

<b>Zárójelentés szakmai beszámoló</b>		NKFI-azonosító: 128221	Típus: PD
		Szakmai jelentés: 2020. 10. 26.	
Vezető kutató: Belucz Bernadett		Kutatóhely: Csillagászati Tanszék (Eötvös Loránd Tudományegyetem)	
Zsúri: FIZ	Kezdet: 2018. 09. 01	Időszak: 2018-09-01 – 2022-08-31 (2019-11-30 – 2020-11-30 anyasági)	

## **Előrelépés a napciklus térbeli szerkezetének és időbeli változásainak megértésében: 3D modellezés**

### **A. A kutatás eredményeinek ismertetése**

#### **1. Mágneses sávok vizsgálata a tachoklínában sekély víz modell segítségével**

Számos bizonyíték szól amellett, hogy létezik egy kiterjedt napciklus vagy egy azzal egyenértékű egymást átfedő kettős napciklus. Míg a napfoltok zónái ritkán fedik át egymást a szomszédos ciklusok között, addig a magas szélességeken kezdődő új ciklus mágneses aktivitása általában időben átfedik az előző napfoltciklus végéből származó alacsony szélességeken jelentkező mágneses aktivitást. Gyanítsuk, hogy ezek a nem foltszerű, nagy szélességi körű mágneses aktivitási jelek egy új toroidális sáv kialakulásának bizonyítékai valahol a felszín alatt. Ha a felbukkanó foltokért és a magasabb szélességi körök egyéb aktivitási jeleiért is felelős toroidális terek a szoláris tachoklínában, vagy legalábbis a konvekciós zóna aljának közelében helyezkednek el, érdemes megvizsgálni a tachoklína globális MHD-jében jelentkező különbségeket aközött, amikor egyetlen toroidális sáv van jelen a napfoltok szélességein, vagy amikor van egy másik sáv, ellenkező polaritású, sokkal magasabb szélességeken.

A szoláris tachoklína dinamikáját gömb alakú geometriában tanulmányozzuk egyrétegű MHD sekély-vízű modell segítségével. Ennek a rétegnek változó vastagsága van, merev alsó határfeltétellel és szabadon deformálható felső határfeltétellel, amely lehetővé teszi, hogy a tachoklína radiatív és túllövési rétegét külön-külön ábrázoljuk, amelyek meglehetősen eltérő szubadiabaticitással jellemezhetőek. Az MHD egyenleteket egy forgó rendszerben írjuk fel. A vízszintes áramlások függetlenek a magasságtól, a radiális sebesség pedig a magasság lineáris függvénye. A hosszanti és a szélességi mágneses mezők komponensei függetlenek a magasságtól, a radiális irányú mező pedig a magasság lineáris függvénye. A teljes mágneses fluxus megmarad. A teljes nyomásgradiens, a hidrosztatikus és a mágneses gradiensek összege arányos a vastagság horizontális gradiensevel. A rendszer nem tartalmaz diffúziót, így a teljes energia - a kinetikai, a potenciál- és a mágneses energia - megmarad. Mind a gyenge, magas szélességű mágneses sávok, mind a napfolt-termelő alacsony szélességű mágneses sávok szélességi profilját Gauss függvények formájában adjuk meg, ennek részletes profilja és paramétertere és a modell részletes bemutatása a fenti cikkben megtalálható. Mindkét szimmetria lineáris módusát elemezzük az Egyenlítő körül. Szimmetrikus eseteknél a latitudinális sebességkomponens és a longitudinális mágneses térkomponensek szimmetrikusak, a longitudinális sebességkomponens és a latitudinális mágneses térkomponensek antiszimmetrikusak. Az antiszimmetrikus eset ennek fordítottja. Két jellemző  $G$  értéket veszünk figyelembe, amelyek a túllépési tachoklínát ( $G=0.5$ ) és a sugárzó tachoklínát ( $G=100$ ) reprezentálják. Nem dimenziós egységben az  $a=1$  térerősség 100 kGauss csúcstérerősségnek felel meg.

## **1.1. Instabil módok tulajdonságai (Magnetohydrodynamics Instabilities of Double Magnetic Bands in a Shallow-water Tachocline Model: I Cross-equatorial Interactions of Bands, Belucz et al., ApJ, accepted)**

### **1.1.1. A szimpla (egyetlen mágneses köteg féltekénként) és a dupla (két mágneses sáv féltekénként) mágneses sávok instabil módjainak összehasonlítása**

