymáshoz közel 180 fokra voltak, gyakorlatilag eltűntek, majd új foltok jelentek meg: az egyik az előbbi helyén, a másik pedig mintegy 90 fok hosszúsággal elcsúsztatva, ilymódon az aktivitás súlypontja átbillent a csillag másik féltekéjére. Hasonló jelenség a fázisugrás, egy ilyet 1997-ben figyeltünk meg. Ekkor a két folt egyre közelebb került egymáshoz, majd vagy összeolvadtak, vagy az egyik eltűnt. Mintegy 100 fok hosszúsággal odébb egy új folt jelent meg, de az aktivitás súlypontja nem váltott féltekét. Ezek a vizsgálatok a csillagok mágneses aktivitásának elméleti megfogalmazásához nyújtanak megfigyelési alapokat.

Csillagok differenciális rotációja

A torzult geometriájú csillagok Doppler-leképezésének kidolgozása egy fontos feladat. A zeta Andromedae szoros kettőscsillag óriás komponense elliptikussága és felszíni foltjai miatt is érdekes. Többszín-fotometriai adatok felhasználásával foltmodellező eljárásunk segítségével meghatároztuk a kettőscsillag rendszerparamétereit, majd az óriás komponens felszínét Doppler-leképezés segítségével vizsgáltuk. Négy rotációs ciklust lefedő Doppler-képsorozat segítségével nyomonkövethetővé vált a felszíni struktúrák időbeli változása. A felszíni hőmérséklettérképek rekonstrukciója során új eljárást dolgoztunk ki, mely figyelembe veszi a szoros kettősség miatt torzult geometriát.

A differenciális rotációt más foltos csillagokon tanulmányoztuk: idősoros Doppler-képekből saját fejlesztésű keresztkorrelációs technikával (ACCORD) több csillagon sikerült felszíni differenciális rotációt kimutatni. Az LQ Hydrae Nap-típusú törpecsillagon a Napéhoz hasonló differenciális rotációt találtunk, szintén szoláris differenciális rotációt detektáltunk a zeta Andromedae, valamint az EI Eridani felszínén. A szolárisal ellentétes (antiszoláris) differenciális rotációt találtunk az RS CVn-típusú UZ Librae és sigma Geminorum felszínén. Hasonló eredményre vezetett egy napfizikából csillagokra adaptált eljárás, az LCT (Local Correlation Tracking), mellyel a sigma Geminorum esetében az anti-szoláris differenciális rotáció mellett egyértelmű pólus felé irányuló meridionális áramlást is kimutattunk. A meridionális áramlás az antiszoláris differenciális rotációt magnetohidrodinamikai elméletének első észlelési bizonyítéka.



Idősoros Doppler képek felhasználásával rekonstruált plazmaáramok a sigma Geminorum felszínén

Egyéb, járulékos eredmények aktív csillagokról

2007-2008 folyamán rendszeresen végeztünk többszínfotometriai méréseket a piszkástetői 1m-es RCC teleszkóppal, fél nap körüli periódussal rendelkező aktív törpecsillagokról. A méréseket tovább folytatjuk. Az első eredmények a V405 And fedési változóról várhatók, kezdeti eredményeinket már bemutattuk egy konferencián, a folyóiratcikk, spektroszkópiai adatokkal kiegészítve a fotometriát, most készül. Sikerült különválasztani a fedési és közelségi effektusokat a csillagfoltok által okozott fényváltozástól, és ezeket külön-külön is modellezni. Több flert és kitörést is sikerült megfigyelni és analizálni. A V405 And különösen érdekes objektum, mivel a két késői (M típusú)komponense nagyon

különbözik, az egyik (M0V) kb. fél naptömegnyi, a másik (M5V) mindössze 0.2 naptömeg, azaz a nagyobbik csillag fölötté, míg a kisebbik alatta van a teljes konvekcióra vonatkozó tömeghatárnak.

