

A naptevékenység ciklusközi változásainak elméleti és empirikus vizsgálata

című doktori értekezés tézisei

NAGY Melinda
Okleveles csillagász

Témavezető: Dr. PETROVAY Kristóf egyetemi tanár
ELTE TTK Csillagászati Tanszék

Konzulens: Dr. Paul CHARBONNEAU egyetemi tanár
Département de Physique, Université de Montréal,
Montréal, Québec, CANADA

Doktori iskola vezetője: Dr. GUBICZA JENŐ egyetemi tanár

Programvezető: Dr. KATZ Sándor egyetemi tanár

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar

Fizika Doktori Iskola

Részecskefizika és Csillagászat Program



Budapest
2019

Bevezetés

Az elmúlt közel 400 év megfigyelései rámutattak, hogy a naptevékenység erőssége igen változékony. Az 1600-as évek közepén, a Maunder-minimum során az aktivitás szinte nulla volt, majd az 1940-es évektől egy aktívabb, Modern maximumként ismert időszaknak lehettünk tanúi, amelynek a jelenlegi, 24. ciklus vetett véget. A ciklusok erőssége nem csak a napfoltszámokban mutatkozik meg. A naptevékenységhez számos kísérőjelenség társul, amelyek megszabják a Föld körüli térségben a pillanatnyi űridőjárás, illetve a hosszabb távú űrklíma alakulását. Mai technológiai civilizációnk nagymértékben kitett ezeknek a folyamatoknak, ezért a naptevékenység rövid és hosszútávú viselkedésének minél pontosabb előrejelzése kiemelkedő fontosságú.

Disszertációmban bemutatom, hogy hogyan lehet előrejelezni a naptevékenység évtizedes időskálájú viselkedését illetve azt, hogy milyen folyamatok limitálják az egy ciklusnál hosszabb távú előrejelezhetőséget. A munka különösen aktuális, hiszen a 24. ciklus a minimumához közeledik, a 25. ciklus erősségére és a maximum időpontjára vonatkozó „előrejelzési verseny” pedig már elindult.

„Betyár” aktív területek a $2 \times 2D$ modellben

Doktori kutatómunkám során azt vizsgáltam, hogy egy-egy szokatlan tulajdonságokkal bíró aktív régió hogyan befolyásolhatja a soron következő ciklus erősségét. A szakirodalomban már igen széleskörű ismeretanyag tanúskodik arról, hogy az aktív régiók dőlésszöge (Joy-törvény) és ennek átlaghoz képesti eltérései jelentős bizonytalanságot visznek a Nap poláris terének felépülésébe, amelynek napfoltminimumban felvett maximális értéke jól korrelál a következő foltciklus erősségével. Emiatt a

megbízható előrejelzéshez elengedhetetlenül fontos, hogy minél pontosabban megismerjük azokat az effektusokat, amelyek a globális mágneses terek felépülését befolyásolják. Korábbi szerzők azt is megmutatták, hogy nem csak a Joy-törvényhez képesti fluktuációk játszanak fontos szerepet, hanem olyan nagy fluxusú, egyenlítőn átnyúló aktív területek is, amelyek felszíni fluxustranszport-szimulációk szerint drámaian befolyásolták a felépülő poláris terek erősségét.

Kutatásom során a Montreáli Egyetem Napfizikai Kutatócsoportjának vezetőjével, Dr. Paul Charbonneauval együttműködve, a csoport által kidolgozott „ $2 \times 2D$ ” dinamómodell¹ felhasználásával azt vizsgáltam, hogy a modellben megjelenő, fent vázolt tulajdonságú aktív területek hogyan befolyásolják a szimulált ciklusok alakulását. Az olyan szélsőséges tulajdonságokkal bíró aktív területeket, amelyek jelentősen befolyásolják a következő, vagy éppen az aktuális ciklus erősségét, „betyár” régióknak neveztük el. A témában egy évvel ezelőtt publikált cikkünkre (Nagy és mtsai., 2017) számos független hivatkozást kaptunk.

A munka lépéseit és a kapott eredményeimet az alábbi három tézispontban foglalom össze.

1. tézispont: Betyár aktív régiók extrém hatásai

Egyetlen, kedvezőtlen tulajdonságokkal bíró, szélsőséges fluxust hordozó aktív régió főminimum állapotába taszíthatja a dinamót vagy ellenkezőleg; a Nap globális dipólmomentumát erősítő járulék esetén megakadályozhatja a főminimum bekövetkezését vagy újra is indíthatja a rendszer működését.