Összehasonlítva az egyszeres és a kétszeres mágneses köteg eseteit, egyértelműen látszik, hogy az instabil HD módusok a túllövési tachoklínában (tachoklína felső fele) ott működnek, ahol a toroidális mező nulla vagy tartósan csökken. Ahogy a toroidális mező elkezd erősödni, az instabil HD módusok növekedési üteme először csökken, majd gyorsan nullára esik, ahogy a térerősség eléri a 10-30 kG erősséget. Minél inkább közeledik a toroidális köteg az egyenlítőhöz, ez annál annál nagyobb térerősségnél következik be. Ezzel egy időben a tér növekedésével megjelennek az instabil MHD módusok is. Azt tapasztaltuk, hogy erősen retrográd fázissebességnél csak a szimmetrikus HD és MHD módusok jelennek meg. Ezzel szemben  $m=2$  longitudinális hullámszámra szimmetrikus és aszimmetrikus erősen retrográd módusok is. A tachoklína túllövési rétegének egysávos modelljének esetét tekintve a növekedési ráták legerősebb növekedése a magas szélességi fokokon látható, vagyis itt a legerősebbek azok az instabilitások, amelyek például a napfoltok megjelenéséért is felelősek. Ahogy a térerősségnő és a toroidális köteg közeledik az egyenlítőhöz, ennek a módusnak az üteme 5,2 hónapról körülbelül 2 évre csökken. Ez a csökkenés egy pontban megakad, mire eléri 10-30 kG értéket, a növekedési ütemek állandóvá válnak. A tachoklína radiatív részében (tachoklína alsó fele) ilyen csökkenést nem tapasztaltunk. 2-6 kG térerősséig az  $m=2$  módusok dominálnak, de ezeket gyorsan túllépi az  $m=1$  módusok.  $M=1$  hullámszám esetén csak a szimmetrikus HD módusok instabilak,  $m=2$  esetén viszont egy aszimmetrikus HD ágat is megfigyelhetünk erősen retrográd fázissebességgel.

### **1.1.2. A magasabb szélességi sáv jelentősége**

Vizsgálva a kétsávós/dupla sávós rendszer instabilitásának jellemzőit, szemebtűnő, hogy kellő távolságra az egyenlítőtől (60, illetve 30 fok szélességen) az antiszimmetrikus és a szimmetrikus módok hasonló jellemzőket mutatnak. Mindkét esetben egyértelmű, hogy a magas szélességi sáv az instabilitás elsődleges mozgatórugója, míg az alacsony szélességi sáv felelős a sávok közötti kölcsönhatásért.

### **1.1.3. Egyenlítő irányú migráció**

Megvizsgáltuk azt is, hogyan változnak ezek az energetikailag aktív Rossby-hullámok sajátmódusai a mágneses sávok egyenlítő felé tartó migrációja során. Amikor a mágneses sávok 60 illetve 30 naprajzi szélességen tartózkodnak, az antiszimmetrikus és szimmetrikus módozatok jelentősen hasonló tulajdonságokat mutatnak, azonban ez jelentősen megváltozik, ahogy az Egyenlítő felé haladunk. Mindkét esetben jól látható, hogy a sávok közötti dinamikus kölcsönhatásért és a napfoltok kitöréséhez szükséges instabilitás kialakulásáért elsősorban az alacsony szélességi mágneses sáv a felelős, bár ehhez a gyengébb sáv is hozzájárul. Ebben az esetben a 30 fokos alacsony szélességi sáv a folyamatban lévő ciklus sávja, a magas szélességi sáv pedig a következő ciklusként megjelenő meghosszabbított ciklust jelenti. Ahogy a ciklus halad előre, az aszimmetrikus esetben a nagy szélességi sáv szerepe már jelentősen megnövekszik, és részt vesz a napfoltok kitöréséhez szükséges instabilitás előidézésében, bár még mindig az alacsony szélességi sáv mozgatja a kölcsönhatásokat, ill. a foltkitörésekhez szükséges instabilitás. A szimmetrikus esetben jól látható, hogy ha a magas szélességi sáv túl erős, akkor teljesen meg tudja állítani mind a sáv-kölcsönhatásokat, mind a napfoltok kitörését. Amikor a mágneses kötegek már 40, illetve 10 fok szélességre érnek, az aszimmetrikus esetben az alacsony szélességi sáv nem elegendő az aktivitás fenntartásához a magas szélességi sáv nélkül. Nem számít, milyen erős az alacsony szélességi sáv, a tevékenység folytatásához erősebb magas szélességi sávra van szükség. Más szóval, a magas

szélességi sáv játssza a fő szerepet a napfoltok kitörésében és a naptevékenységben. A szimmetrikus esetben lényegesen más a helyzet, mert a jelentős aktivitáshoz erős alacsony szélességi sáv szükséges, de a magas szélességi sáv nem lehet túl erős, mert az az instabilitás ellen hat. Ebben az esetben az alacsony szélességi sáv megtartja vezető szerepét. Amikor a kettős sáv további 5 fokot vándorol az egyenlítő felé, az alacsony szélességi sáv végleg elveszíti aktivitását fenntartó szerepét. Másrészt a magas szélességi sáv irányítja a tevékenységet, anélkül, hogy ténylegesen megkövetelné az alacsony szélességi sáv jelenlétét. Szimmetrikus esetben azonban az alacsony szélességi sávnak nagyon erősnek, a magas szélességi sávnak pedig nagyon szűk erősségi tartományban (60–110 kGauss) kell lennie ahhoz, hogy egyáltalán beszéljünk aktivitásról. A radiatív tachoklína esetében hasonló képet látunk azzal a hatalmas különbséggel, hogy itt a rendkívül erős mágneses terek felelősek az instabilitásokért.