Az LQ Hya H-alfa spektrumai alapján feltérképeztük a csillag kromoszféráját. Sikerült egyértelmű kapcsolatot találni a korábban Doppler-technikával optikai vonalakon rekonstruált fotoszférikus foltok és az UV spektrumvonalakból rekonstruált kromoszférikus fáklyamezők között, tovább erősítve a Nap-aktív csillag analógiát. Hasonló eredményre vezetett a V861 Herculis és az EQ Tauri kontakt kettőscsillagok optikai és H-alfa fotometriai észleléseinek feldolgozása: a sötét foltoknak megfelelő helyeken H-alfa intenzitásnövekedést tapasztaltunk.

Egy óriás csillagfler észlelés analízisét végeztük el egy igen halvány ($m_v = 21.38$) törpecsillagon. Megbecsültük a teljes fler energiát (közelítőleg 10^{35} erg), ez alapján a flert a valaha észlelt legnagyobb csillagflerek közé sorolhatjuk. Sikerült magyarázatot adni a fler hűlési fázisában tapasztalt három további gyenge fler-eseményre, melyet a Napon megfigyelt hasonló jelenségből vezettük le.

Pulzáló változók fénygörbéjének változásai

A budapesti automatizált 60 cm-es távcsővel készített hosszú többszín-fotometriai adatsort analizáltuk a három radiális módusban pulzáló V823 Cas változócsillagra (ez igen ritka jelenség). A kapott periódusok és periódusarányok nincsenek összhangban a pulzációs és fejlődési modellekkel, melyet úgy magyaráztunk, hogy a V823 Cas periódusai rezonancia hatására átmeneti állapotban vannak, és így nem tükrözik megfelelően a csillag valóságos paramétereit.

Ugyancsak budapesti mérések alapján az eddig ismereteknél rövidebb periódusú és kisebb amplitúdójú modulációt találtunk az RR Gem és SS Cnc változóknál. Mivel méréseink több színben készültek, a Blazhko-ciklus alatti színváltozást is kimutattuk.

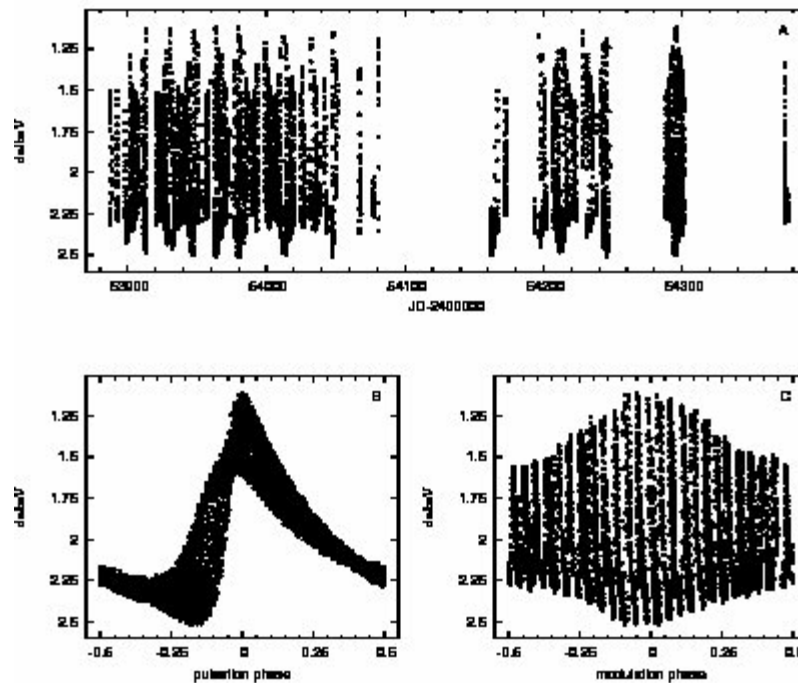
Az RR Gem jelenleg kis amplitúdójú modulációt mutató Blazhko-változó korábban publikálatlan archív fotometriai méréseinek feldolgozásával kimutattuk, hogy a csillag fényváltozása minden megfigyelési időszakban modulációt mutatott. A moduláció amplitúdója azonban jelentős mértékben eltérő volt, az RR Gem nagy amplitúdójú, komplex amplitúdó- és fázismodulációt mutatott az 1930-as években, míg modulációja a fotografikus méréseknél sokkal pontosabb 1960-1970-es években készült fotoelektromos mérésekben alig volt megfigyelhető. Ellenőriztük és kijavítottuk az RV UMa korábban publikált fotometriai adatait, a javított, kiegészített adatsor Fourier-analízise eredményeként először mutattunk ki kvintuplet-szerkezetet egy Blazhko-effektusos csillag spektrumában. A kvintuplet-frekvenciák kimutatása a jelenség máig ismeretlen magyarázatának megtalálásához adhat támpontot. Vizsgáltuk mind az RV UMa, mind az RR Gem pulzációs és modulációs tulajdonságainak változása közötti összefüggéseket.