A munka első lépésében olyan aktív régiókat azonosítottam a modellezett adatsorokban, amelyek nagyban befolyásolhatták a szimulált ciklu-

¹A. Lemerle és mtsai. 2015, *ApJ*, **810**; A. Lemerle és P. Charbonneau 2017, *ApJ*, **834**

sok további alakulását.

Találtam egy, a modellben spontán megjelenő szimulált foltciklus-sorozatot, amely nagyon hasonlít a Nap esetében megfigyelt 22-23-24. foltciklusokhoz. A napfoltszám idősora mellett a szimulált dipólmomentumot is tekintve azt tapasztaltam, hogy bár a sorozat első két, „22-23.” ciklusának maximuma szinte azonos, a felépülő dipólmomentum a „23.” ciklus során jóval gyengébb. A csekélyebb dipólmomentum következtében a „24.” ciklus jóval kisebb aktivitást mutatott a korábbiakhoz képest. Ennek oka, hogy a modellben is érvényesül a Napon megfigyelt szabályszerűség, amely szerint a ciklus végén felépülő poláris terek (vagy dipólmomentum) maximuma előrevetíti a következő foltciklus erősségét. Ezek után a szimuláció során felbukkanó aktív régiók listáját vizsgáltam át olyan foltcsoport után kutatva a „23.” ciklus során, amely felelős lehet a dipólmomentum csekélyebb értékéért. Egy olyan, Joy-törvényhez képest ellentétes dőlésszögű (anti-Joy) területet azonosítottam, amely az egyenlítőhöz nagyon közel bukkant fel, jelentős dipólhoz adott járulékkal.

Eltávolítva ezt az egyetlen „betyár” aktív régiót a szimulációból azt tapasztaltam, hogy a „23.” ciklus végén felépülő dipól maximuma másfélszeresére, míg a következő, „24.” ciklus erőssége duplájára nőtt. Ezen túlmenően korábbra tolódott a dipóltér átfordulásának időpontja, valamint a két foltciklus közötti minimum ideje is rövidebb lett. Az eredmény azt sugallja, hogy a valós 24. ciklus csökkent aktivitásáért a 23. ciklus során megjelent betyár régió, vagy betyár régiók csoportja lehet felelős. Következtetésünket más szerzők munkái is alátámasztják.

További két, a szimulációs adatokban spontán megjelenő érdekes esetet figyeltem meg. Az egyik esetben egy globális dipólmomentumhoz nagy (negatív) járulékot adó, szintén anti-Joy régió jelent meg az egyen-

lító közelében, nem sokkal a ciklus maximuma után. A betyár régió felbukkanása után a globális dipólmomentum szinte azonnal átfordult, a dinamó pedig még egy kis amplitúdójú ciklus után leállt. Ez azt mutatja, hogy egy egyenlítőhöz közel megjelenő betyár régió, amely ellentmond a Hale- vagy a Joy-törvénynek, Maunder-minimumhoz hasonló főminimumot idézhet elő.

Ennek az ellenkezőjére is találtam példát. Egy rendkívül gyenge ciklus során a felépülő dipóltér nem lett volna elegendő ahhoz, hogy a dinamó működjön. Azonban egy egyenlítőhöz közel, a maximum időpontjában megjelenő betyár régió azonnal átfordította a dipólmomentumot, amely elég erős volt ahhoz, hogy a dinamó működése folytatódjon.

Az itt beazonosított betyár régiót beillesztettük egy másik szimulációba egy olyan időpontra, amikor a dinamó már közel 60 éve inaktív volt. A foltcsoport hatására a dinamó egy több évtizedes főminimum után újraindult, ami azt mutatja, hogy egy betyár régió nem csak főminimumba taszítani képes a rendszert, de ki is mozdíthatja onnan. A valóságban természetesen nem számíthatnánk ilyen aktív területek megjelenésére egy tartósan csökkent aktivitású időszakban. Az azonban elképzelhető, hogy ugyanez az effektus több aktív régió hatására jöjjön létre, amelyek külön-külön nem adnak nagy járulékot a globális dipóltérhez, együttes hatásuk azonban megfelel egyetlen betyár régióénak.

A tézispont témáját Nagy és mtsai. (2017, 4.1-2. alfejezet) és Petrovay és Nagy (2018) tárgyalja.

2. tézispont: Betyár aktív régiók hatásainak szisztematikus vizsgálata

A „betyár” régiók hatása a következő foltciklusra függ a terület felbukkanásának időpontjától és a naprajzi szélességtől.