## 1.2. A mágneses sávok egyenlítőt keresztező kölcsönhatásai

A sávok egyenlítőt keresztező kölcsönhatásait vizsgáltuk, amikor azok közel vannak az egyenlítőhöz. A kérdés az, hogy mi lehet egy ilyen kölcsönhatás fizikája. Ezen kölcsönhatás koncepciójának megvalósításához mind a nemlineáris, mind a viszkózus/turbulens disszipáció szükséges. Az egyenlítőt keresztező kölcsönhatások az anti-fázisú „billenésből”, azaz az instabilitás antiszimmetrikus módjából alakulnak ki. A nemlineáris evolúció meg tudja mutatni, hogy egy toroidnak mekkora szélességi elmozdulási amplitúdója lehet az egyes féltekéken, és ezért milyen közel kerülhetnek egymáshoz az északi és déli féltekén lévő toroidok. Ehhez legalább egy kvázi 3D sekélyvízi modell szükséges, mert le kell csökkenteni az északi és déli sáv között maradó tömeget. Némi turbulens mágneses diffúzióra is szükség van az északi és déli sáv teljes összekapcsolásához. Amikor ez megtörténik, akkor némi mágneses energia szabadulhat fel a lassú újracsatlakozás miatt azon a hosszúsági fokon, ahol a sávok érintkeznek. Ennek a folyamatnak a részeként a új mágneses fluxus is megjelenhet/felbukkanhat. Ez az újrapcsolódás azonban az egyenlítő két oldalán található, ellentétes irányú toroidális fluxus megsemmisüléséhez is vezetne, ami várhatóan csak az egyenlítői régiók közelében lesz lokálisan releváns. Ennek azonban várhatóan nem lesz azonnali, jelentős hatása egy magas bétájú plazmában, ahol a egyenlítőt keresztező kioltást elsősorban a lassú ellenáramlás vagy a turbulens disszipáció okozza.

A kérdés az, hogy mennyi ideig tarthat az egyenlítői keresztirányú kölcsönhatás az északi és déli félteke sávjai között, amikor bizonyos hosszúságokon közel vannak az anti-fázisú billenés miatt. Ha feltételezzük, hogy a sávok egy bizonyos hosszúságon olyan közel kerültek egymáshoz, hogy távolságuk mindössze 1 fok, akkor a két sávot fizikailag a  $L=(\pi/180)\times 5\times 10^{10}$  cm távolság választja el egymástól a tachoklínában. Ha a turbulens diffúzió  $\eta=3\times 10^{11}\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ , akkor a diffúziós idő  $L^2/\eta$ , ami körülbelül egy hónap, hogy a sávok megkezdjék az egyenlítői interakciót.

## 1.3. Az instabil módokat leginkább befolyásoló paraméterek vizsgálata (Magnetohydrodynamics Instabilities of Double Magnetic Bands in a Shallow-water Tachocline Model: II Features of Unstable Modes, Belucz et al., MNRAS, 2023)

### 1.3.1. A mágneses sávok térerősségének hatásai az instabilitásokra

A mágneses tér értékeit 10 és 90 kG között változtattuk. A teszt első felében a magas szélességeken elhelyezkedő mágneses sáv erősségét rögzítettük és az alacsony szélességek mágneses kötegének erősségét változtattuk. Gyenge mágneses sávok esetén (10kG) az instabilitás maga is rendkívül gyenge és a vándorlással tovább gyengül. Mire eléri az 50 illetve 20 fok szélességet a két sáv, az instabilitások megszűnnek, ilyen gyenge tér mellett nincsen napaktivitás. Minden más esetben jól látszik, hogy 15 kG és 50 kG között van egy választó vonal, 53, illetve 23 fok szélességnél a

növekedési ütemek eltérnek. A 15 kG és az alatti értékek görbéinél a görbék együtt haladnak, és valamivel erősebb instabilitást jeleznek, mint a 15 kG feletti értékek görbéi, amelyek szintén együtt haladnak. Ez az elválasztás a fázissebességekben is tükröződik, ha nem is olyan jelentős mértékben. Minél erősebbre állítottuk a magas szélességeken elhelyezkedő sáv térerősségét a napaktivitás csúcsa annál inkább az egyenlítő felé tolódott. 90kG értéknél már a aktivitás maximuma akkor figyelhető meg, amikor az alacsony szélességű mágneses sáv 20 fok környékére ér, ez megfelel a napon megfigyelt napaktivitási jellemzőknek. Azt is megvizsgáltuk, hogy mi történik, ha az alacsony szélességen elhelyezkedő sáverősségét rögzítjük. Ebben az esetben minden mágneses térértékre szinte ugyanazt az eredményt kaptuk. A legerősebb instabilitások akkor jelentkeztek, mikor a sávok még magas naprajzi szélességeken tartózkodtak és a 55-60 fokon tartózkodó mágneses köteg erőssége kicsi, 10-30 kG körüli. Azután az egyenlítő irányú migrációval és az erősödő mágneses köteggel az instabilitás fokozatosan gyengülni.