A rövid periódusú ($P < 0.5$ nap) RRab csillagok CCD-fotometriai vizsgálata során kimutattuk, hogy az UZ UMa alpmódusban pulzáló csillag Blazhko-effektussal rendelkezik, mégpedig két, 26.7, és 143 napos modulációs periódussal.

Elvégeztük az MW Lyr, nagy modulációs amplitúdójú Blazhko-csillag 2006-2007-ben a 60 cm-es távcsővel végzett kiterjedt többszínfotometriai méréseinek feldolgozását és elemzését. Jelenleg ez az eddig publikált legkiterjedtebb többszín-fotometriai adatsor Blazhko-változóra, mely mind a pulzáció,

mind a moduláció minden fázisát lefedi (ábra). A fényváltozás Fourier-felbontása az ismert triplet-szerkezeten túl kvintuplet- és szeptuplet-komponensek jelenlétét is mutatja. Modulációs frekvenciákat találtunk továbbá 12.5 c/d frekvencia-szeperációval is. Azonban az összes detektált frekvencia sem írja le a csillag fényváltozását a megfigyelés várható pontosságával. A fénygörbe minimum-felszállóág-maximum fázisaiban tapasztalható nagy reziduált valószínűleg sztochasztikus, kaotikus folyamatok magyarázzák.

Kapcsolatot találtunk a Blazhko-effektusos csillagok modulációjának amplitúdója, illetve frekvenciája és a pulzáció frekvenciája között. Meghatároztuk 43 RR Lyr csillag Blazhko-periódusát az ASAS adatbázis alapján. A Blazhko-effektusos csillagok listáját áttekintettük, és újabb mérésekfelhasználásával, illetve régi adatok felderítésével módosítottuk a listát.



Az MW Lyr pulzációjának és modulációjának változása

Kifejlesztettünk egy inverz fotometriai módszert (IPM) az alaplódusú RR Lyrae csillagok pulzáció során bekövetkező luminozitás-, hőmérséklet-, sugárváltozásának csupán többszín-fotometriai adatsorokból atmoszféramodell-számítások eredményeinek felhasználásával történő meghatározására. Az eljárás modulálatlan RRab csillagok esetében hasonló pontosságú eredményt ad, mint a radiálissebesség-mérések felhasználásával alkalmazott direkt Baade-Wesselink-módszerek. Blazhko-változók esetében azonban, tekintve, hogy megfelelően kiterjedt radiálissebesség-mérés - amely az egész pulzációs változást a moduláció minden fázisában lefedné - mérésigénye miatt sem ma, sem a belátható jövőben nem lesz elérhető, jelenleg az IPM az egyetlen lehetőség a fizikai paraméterekben a moduláció során bekövetkező változások nyomon követésére. Az általunk kifejlesztett inverz fotometriai eljárás alkalmazásával a több hullámhosszon végzett méréseink alapján először sikerült kimutatni, hogy milyen változások történnek egy Blazhko-csillag átlagos fizikai paramétereiben (luminozitás, hőmérséklet, sugár) a moduláció során.