Emellett az aktív régió fluxusa, kelet-nyugat irányra vonatkoztatott dőlésszöge, valamint polaritásai közti szeparáció is kritikus fontosságú.

Az egyedi esettanulmányok után szisztematikusan megvizsgáltam, hogy a betyár régió egyes paramétereinek változásai hogyan befolyásolják a szimulált ciklusokat. Ehhez kiválasztottam egy tesztrégiót, amely a vizsgált szimuláció során bukkant fel egy korábbi ciklusban. Ezt, illetve ennek módosított változatait a Hale-szabálynak megfelelően (azzal ellenkezően) illesztettem be a szimulációkba, hogy erősítsék (gyengítsék) a felépülő dipólteret. Az analízishez három ciklust használtam fel; egy átlagos erősségűt, egy annál gyengébbet, illetve egy attól erősebbet.

A tesztrégiót először a ciklus különböző fázisaiba illesztettem be. Azt tapasztaltam, hogy a dipólmomentumra, és ezáltal a következő ciklus erősségére gyakorolt hatás akkor a legintenzívebb, ha az aktív régió a módosított ciklus maximumában bukkan fel. A szimulációsorozatok alapján elmondható, hogy a tesztrégió akár 100%-kal is megnövelheti (lecsökkentheti) a következő ciklus erősségét, ha annak járuléka erősíti (gyengíti) a felépülő dipólmomentumot. Fontos kiemelni, hogy a dipól erősségén kívül a pólusváltás időpontja is megváltozik.

Az éppen módosított ciklus erőssége és időtartama is megváltozhat, amennyiben a tesztrégió még a maximum időpontja előtt jelenik meg – a maximumot követően az adott ciklusra gyakorolt hatás eltűnik. Az aktuális ciklus hossza maximum két évvel nőhet (vagy csökkenhet), ha a tesztrégió járuléka csökkenti (erősíti) a dipólmomentumot, emiatt a következő ciklus kezdete ugyanennyi idővel eltolódik. Ez az eredmény azért különösen érdekes, mert a ciklusok időtartamában bekövetkező változásokat gyakran a meridionális cirkuláció sebességváltozásainak tulajdonítják, a $2 \times 2D$ modellben a globális áramlási sebességek azonban

konstansok.

A további vizsgálatok során a tesztrégiót a ciklusok maximumában helyeztem el, mivel hatásuk ekkor bizonyult maximálisnak.

Megvizsgáltam azt is, hogyan befolyásolja a tesztrégió felbukkanásának naprajzi szélessége a szimulációk további alakulását. A tesztrégiót egyre távolabb helyezve az egyenlítőtől azt tapasztaltuk, hogy a következő ciklusra gyakorolt hatás csökken ugyan, de még 20° távolságban is átlagosan 50%-os amplitúdóváltozás tapasztalható a perturbációt követő ciklusban.

A tesztrégió dipólhoz adott járulékában a pozíció mellett kritikus szerepe van a követő rész fluxusának, az aktív régió dőlésszögének, illetve a polaritások közti szeparációnak is. A tesztrégiót a vizsgált foltciklus maximumába, az egyenlítőhöz közel helyezve egyesével változtattam a felsorolt három paramétert. Azt találtam, hogy a fluxus, a dőlésszög és a szeparáció hatása megfeleltethető egymásnak, δD_{BMR} kifejezése tehát valóban jól jellemzi az egyes aktív régiók globális dipólhoz adott járulékát².

A tézispont témáját Nagy és mtsai. (2017, 5. fejezet) részletezi.

3. tézispont: Hemiszférikus aszimmetria előrejelzése, betyár aktív régiók szerepe

A betyár régiók nem csak a soron következő ciklusok erősségét befolyásolják, de a féltekék közt tapasztalható aszimmetriát is, amely a régió felbukkanását követően létrejövő, a poláris tér erősségében kialakuló aszimmetriával előrejelezhető.

²A dipólhoz adott járulékot az alábbi kifejezés definiálja: $\delta D_{\text{BMR}} \sim F d \sin \alpha \sin \theta$. Az összefüggésben szereplő tagok: F a követő polaritás fluxusa, d a két polaritás szeparációja radiánban mérve, a foltcsoport kelet-nyugat irányra vonatkoztatott α dőlésszöge, illetve a foltcsoport θ középpontjának naprajzi szélessége.

