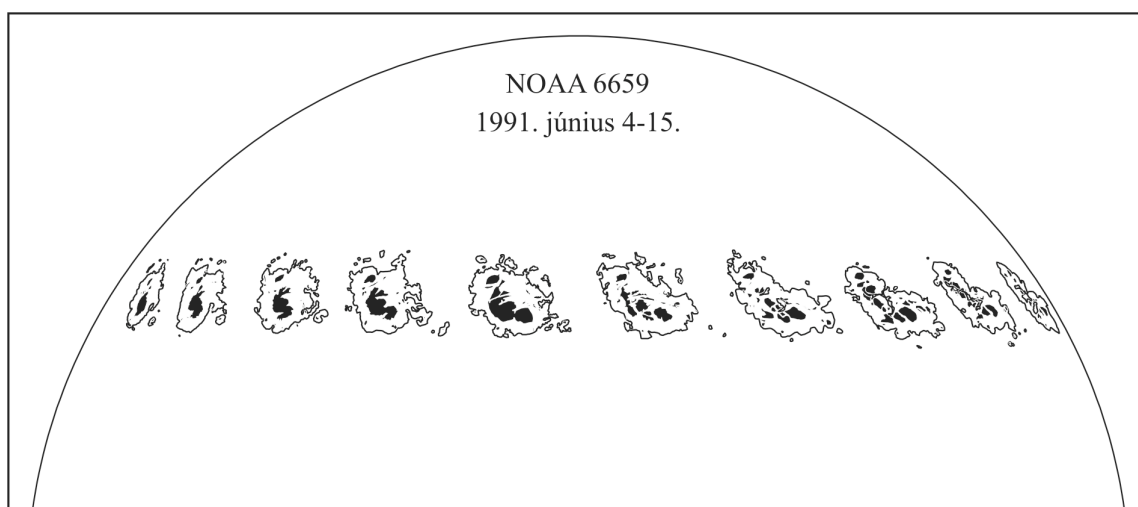


Kálmán Béla

Napfoltok és napfoltcsoportok szerkezete és fejlődése

Az MTA Doktora cím elnyerésére írt disszertáció tézisei



MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézet
Napfizikai Observatóriuma, Debrecen

2008

A kutatások előzménye

A Nap a legfontosabb csillag az emberiség szempontjából, mivel a maghasadás (és a még nem megszelídített magfúzió) kivételével minden földi energia forrása. Sugárzó energiájának időbeli egyenletessége lényeges szerepet játszott a földi élet kialakulásában. Ugyanakkor ennek a hatalmas energiafolyamnak kis ingadozásai is komoly hatással lehetnek a Földre és az emberi technikára. Nem sokkal több, mint egy évszázada ismerték fel az összefüggést a földmágneses aktivitás és a naptevékenység közt. Azóta a technika fejlődése, az űrkutatás megindulása sok más kapcsolatra is fényt derített, amelyeken keresztül a naptevékenység jelentősen befolyásolja kozmikus környezetünket. Ezeket a hatásokat figyelembe kell venni például a rádiózásban, mesterséges holdak üzemeltetésében, emberek űrutazásánál, műholdas navigációban. A naptevékenység kutatásának tehát komoly gyakorlati jelentősége van.

Másrészt a Nap kutatása az asztrofizika számára is jelentős. Ez az egyetlen csillag, amelyen közelsége miatt néhány száz kilométeres részleteket is meg lehet különböztetni, légkörének felépítését, az abban zajló folyamatokat tanulmányozni. Mivel a Nap átlagos csillag, általános felépítését már jól le tudják írni a korszerű csillagmodellek, ezek ellenőrzésére használható. A Nap fontos laboratóriuma a plazmafizikának is, ahol az elméletileg elképzelt jelenségeket a gyakorlatban tanulmányozni lehet.

Ugyanakkor bár egy különálló, szabályos napfolt szerkezetére már léteznek jó modellek, igazán csak az umbra érthető. A penumbraszálakban a fizikai paraméterek változását csak a mostanában sikerült kimérni, a penumbra szerkezetének jó modellje így még nem létezik. A napfoltok keletkezésére, a naptevékenységi ciklus magyarázatára jelenleg leginkább a dinamó-elmélet elfogadott, de az eddigi több ezer publikációból még nem alakult ki egy egységes kép. Főleg az nehezíti az elméletek ellenőrzését, hogy a folyamatok a Nap felszíne, a fotoszféra alatt játszódnak, ahova közvetlenül belátni nem lehet. A felszín alatti folyamatokról legújabbban a hélioszeizmológiai mérések adnak adatokat, de ezeknek a térbeli és időbeli felbontóképessége még elég kicsiny. Mint Rutten (1989) írta, a Napon vannak olyan objektumok, amelyeket megfigyelünk, de természetüket még nem értjük, és vannak olyan objektumok, amelyeket értünk, le tudjuk írni a tulajdonságaikat, viszont abban a formában nem léteznek. Hasonló a helyzet a flerek esetében is, amelyeknél biztos, hogy az aktív vidék mágneses terének energiája fűti igen magas hőfokra a korona és kromoszféra anyagát, erre utal például a flerek alakjának kapcsolata a napfoltcsoport mágneses terének szerkezetével, de a részletes fizikai folyamatok még nem világosak.