### **1.3.2. Instabilitások vizsgálata a sáv szélesség függvényében**

Ha a sávok szélessége 20 és 40 fok között változik, akkor a térerő növekedésével az instabilitások erősödnek. Nagyjából 10 fokos sáv szélességnél lesz a legerősebb az instabilitás minden mágneses tér esetében. Érdekes módon 1-20 fokos sáv szélességeknél a 25kG-os térerő adja a legerősebb instabilitást, az erősebb és gyengébb tér pedig ennél gyengébb növekedési ütemet tud produkálni. Ha a longitudinális hullámszám  $m = 1$  vagy  $m = 2$ , akkor az instabilitások a sáv szélesség széles tartományában jelen vannak. Ha azonban a hullámszám 3 vagy 4, az instabilitások csak nagyon szűk sávokban (1-10 fok) fordulnak elő, és rendkívül gyengék.

### **1.3.3. Az MHD instabilitások vizsgálata az effektív gravitáció függvényében**

A tachoklína radiatív részében a növekedési ráta és a fázissebesség is konstans mindkét hullámszámra függetlenül attól, hogy a két mágneses sáv mely szélességen helyezkednek el. Minél alacsonyabban vannak a sávok, annál kisebb a növekedési ráta és annál nagyobb a fázissebesség konstans értéke. A túllövési rétegében a differenciális rotáció amplitúdójának függvényében adott esetben láthatunk egy egyértelmű csúcsot a növekedési rátában, de ezt követően minden esetben jelentős csökkenés tapasztalható. A tachoklína túllövési rétegében a fázissebesség magas szélességeken még folyamatosan jelentősen emelkedik, alacsony szélességeken már ez a növekedés szinte elhanyagolható.

### **1.3.4. A tachoklína túllövési és radiatív rétegének instabilitásai**

A tachoklína radiatív rétegében az  $m=1$  hullámszám esetében az instabilitások a kezdeti növekedés után konstans értékre állnak be a differenciális rotáció amplitúdójának függvényében, amint a magasabb szélességű mágneses sáv eléri a 0,2-0,3 kG értéket. Az  $m=2$  hullámszám esetében jól látható, erőteljes csúcsokat látunk a növekedési rátákban 0,05-0,1kG környékén, majd amint a magasabb szélességű mágneses sáv erőssége eléri a 0,3 kG értéket, az instabilitások eltűnnek. Az  $m=1$  hullámszámra a fázissebesség állandó konstans értéket mutat minden szélességen. Ez az érték annál kisebb, minél alacsonyabban vannak a mágneses sávok. A tachoklína túllövési rétegére a tachoklína radiatív rétegéhez nagyon hasonló képet kapunk, mind a növekedési rátára, mind a fázissebességre, azonban az  $m=1$  hullámszámra, 60, illetve 30 fok szélességeken elhelyezkedő mágneses sávok esetén az instabilitások látványosan lecsengenek. Az  $m=2$  hullámszám esetében a nagy differenciális rotációs amplitúdókra az instabilitások növekedése, majd lecsengése sokkal drámaibb.

## 2. A napaktivitás tulajdonságainak vizsgálata Babcock-Leighton napdinamó-modell segítségével

### 2.1. A napfáklyák térbeli és időbeli eloszlása SOHO és SDO adatok alapján: Az időben változó, magas-szélességű meridionális cella hatása a póluskörnyéki mágneses terekre (2023, Nature Ast.)

Ebben a kutatásban a napfáklyák és a napfoltok, valamint az ahhoz kapcsolódó napaktivitás összefüggéseit vizsgáljuk SOHO illetve SDO adatok segítségével. Ezek az elnyúlt, fűzészerű képződmények a napon mindenhol megtalálhatóak, de míg az alacsony szélességeken kizárólag aktív vidékeken, a napfoltokhoz kapcsolódóan láthatjuk őket, addig a magas szélességek poláris fáklyáinak eredete nem tisztázott. A megfigyelések azt mutatják, hogy a sarki régiókban (körülbelül a 75. szélességi fokon) a poláris fáklyák periodikusan fejlődnek. Egy közel egy éves periódus, amely hullámmintázat formájában látható mindkét pólus közelében. A fáklyák a napfoltokhoz hasonlóan a napciklussal együtt fejlődnek, de a pólus felé vándorolnak, ellentétben a napfoltok egyenlítőirányú migrációjával. Még érdekesebb, hogy létezik egy jól kivehető, rövidebb távú evolúciós minta is, amelynek időtartama valamivel több, mint egy hónap. A poláris fáklyák ez a rövid periódusú változása kereszt-, pontosabban „X-mintázatot” mutat.