Módszerünket eddig két, egy nagy és egy kis modulációs amplitúdójú Blazhko-változó általunk készített fotometriai adatsorára alkalmaztuk. Mindkét csillagnál változást tapasztaltunk a moduláció során a csillag átlagos sugarában, luminozitásában és felszíni hőmérsékletében. A moduláció megfigyelt amplitúdójának arányában, a nagy modulációs amplitúdójú MW Lyrae esetében a változás 1-2%-nyi, míg a kis modulációs amplitúdójú DM Cygni esetében csupán néhány tized százaléknyi. Ez az első olyan részletes eredmény, ami Blazhko-csillagoknál a fénygörbe változásán túl, a csillagban a moduláció során bekövetkező változásokra mutat. Amennyiben a fázismodulációt periódusváltozásként értelmezzük, mindkét csillagnál a megfigyelt periódusváltozás mértéke megegyezik a pulzációs egyenlet alapján a kimutatott sugárváltozás szerint várható periódusváltozás mértékével. Eredményeink azt mutatják, hogy ezek a csillagok akkor, amikor pulzációjuk amplitúdója nagy, valamivel nagyobbak, hűvösebbek és fényesebbek, mint mikor pulzációjuk amplitúdója kicsi.

Egyéb eredmények pulzáló változókról

Publikáltuk 16 stabil fénygörbéjű RR Lyrae csillag többszín fénygörbéjét.

Az AD CMi nagy amplitúdójú delta Scuti csillag periódus változását folytonos periódusnövekedés valamint kettősség feltételezésével modelleztük, az eredményt publikáltuk.

Korábbi szerzők a GP And változónál kétmódusú pulzációt véltek felfedezni, továbbá irregularitásokat találtak a fénygörbén. Fotoelektromos fotometriai és CCD méréseink szerint a csillag szabályosan pulzáló HADS (high amplitude delta Scuti) és lassú periódusnövekedést mutat. A csillag közeli kísérővel rendelkezik, a fotometriai defektusok magyarázzák a korábbi hibás interpretációkat.

Napfizikai eredmények

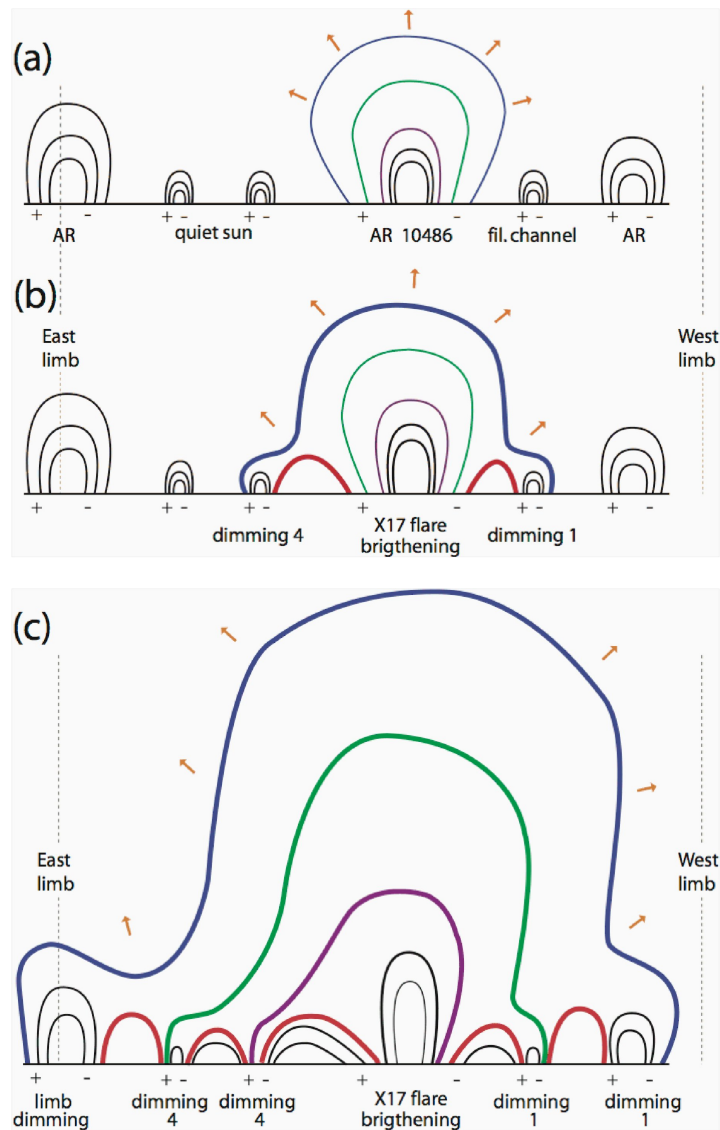
Napfizikai kutatásainkban elsősorban a koronakitörésekkel (CME) foglalkoztunk.