A Nap fizikájának megértéséhez elméleti és gyakorlati megközelítésre is szükség van. Az elméleti, szükségszerűen leegyszerűsített objektumokban zajló folyamatok leírhatók, érthetők, a megfigyelések viszont megmutatják a folyamatok teljes bonyolultságát. Ugyanakkor a megfigyelések segítenek feltárni, hogy melyek a megengedhető egyszerűsítések az elméleti modellekben, és megmutathatják azt is, hogy egyes folyamatok és tulajdonságok, amelyeket az egyszerűsített modellek alapján megértettünk, a bonyolult, matematikailag nehezen kezelhető esetekben is érvényesek maradhatnak.

Célkitűzések

A jelen dolgozat a bonyolult napfoltcsoportok tanulmányozásával foglalkozik, ezek szerkezetével és fejlődésével, megfigyelések alapján. A bonyolult szerkezetű napfoltcsoportok száma az összesnek csak kis százaléka, ugyanakkor az aktív jelenségek, főleg a nagy flerek többsége ezekben zajlik. A földi hatások szempontjából a flerek a döntőek, ezért a megfigyelők régóta megkülönböztetett figyelemmel kísérik a nagy, bonyolult napfoltcsoportokat. A napfoltok sajátmozgásának tanulmányozása egyrészt információt nyújt az őket alkotó mágneses erővonalcsövek mozgásáról, másrészt ezek a mozgások alakíthatják ki azokat az instabil mágneses tér-szerkezeteket, amelyek végül a flerek fellobbanásához vezetnek. Eddigi ismereteink szerint általában minden nagy fler bonyolult napfoltcsoportban zajlott, de nem minden bonyolult napfoltcsoport produkált nagy flereket. Kézenfekvő volt tehát a különbségek keresése, hogy melyek azok a tulajdonságok, amelyek a nagyobb fler-aktivitáshoz vezetnek, így az eddig is sokak által vizsgált erősen fler-aktív napfoltcsoportok mellett foglalkozni kell a mágnesesen bonyolult szerkezetű, de kis aktivitást mutató foltcsoportokkal is.

A napfoltcsoportok fejlődésén kívül egyrészt a mágneses tér-vektor szerkezetének tanulmányozása, másrészt a bennük lezajló egyes konkrét aktív jelenségek (flerek, protuberancia-aktivizálódások) részletesebb vizsgálata is hozzásegíthet a napaktivitás folyamatainak megértéséhez, az elméleti modellek közti választáshoz. A Magyar Tudományos Akadémia debreceni Napfizikai Obszervatóriuma 1958 és 1982 közt önálló kutatóintézetként, 1982 óta pedig az MTA Csillagászati Kutatóintézete napfizikai osztályaként világviszonylatban élen jár a napfoltok helyzetének pontos mérésében és ebből a napfoltok mozgásának meghatározásában. A debreceni megfigyelési lehetőségeket lényegesen javította az 1974-ben munkába állított nagy koronográf, amelynek (és a korábban beszerzett Halle H α szűrőnek) a segítségével a flerek részletes megfigyelése is lehetővé vált. Jelen dolgozatban más obszervatóriumokkal együttműködve, más, főleg mágneses, esetenként rádiómegfigyeléseket is bevonva, az utóbbi évtizedben pedig az űrszondák (SOHO, TRACE) észleléseit felhasználva készült vizsgálatok nyomán próbálunk választ adni néhány fenti kérdésre.

Vizsgálati módszerek

A napfoltok mozgásának meghatározásához először pontos pozíciójukat kell megmérni. Ehhez a teljes napkorongot ábrázoló fényképen kell ismerni egy referenciairányt, amihez képest az égi északi irány megadható. Erre a célra rendszerint az objektív fókuszsíkjaiba kifeszített fonálkereszt, vagy ugyanoda elhelyezett két tűske szolgál. Ha a héliografikus (Carrington féle) koordinátákat nagy (0,01 fok) pontossággal kívánjuk meghatározni, akkor nagyon sok torzító tényezőt kell figyelembe venni. A mérési módszer és egyes hibák (referencia irány hibája és annak változása az óraszög és deklináció függvényében, differenciális refrakció, nagyítórendszer disztorziója) figyelembevétele megtalálható jelen sorok írójának kandidátusi disszertációjában. Ez után lett kidolgozva a lemez sík optikai tengelyre merőlegestől való eltérése (kamraferdeség) által okozott hiba

figyelembevétele, ami azért különösen rosszindulatú hiba, mert a napkép körtől való eltérése az eltérési szög négyzetével, viszont a napkorong középpontjának hibája az eltérési szöggel egyenesen arányos. Így a gyakorlatban előforduló kis eltérések esetén a napkép nem torzul észrevehetően, viszont a mért középpont és a tényleges középpont eltérése jelentős lehet.