A Nap globális áramlásainak magnetohidrodinamikája egy lehetséges fizikai mechanizmust kínál a fáklyák rövidtávú evolúciójára. A Nap globális differenciális forgásának magnetohidrodinamikai evolúciója miatt a magas szélességi körökben  $m=1$  áramlási minták alakulnak ki, az óramutató járásával megegyező és az óramutató járásával ellentétes örvénnyel. Ezek az örvénylő mozgások, amelyek a Nap differenciális forgásának (DR) dinamikus alakulása miatt jönnek létre, némi változást okozhatnak a keletkező DR mintában, vagyis az áramlások  $m=0$  és  $m=1$  azimutális komponense egyaránt jelen lehet a teljes DR mintában. Ha a DR csak tisztán  $m=0$  azimutális áramlást tartalmaz, a poláris DR mintázat nem mutatna dőlést a poláris tengelyhez képest, de mivel mutat, ezért az  $m=1$  modulusnak is jelen kell lennie. Ez azt jelenti, hogy a meridionális keringés (MC) valószínűleg ugyanazokkal az összetevőkkel rendelkezik, vagyis az MC egy nem tengelyszimmetrikus ( $m=1$ ) áramlást tartalmaz, amely 180 fokban ellentétes irányban örvénylik. Így ez az elsődleges tengelyszimmetrikus MC mintázat hozzáadódik vagy éppen kivonódik az eredeti MC mintához a hosszúságtól függően. A minta hozzáadása vagy kivonása, a globális meridionális keringésben periodikusan megforduló komponenst hozna létre, amely befolyásolhatja a mágneses jellemzők szállítását a pólus felé, majd az egyenlítő felé. A sarki szélességi körökön a DR gyengébb, mint az alacsonyabb szélességeken, így egy teljes körforgás körülbelül 35 napig tart. Ezért körülbelül minden 35. nap után megjelenik a fordított cella. Ez megközelítőleg a poláris fáklyák rövid távú időbeli evolúciójában megfigyelhető periodicitás. Ezt a jelenséget szimuláljuk úgy, hogy egy időben változó MC-t hozunk létre, ami alapvetően egycellás a felszínen a pólus felé tartóáramlás az alap. Ehhez adódik hozzá egy fordított áramlási cella ami 17-35 naponként megjelenik és eltűnik. Az áramlási sebesség átmenetileg akár 100 m/s is lehet, ami több hónapon át átlagolva körülbelül 0-5 m/s, ami megfelel az elváraknak. Az egyetlen kérdés az, hogy milyen mechanizmus felel a poláris DR poláris tengelytől való eltéréséért. A válasz a Rossby-hullám, amit már a fent említett tachoklína kutatásokról ismerhetünk. Végeztünk szimulációkat ezzel kapcsolatban és sikerült reprodukálni a poláris fáklyák jellegzetes „X-mintázatát”. Ez már egy olyan kutatás első lépése, ahol a tachoklínából kiindulva és a dinamót is segítségül hívva adunk választ az észlelés adatokban megfigyelt jelenségekre.

## 2.2. Átfogó optimalizációs vizsgálat – 5D paramétervizsgálat

Egy olyan átfogó paramétervizsgálat készül a napdinamó modellről, ami segítségünkre lesz a modell pontos hangolásában. A térerősség és a a napciklus hosszának a felmérését végezzük 5 különböző kritikus paraméter függvényében, ezek a meridionális cirkuláció mintázata, meridionális cirkuláció áramlási sebessége és mélysége, a turbulens diffúzivitás, és a poloidális forrás erőssége. A vizsgálathoz több, mint 3200 szimulációt végeztünk, hogy az észszerűség határain belül lehető legpontosabb és legátfogóbb eredményeket kapjuk. A legfontosabb megállapításaink:

1. A térerősség és a napciklus szempontjából az egyik legfontosabb paraméter a turbulens diffúzió, illetve a meridionális cirkuláció mintázata.
2. A sugárban lévő cellák számának növelésével a ciklus hossza növekszik, ha szélességi irányban növeljük a cellák számát, akkor lerövidül a ciklus hossza. A ciklus hossza erősen függ a meridionális keringés kezdeti mintázatától. A cellák száma a mélységben a legjelentősebb paraméter a ciklus hosszának meghatározásához.
3. Ha a kezdeti meridionális keringés egysejtű, akkor a toroidális tér erőssége nő, de a poloidális tér erőssége csökken. A meridionális cirkulációs sejtek celláink a számát a szélesség szerint csökkentve a toroidális és poloidális tér ereje is nő. A meridionális cirkulációs sejtek számát mélységben csökkentve a toroidális tér ereje csökken, a poloidális tér viszont nő.
4. A meridionális cirkuláció kezdeti mintázatát az időben változtatjuk, akkor a változás időintervalluma befolyásolja a mezők erősségét.
5. Igazoltuk, hogy egy nagy szélességi fokon fordított meridionális áramlási cella megjelenése a poláris tér gyorsabb megfordítását idézheti elő, mivel ebben az esetben a ciklus hossza lerövidül.
6. A cirkuláció amplitúdójának növelésével szinte minden esetben csökken a periódus. Ez várható is, mert minden esetben, hacsak nem a diffúzió dominál, a periódust minden esetben a szállítószalag sebessége határozza meg.
7. Kis sebességű cirkulációra, minél jobban lezorítjuk az egycellás cirkulációt alacsonyabb szélességekre (jóval kisebb mértékben, mint a második poláris cella esetén a nagy szélességi fokokon), az a periódus csökkenéséhez vezet. Ez azért történik, mert miközben a keringés csökken, a turbulens diffúzió elkezd „rövidre zárni” a szállítószalagot, mivel a poloidális fluxus felülről lefelé diffundál, mielőtt elérné a poláris szélességeket.
8. Négy cellás cirkulációnál, mikor a szélesség és a mélység szerint is két-két cellánk van, a tér nem egyszer bipolárisból kvadrupoláris térbe fordultát. Ezt külön vizsgáltuk.
9. Azonos meridionális cirkuláció amplitúdó mellett az eredményeket sokkal jobban befolyásolja a turbulens diffúzió, ami nemegyszer akár ötszörös vagy ennél nagyobb csökkenéshez is vezetett. Ez az eredmény azt mutatja, hogy a megfigyelt napciklusra kalibrált fluxus - transzport dinamó megköveteli a diffúzió gondos megválasztását, függetlenül attól, hogy milyen cirkulációs mintával dolgozunk.
10. A meridionális cirkuláció elsősorban a toroidális és poloidális fluxus transzportjéért felelős, nem azok erősítéséért.
11. A ciklus hossza szinte független a felszíni poloidális forrás amplitúdójától. Ez várható is, mert a dinamó közel lineáris. A poloidális forrás amplitúdójának változtatása elsősorban a ciklus csúcsamplitúdóját kell, hogy változtassa.
12. Minél mélyebbre engedjük a meridionális cirkulációt, annál hosszabb lesz a ciklus és erősebb a tér, hiszen hosszabb ideig több fluxus tud bekapcsolódni a transzportba.
13. A négycellás és a mélység szerinti két cellás esetben is lényegesen kisebb toroidális mezőt láthatunk, mint a többi esetben. A négycellás esetben ennek az az oka, hogy a poloidális tér nyírása a szállítószalag rövid szélességű kiterjedése miatt nagyrészt az alacsony szélességi körökre korlátozódik, ahol a szélességi rotációs gradiens a leggyengébb, így kevesebb toroid mező keletkezik. A mélység szerinti két cella esetén a poloidális fluxusból kevesebb jut a konvektív zóna aljára, ahol a legerősebb a radiális nyírás tartománya van, ami ismét csökkenti a dinamó azon képességét, hogy felerősítse a toroidális teret.