Tanulmányoztuk a CME kezdeti filament erupciója során a filament elfordulását, amely a mágneses tér jelentős csavarodottsága következtében létrejövő kink instabilitás következménye és számos esettanulmány alapján szabályt állapítottunk meg az elfordulás iránya és az aktív vidék helicitása között, amelyet numerikus MHD szimulációval is alátámasztottunk.

Kidolgoztunk egy új modellt a koronakitöréseknek a napkoronában való fejlődésére. Mivel a koronakitörések táguló mágneses "buborékok", és a Nap koronája tele van különféle orientációjú mágneses terekkel, a CME-k kölcsönhatnak és mágnesesen átkötődnek, ha ellentétes irányú mágneses erővonalakkal találkoznak tágulásuk során. A mágneses átkötődések sorozata energiefel szabadulással jár, ami a koronában egy táguló fényes gyűrűként jelenik meg. Ilyen gyűrűket valóban látunk a koronában (EIT waves), amelyeket általában MHD hullámoknak tulajdonítanak, bár több tulajdonságuk a hullám értelmezéssel megmagyarázatlan marad. Az általunk javasolt új modell ezekre a jelenségekre (pl. hogy a CME nyílásszöge azonos az EIT hullámok kiterjedésével, vagy hogy a korona a CME alatt nagy területen elsötétül) természetes magyarázatot szolgáltat. A fenti modellt sikeresen alkalmaztuk egy csillagfler leszálló ágában megjelenő kisebb flerek magyarázatára. A mágneses átkötődés a CME és környező nagy-léptékű mágneses struktúrák, pl. aktív vidékek és filament csatornák között ezeket a mágneses tereket a táguló CME részévé teszi. A táguló erővonalak mentén a napkorona anyaga kiáramlik, lecsökkentvén a korona sűrűségét, így a korona elsötétül. Az új modellt alkalmazva az egyik

legnagyobb eddig észlelt CME-re (2003 október 28) sikeresen magyarázatot szolgáltatunk a napkorong mintegy egyharmadát beborító korona elsötétedés eredetére.

A mágneses átkötődés a CME és környező mágneses struktúrák, pl. az interplanetáris tér felé nyitottnak tekinthető korona struktúrák között a magasabb koronában is létrejöhet, amely speciális hosszú hullámú rádió kitörés segítségével diagnosztizálható. Ha a CME egy koronalyuk nyitott mágneses terével találkozik és kötődik át, az a CME mágneses terét részlegesen nyitottá teheti, amely a bolygóközi térben végzett elektronáramlási mérésekkel is kimutatható.