Az első két tézispontban részletezett munka közben észrevettem, hogy a betyár régiók nem csak a soron következő szimulált ciklusok erősségét befolyásolják, hanem annak féltekéi közti aszimmetriát is. Saját észrevételeim és a szakirodalomban leírt eredmények alapján a kutatás következő lépésében azt vizsgáltam, hogyan lehet előrejelezni egy ciklus féltekéi közt kialakuló aszimmetriát, figyelembe véve a betyár régiók szerepét.

Az itt végrehajtott szimulációsorozathoz új teszt régiót választottunk, amelyet minden esetben úgy illesztettem be a vizsgált ciklusokba (északi és déli féltekére egyaránt), hogy a dipólmomentumot erősítse. Az aszimmetria mértékét a ciklus során északon és délen felépülő poláris terek, valamint a felbukkanó aktív régiók összessége alapján definiáltam. További aszimmetriaparaméter volt az új ciklus kezdetének féltekénkénti időpontjai közti késleltetés.

A kísérletsorozat eredménye azt mutatja, hogy egyértelmű kapcsolat van az adott ciklus poláris tereinek és a soron következő ciklus aktivitásában megfigyelhető aszimmetria között. Minél inkább dominálja például a déli félteke poláris tere az északiét, annál intenzívebb lesz a déli féltekén a foltaktivitás a következő ciklusban, illetve annál hamarabb jelennek meg itt az első új foltok. A poláris terek aszimmetriáját itt betyár régió váltotta ki. A leírt összefüggést további 500 ciklus bevonásával végzett vizsgálatom is megerősítette, ahol nem hoztunk létre mesterséges aszimmetriát.

A tézispont témáját Nagy és mtsai. (2017, 4.3. alfejezet), illetve Nagy és mtsai. (2018) tárgyalja.

Előrejelzés a zöld koronavonal adatai alapján

Az elméleti vizsgálatok mellett a koronában 5303 Å-ön mérhető, Fe XIV emissziós vonal (zöld koronavonal) egységesített adatsorát³ is feldolgoztam. Az adatbázis 1939-ig visszamenőleg összesen hét napfoltciklus regisztrátumait tartalmazza, 5° naprajzi szélesség szerinti felbontással. A zöld koronavonal, mint naptevékenység-indikátor jelentősége abban rejlik, hogy minden szoláris szélességen mutat aktivitási mintázatokat – szemben a napfoltokkal, vagy a poláris fáklyákkal. Az egyenlítői zónában („EE” ág) az emisszió intenzívebb, míg a poláris régióban jóval gyengébb. A pólusok környezetében megfigyelhető zóna két komponensre osztható. Az egyik egy egyenlítő felé mozgó régió, amely a foltciklus maximumában jelenik meg, és a minimum időpontjáig távolodik a pólustól („PE” ág). Ezt követően, a minimumtól a következő maximumig ismét a pólus felé tart („PP” ág).

Annak érdekében, hogy a zöld koronavonal egyenlítői és poláris területeinek aktivitási mintázatait a nagy intenzitásbeli különbség ellenére is láttatni tudjuk, különböző adatfeldolgozási „trükkök” alkalmazására van szükség. Az emissziós vonal különböző, megfigyelt és szimulált adatsorait eltérő módszerekkel, több kutatócsoport is feldolgozta. Az alkalmazott módszerek és a vizsgálatba vont ciklusok eltérései miatt a levont következtetések igen különbözőek.

Az egyik elmélet szerint a PE ág összekapcsolódik az EE ággal, létrehozva a kiterjesztett naptevékenységi ciklust, ami a torziós oszcilláció mintázatát követi. A másik elmélet azt állítja, hogy a PE és a PP ágak kapcsolódnak össze, kirajzolva a poláris koronalyukak határát.

A munka során három, szakirodalomban leírt módszerrel dolgoztam

³Az adatsor elérhető a <http://www.suh.sk/online-data/modifikovany-homogenny-rad> weboldalon (2019. január).

fel az egységesített adatbázist. Arra kerestem a választ, hogy az adatok a fent leírt elméletek közül melyiket igazolják. A topológiai analízist követően a poláris zónában megfigyelhető struktúrák tulajdonságai alapján előrejelzést készítettem a 25. ciklus maximumának időpontjára.

4. tézispont: A 25. naptevékenységi ciklus maximumának előrejelzése a zöld koronavonal adatok alapján

A Nap poláris régióiban a 5303 Å-ön mérhető, Fe XIV emissziós vonal (zöld koronavonal) által kirajzolt aktivitási mintázatok segítségével a naptevékenységi ciklusok maximumának időpontja előrejelezhető. Vizsgálataim szerint a 25. ciklus maximuma megközelítőleg 2025-re várható.