## **B. Konferenciák, meetingek**

### **1. 2020. december 1-17. AGU Fall Meeting (online)**

#### **Poszter: MHD of double-bands representing extended solar cycle**

Abstract: Along with the "butterfly diagram" of sunspots, combined observational studies of ephemeral active regions, X-ray and EUV brightpoints, plage, filaments, faculae and prominences demonstrate a pattern, which is known as the Extended Solar Cycle (ESC). This pattern indicates the wings of the sunspot butterfly could be extended to much higher latitudes (about 60 degrees) and to earlier time than the start of a sunspot cycle, hence creating a strong overlap between cycles, meaning that, during the ongoing cycle's activity near 30-degrees latitude in each hemisphere, the next cycle is starting at around 60-degrees. By representing these epochs by oppositely-directed double magnetic bands in each hemisphere, we compute the eigen modes for MHD Rossby waves at the base of the convection zone and study how the properties of unstable MHD Rossby waves change as these band-pairs migrate equatorward. We find that the low-latitude band itself drives the major dynamics as the solar activity progresses from 35 to 20 degrees. When the activity proceeds further equatorward of 20 degrees, the next cycle's band from higher latitudes starts taking over to drive the majority of the activity features by interacting with the low-latitude band.

### **2. 2021. február 2. European Association of Solar Telescopes GA meeting**

### **3. 2021. március 22-23. SWATNET Kick-off Meeting**

Presantion about the Hungarian Solar Physics

### **4. 2021. szeptember 6-10. ESPM-16 (online)**

#### **Poszter: Effect time-dependent reverse-flow in meridional circulation on the evolution of spot-producing toroidal fields and implications on observed short-term variability in polar faculae**

Abstract: In various classes of dynamo models, spot-producing magnetic fields are generated as axisymmetric toroidal flux-ropes. While mean-field models produce axisymmetric broad toroidal fields, full 3D convective models produce axisymmetric toroidal wreaths. All these models can reproduce various longitude-averaged features, such as solar-like butterfly diagrams. In recent simulations, we show that time-dependent non-axisymmetric  $m=1$  type flows can originate due to nonlinear hydrodynamics of differential rotation. This non-axisymmetric flows will affect the axisymmetric meridional circulation, causing time-dependence in the reverse flow cell. We show that a dynamo, operating with such a time-dependent meridional circulation can explain the short-term variability (with periods of the order of a month) in the evolution of faculae around 75-degree latitudes, which have very recently been observed. We present results from various simulation experiments to determine what model conditions best-simulate the facular evolution. We also compare our results with the observations of surface active regions' evolutions as revealed from magnetograms.

### **5. 2021. szeptember 20-24. XVIIth Hvar Astrophysical Colloquium (online)**

#### **Poster: Implications of intermittent high-latitude reverse meridional flow cell on polar field patterns**

Abstract: Sun's meridional circulation has not yet been observed above  $\sim 60$  degree latitudes. If the Sun has non-axisymmetric polar vortices, the meridional circulation is expected to be associated with intermittent reverse flow cell, appearing and disappearing with a certain timescale. Considering a wide variety of time scales of appearances/disappearances, we simulate the short-term variability in polar fields' evolutionary pattern using a flux-transport dynamo model. Based on a number of simulations we performed, we find that the size of this reverse cell primarily influences the length of the cycle, whereas the strength of the cell, and how long it takes to appear, stays up and then disappears again, significantly impact the polar fields' spatio-temporal pattern. For

example, for a short appearance of the reverse flow-cell for 12 days, we find a short-term variability in the polar-field, producing a crisscross type pattern at high-latitudes as observed in polar faculae evolution.