A mágneses átkötődés a táguló CME és környező nagy-léptékű mágneses struktúrák, pl. aktív vidékek és filament csatornák között ezeket a mágneses tereket a táguló CME részévé teszi. A táguló erővonalak mentén a napkorona anyaga kiáramlik, lecsökkentvén a korona sűrűségét, így a korona elsötétül. Az új modellt alkalmazva az egyik legnagyobb eddig észlelt CME-re (2003 október 28) sikeresen magyarázatot szolgáltatunk a napkorong mintegy egyharmadát beborító korona elsötétedés eredetére.

A korona kitörések (CME-k) talppontjai környékén létrejövő elsötétült területek 1-3 napon belül újra kifényesednek, amit korábban a CME által 'nyitottá' tett mágneses erővonalak lefűződésével érletmeztek. Viszont a Föld, sőt a Jupiter közelében a bolygóközi térben végzett *in situ* mérésekkel (Ulysses) elektronáramlást mutattak ki az Interplanetáris CME-ben, amely az ICME és a Nap között továbbra is fennálló mágneses kapcsolat bizonyítéka. Az ellentmondás feloldására egy új modellt javasoltunk (esettanulmányokkal támasztván alá javaslatunkat), miszerint a tranziens koronalyukak kifényesedése a 'nyitott' mágneses erővonalak diffúziója következménye. A diffúzió a nyitott erővonalak és a Nap mágneses szőnyegének sok kis-léptékű zárt mágneses hurka között való mágneses átkötődésén keresztül jön létre, amely a nyitott erővonalak véletlenszerű bolyongásához vezet. Ez a folyamat megengedi az ICME-k mágneses kapcsolatának tartós fennmaradását a Nappal, míg a 'nyitott' erővonalak koncentráció csökkenése a napkorona fényesség növekedéséhez vezet.

A Hinode napfizikai őrállomás EIS spektrométerének megfigyeléseit felhasználva tanulmányoztunk egy 2007 október 15-18 között megfigyelt korona lyukban fejlődő aktív vidékben a plazma áramlásokat. Azt találtuk, hogy az aktív vidék zárt hurkai mentén az anyag lefelé áramlik (vörös eltolódás), míg a határa mentén a plazma kifelé áramlik (kék eltolódás). Egy, október 18-án megfigyelt CME előtt a plazma kiáramlás megerősödött, amely a CME előtti növekvő szabad energia (és az ennek következtében kiterjedő mágneses tér) jelenlétével magyaráztunk. MHD szimuláció két fő mechanizmust mutatott a plazma kiáramlás hajtására: az egyik mágneses átkötődés az aktív vidék zárt és a korona lyuk nyitott erővonala között, a másik a kiterjedő zárt mágneses tér kompressziós hatása a korona lyuk nyitott erővonala mentén mozgó plazmára. A zárt és nyitott erővonalak közötti mágneses átkötődésről MHD szimulációval kimutattuk, hogy a kezdeti intenzív átkötődési fázist követően egy relaxációs folyamat indul el, melynek során az átkötődés iránya többször megváltozik, oszcillál.

Áttekintő előadások és cikkek a pályázat keretében

A pályázat keretében több áttekintő cikk is született, amelyek IAU és ISSI konferenciákon tartott meghívott előadásokhoz kapcsolódtak.

Nagyléptékű mágneses struktúrák és mágneses terek kapcsolatáról (van Driel-Gesztelyi, 2006), energia felszabadulás és mágneses étkötődés a Napon és csillagokon (van Driel-Gesztelyi, 2009) valamint a mágneses aktivitás áttekintése a fluxus megjelenésétől a fotoszférában, flerek, CME-k, ICME-k és interplanetétis mágneses felhőkig (van Driel-Gesztelyi & Culhane, 2009).

Aktív hosszúságok pozíciója szoros kettőscsillagokon (Oláh, 2006), csillagok fotoszférius aktivitási ciklusai (Oláh, 2007, IAU JD), kettősség hatása a csillagaktivitásra (Oláh, 2008, IAU Symp.).