A zöld koronavonal adatsorát az alábbi három módszer segítségével dolgoztam fel:

- [1.] Helyi maximumhelyeket azonosítottam az adatokban úgy, hogy megkerestem azon koordinátákat, amelyek előtt 10° -on belül az intenzitás értéke monoton nőtt, majd utána 10° -on belül monoton csökkent. Ezek után egyéves átlagolási ablakban kiszámítottam a helyi maximumok számsűrűségét. (A módszer alapja: R. C. Altrock 1996, *SoPh*, **170**.)
- [2.] Egyéves időablakon belül kiszámítottam az intenzitásértékek szórást, majd ezekből kivontam egy szélesség szerinti csúszóátlagot. A szélesség szerinti átlagolást 15° , 25° illetve 35° -os ablakméretek esetére végeztem el. (A módszer alapja: J. L. Leroy és J. C. Noëns 1983, *A&A*, **120**.)
- [3.] Egyéves időablakon belül meghatároztam az intenzitásértékek átlagát, majd ezekből levontam egy szélesség szerinti csúszóátlagot.

A szélesség szerinti átlagolást ezúttal is 15° , 25° illetve 35° -os ablakméretek esetére végeztem el. (A módszer alapja: Robbrecht és mtsai. 2010, *ApJ*, **716**.)

A három különböző módszerrel, eltérő szélesség szerinti átlagolási ablakokat használva arra a következtetésre jutottam, hogy a naptevékenységi ciklusok nem mutatnak egységes képet.

Eredményeim szerint az [1.] módszer alkalmazása esetében csak a 19. és a 22. ciklusoknál mutatkozik a kiterjesztett ciklusok léte, a többi esetben a poláris és egyenlítői régiók között ilyen kapcsolat nem figyelhető meg.

A [2-3.] módszerekről elmondható, hogy a poláris és egyenlítői zónák közötti kapcsolat függ a ciklusok erősségétől, a vizsgált féltekétől és az alkalmazott átlagolási ablak méretétől. A két módszer nagyon hasonló topológiájú eredményekre vezet, de a két poláris és az egyenlítői zóna közti kapcsolatot a módszerek nem minden esetben mutatják egyformán.

A [2-3.] módszer 25° -os átlagolási ablak mellett készült térképeit felhasználva előrejelzést készítettem a 25. naptevékenységi ciklus maximumának időpontjára. Ehhez a PP ágra illesztett egyenes meredekségét, illetve a PP ág pólushoz érése és a következő ciklus maximuma között eltelt időt vettem alapul. A [2.] módszerrel készült előrejelzés azt mutatja, hogy a 25. ciklus maximuma az északi féltekén 2022.5 ± 1.3 -ban, míg a déli féltekén 2024.8 ± 1.3 -ban várható. A [3.] módszerrel az északi féltekén a maximum 2026.2 ± 1.1 -ra, míg délen 2024.7 ± 1.1 -re várható. Az intervallumok 2σ -n belül átfednek.

A tézispont témáját Petrovay és mtsai. (2018) foglalja össze.

Publikációk a disszertáció témájában

Nagy, M., Lemerle, A., and Charbonneau, P.: 2018, Impact of Rogue Active Regions on Hemispheric Asymmetry, *Advances in Space Research* **63(4)**, 1425

Nagy, M., Lemerle, A., Labonville, F., Petrovay, K., and Charbonneau, P.: 2017, The Effect of „Rogue” Active Regions on the Solar Cycle, *Solar Physics* **292**, 167

Petrovay, K. and Nagy, M.: 2018, Rogue active regions and the inherent unpredictability of the solar dynamo, in *Proceedings of the International Astronomical Union*, Vol. 13, pp 307–312

Petrovay, K., Nagy, M., Gerják, T., and Juhász, L.: 2018, Precursors of an upcoming solar cycle at high latitudes from coronal green line data, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **176**, 15

További publikációk

Lopes, I., Passos, D., Nagy, M., and Petrovay, K.: 2014, Oscillator Models of the Solar Cycle. Towards the Development of Inversion Methods, *Space Science Reviews* **186**, 535

Nagy, M. and Petrovay, K.: 2013, Oscillator models of the solar cycle and the Waldmeier effect, *Astronomische Nachrichten* **334**, 964

Nagy, M., Petrovay, K., and Erdélyi, R.: 2017, The Atlanto-Pacific multidecade oscillation and its imprint on the global temperature record, *Climate Dynamics* **48**, 1883