## **6. 2021. november 3. SWATNET Supervisory Board Meeting**

## **7. 2021. november 8-12. SWATNET Summer School**

## **8. 2021. december 13-17. AGU Fall Meeting (New Orleans, LA, USA)**

### **Poster: Interactions Among Magnetic Bands in Extended Solar Cycles**

Abstract: The extended solar cycle, observationally revealed from the evolutions of ephemeral regions, X-ray and EUV brightpoints, plages, filaments and faculae, indicates the existence of oppositely-directed double magnetic bands at the bottom dynamo-layer in each hemisphere. The band-pairs in the North and South hemispheres migrate towards the equator and plausibly evolve in amplitude as the cycle progresses. By studying the MHD interactions of these band-pairs among themselves in each hemisphere, as well as with their opposite-hemisphere's counterparts, we show that the cross-equatorial interactions between the low-latitude bands (which are essentially the active cycle's bands) in the North and South effectively start when the band-separation across the equator is less than 30 degrees (the bands are at 15-degree latitude or lower in the North and South). Analyzing the properties of this interaction we show how certain changes in the energy extractions by various stresses from the magnetic fields can lead to the start of the declining phase of the solar cycle.

### **Poster: Impact of Time-varying High-latitude Meridional Circulation Cell in Polar Fields**

Abstract: Solar differential rotation, that are governed by (magneto)hydrodynamic processes in the presence of magnetic fields, can produce cyclones and anticyclones, i.e. anticlockwise and clockwise flows, respectively, associated with high and low pressure regions. These swirls at high-latitudes may or may not be very tightly confined at the poles; they may not be exactly circumpolar either, instead they can be obliquely rotating about the polar axis. Nonetheless, these non-axisymmetric swirling plasma near the poles would cause time-varying reverse flow components to appear and disappear in the mean meridional circulation. By incorporating several plausible time-varying reverse, high-latitude flow cells extending from solar pole down to about 60-degree latitudes, we perform a number of numerical experiments to simulate polar fields in a flux-transport dynamo model. Solar faculae may act as test particle dye markers in fluids. We use observed faculae to deduce information about the flow patterns and dynamics of the near-surface region of the Sun. We estimate the short-term variability in polar faculae evolutionary pattern. Our simulation-results indicate that a much faster appearance and disappearance of a strong reverse flow cell, approximately with a time-scale of a couple of weeks, can successfully reproduce the short time-scale (e.g., about the monthly) criss-cross type evolutions of polar faculae. Speed, profile and time-variation of meridional flow beyond 60-degree latitudes are less known from observations yet. Long-awaited SOLARIS mission's data for polar regions' flow can validate (or unvalidate) our model-results.

## **9. 2022. április 21 – június 2. MHD International School (European MagnetoHydroDynamics Society)**

## **10. 2022. június 13-17. ISSI - Solar and stellar dynamos: A new era (Bern, Svájc)**

**Meghívott előadó: Global MHD of extended cycle's double magnetic bands: their cross-equatorial interactions**



## **11. 2022. július 11-15. NAM 2022 (University of Warwick, UK)**

**Poster: Extended Solar Cycles Stage (ESCS) investigation of relationship between weak high-latitude toroidal fields and spot-producing low-latitude magnetic bands**

## **12. 2022. szeptember 19-22. Space Climate 8 (Krakkó, Lengyelország)**

**Poster: Role of high-latitude band in the investigation of Extended Solar Cycles Stage (ESCS)**

## **C. Ismeretterjesztés, előadások**

- 1 Public lecture “Journey through the Solar System”, Bernadett Belucz, Lagymányosi Planetárium, Eötvös Lorand University, Budapest (Hungary), 26 October 2018
- 2 “How I became an astronomer” conversation with student of Patrona Hungariae Primary School and High School, Belucz Bernadett, Lagymányosi Planetarium, Eotvos Lorand University, Budapest (Hungary), 13 November 2018
- 3 Public lecture “Journey through the Solar System”, Bernadett Belucz, Lagymányosi Planetárium, Eötvös Lorand University, Budapest (Hungary), 15 November 2018
- 4 Public lecture “Journey through the Solar System”, Bernadett Belucz, Lagymányosi Planetárium, Eötvös Lorand University, Budapest (Hungary), 16 November 2018
- 5 “How I became an astronomer” conversation with student of Patrona Hungariae Primary School and High School, Belucz Bernadett, Lagymányosi Planetarium, Eotvos Lorand University, Budapest (Hungary), 20 November 2018
- 6 “How I became an astronomer” conversation with student of Patrona Hungariae Primary School and High School, Belucz Bernadett, Lagymányosi Planetarium, Eotvos Lorand University, Budapest (Hungary), 23 November 2018
- 7 “How I became an astronomer” conversation with student of Patrona Hungariae Primary School and High School, Belucz Bernadett, Lagymányosi Planetarium, Eotvos Lorand University, Budapest (Hungary), 30 November 2018
- 8 Public talk “Grand Tour of the Solar System”, Visit of the colleagues of the Museum of Natural Sciences, Lagymányosi Planetárium, Eötvös Lorand University, Budapest, (Hungary), 1 December 2018
- 9 Public lecture “The mysteries of the starry sky”, Bernadett Belucz, Lagymányosi Planetárium, Eötvös Lorand University, Budapest (Hungary), 13 December 2018
- 10 I. "University Opens Its Doors" event (Deep Space, Journey through the Solar System lectures), Bernadett Belucz, Lagymányosi Planetárium, Eötvös Lorand University, Budapest (Hungary), 13 December 2018
- 11 Public talk “Following the star of Bethlehem” for Ferencváros Nature Friendly Association, Lagymányosi Planetárium (Hungary), 20 December 2018
- 12 Eotvos Lorand University Open Day event, Bernadett Belucz, Lagymányosi Planetárium, Eötvös Lorand University, Budapest (Hungary) 18 January 2019
- 13 Public lecture, Visit of the Department of Atomic Physics, Bernadett Belucz, Lagymányosi Planetárium, Eötvös Lorand University, Budapest (Hungary), 25 January 2019
- 14 Public lecture, “The mysteries of the starry sky”, Bernadett Belucz, Lagymányosi Planetárium, Eötvös Lorand University, Budapest (Hungary), 28 January 2019
- 15 Public lecture, “The mysteries of the starry sky”, Bernadett Belucz, Lagymányosi Planetárium, Eötvös Lorand University, Budapest (Hungary), 1 February 2019
- 16 Public lecture, Visit of the Department of Atomic Physics, Bernadett Belucz, Lagymányosi Planetárium, Eötvös Lorand University, Budapest (Hungary), 1 February 2019
- 17 II. "University Opens Its Doors" event (Journey through the Solar System lecture), Bernadett Belucz, Lagymányosi Planetárium, Eötvös Lorand University, Budapest (Hungary), 21 February 2019
- 18 Public lecture, Visit of ELTE Alumni, Bernadett Belucz, Lagymányosi Planetárium, Eötvös Lorand University, Budapest (Hungary), 28 February 2019

- 19 Public lecture, Meeting of amateur astronomers, Bernadett Belucz, Lagymányosi Planetárium, Eötvös Lorand University, Budapest (Hungary), 23 March 2019
- 20 III. "University Opens Its Doors" event, Bernadett Belucz, Lagymányosi Planetárium, Eötvös Lorand University, Budapest (Hungary), 25 April 2019
- 21 IV. "University Opens Its Doors" event, Bernadett Belucz, Lagymányosi Planetárium, Eötvös Lorand University, Budapest (Hungary), 2 May 2019
- 22 Planetarium presentations, Summer camp of the Dean's Office of ELTE, Bernadett Belucz, Lagymányosi Planetárium, Eötvös Lorand University, Budapest (Hungary), 10, 24 and 30 July 2019
- 23 Public talk, 50th Annual Meeting of Mathematics and Physics (1969 grade), Bernadett Belucz, Lagymányosi Planetárium, Eötvös Lorand University, Budapest (Hungary), 28 July 2019
- 24 Public lecture, Visit of disabled children to the planetarium, Bernadett Belucz, Lagymányosi Planetárium, Eötvös Lorand University, Budapest (Hungary), 6 September 2019
- 25 Public lecture, Visit of the Pecel High School to the planetarium, Bernadett Belucz, Lagymányosi Planetárium, Eötvös Lorand University, Budapest (Hungary), 13 September 2019
- 26 European Researcher's Night 2019, Budapest (Hungary), 27-28 September 2019
- 27 "Unconventional geography lesson" with student of Patrona Hungariae Primary School and High School, Bernadett Belucz, Lagymányosi Planetárium, Eötvös Lorand University, Budapest (Hungary), 8 October 2019
- 28 "Our life-giving star, the Sun" public lecture, Students of Pilisvörösvár Templom Téri Primary School, Bernadett Belucz, Lagymányosi Planetárium, Eötvös Lorand University, Budapest (Hungary), 14 October 2019
- 29 "Our life-giving star, the Sun" public lecture, Students of Karinthy Frigyes High School, Bernadett Belucz, Lagymányosi Planetárium, Eötvös Lorand University, Budapest (Hungary), 16 October, 6 November 2019
- 30 "Mysteries of the Starry Sky" public lecture, visit of small preschoolers to the planetarium, Bernadett Belucz, Lagymányosi Planetárium, Eötvös Lorand University, Budapest (Hungary), 17-19 October 2019
- 31 I. Astronomical Days in Gyula. Gyula, (Hungary), 26-27 September 2020
- 32 Lecture Bernadett Belucz on the European Solar Telescope during the event "The role of planetariums and demonstration astronomers in the education workshop", Pécs (Hungary), 21-22 November 2021
- 33 Természet Világ 2022 májusi szám: Apokaliptikus napfizika – Magyar kutatók a napfizikai kutatások élvonalában
- 34 Szentivánéj a Fővárosi Növény- és Állatkertben, előadás és kerekasztal-beszélgetés a Napról
- 35 SP2RC szemináriumi előadás a Sheffieldi Egyetemen