Az MTA debreceni Napfizikai Observatóriumának műszereit Dezső (1982) írta le. A két fotonéliográf (Debrecenben és az Observatórium gyulai Megfigyelő Állomásán) 13,5 ill. 15 cm objektívátmérőjű, fókusz távolságuk 2 m körüli. A direkt fókuszban keletkező kb. 2 cm-es napképet egy lencserendszer ötszörösére nagyítja. A színi hiba és a fényintenzitás csökkentésére egy fém-interferenciaszűrő van alkalmazva, amely a folytonos színeknek kb. 7 nm széles tartományát vágja ki 450 nm körül. A 14×14 centiméteres kontrasztos, nyomdatechnikai filmre készülő, kb. 10 cm napkép-átmérőjű észlelések egy ASCORECORD 3DP koordinátamérő műszeren kerülnek kimérésre. A műszer elvileg alkalmas lenne 0,1 μ m pontosságra, de az adott célra elegendő a „durva” mérés 0,01 mm-es pontossága, mivel a felvételen nagyjából 0,05 mm felel meg egy ívmásodperc látószögnek. Kezdetben a fényképeken azonosított és napról-napra követett umbrák súlypontja volt kimérve, de a lyukszalagra rögzítés után a későbbi közvetlen számítógépes bemenet lehetővé tette az umbra és penumbra kontúrok körbemérését több ezer ponton, és ezáltal a kontúrok Carrington koordinátarendszerbe való transzformálását. Hasonló technikát a világon senki sem alkalmazott eddig. Az umbrák pozíciója a több napra vonatkozó méréssorozat során hamadfokú spline-függvényekkel lett simítva, a trajektóriák ezek alapján lettek felrajzolva. Az új évezredben már a számítástechnika rohamos fejlődése lehetővé tette fényképek átranszformálását is a heliografikus koordinátarendszerbe, amelyekből mozgóképes animáció készíthető. Ezen az egyes napfoltok mozgása, a foltcsoport általános fejlődése jobban nyomon követhető. Különösen alkalmasak a mozgóképek készítésére a SOHO vagy TRACE űreszközök által készített felvételek, mivel ezek többé-kevésbé rendszeres időközönként készülnek a nap 24 órájában, kihagyás nélkül.

Természetesen az űreszközök méréseiben is megtalálhatók bizonyos szisztematikus hibák, ezek ellenőrzésére, valamint egyes hiányzó megfigyelések pótlására a debreceni fényképek lettek felhasználva. Ezenkívül a nagy felbontás miatt az űrészlelések csak a napfelület kicsiny részét tartalmazzák, és a tapasztalat szerint a tájolórendszer adatai alapján megadott, az egyes képek fejlécében szereplő adatok pontossága is korlátozott, ezért a teljes napképet befogó számítások alapján kapott koordináták pontossága egységesebb, jobb; ehhez köthetők az űrészlelések.

A koordináták kiszámolásánál, különösen a 14 foktól eltérő heliografikus szélességeken figyelembe lett véve a fotoszféra differenciális rotációja is. A Carrington rendszer forgási sebessége u.i. kb. a 14 fokos szélességnek felel meg, ennél kisebb szélességeken a foltok előresietnek, nagyobb szélességeken hátrafelé mozognak a koordinátarendszerhez képest a differenciális rotáció miatt, ez a látszólagos mozgás zavarná a foltcsoporton belüli sajátmozgások áttekintését. A korrekcióra Newton & Nunn (1951) képlete lett felhasználva, lényeges eltérést valamely más formula felhasználása sem hozott volna.

A napfoltok csoporton belüli sajátmozgásában nagyon lényeges szerepet játszik polaritásuk. Esetükben nem az abszolút (északi v. déli) polaritás a meghatározó, hanem a forgásirányhoz képest számított vezető, ill. követő. A mágneses térképeken mindig fejtörést okoz, hogy hogyan legyenek feltüntetve az információk, ugyanis a kétdimenziós térképen, két független változó (x,y, ill. L,B) függvényében néha 3-5 függvényértéket (pl. mágneses tér 3 komponense, radiális

sebesség, fotoszférikus intenzitás) lenne szükséges ábrázolni. Gyakran használt ábrázolási mód pl. a napfoltcsoport fényképén a longitudinális mágneses komponens szintvonalas megjelenítése, a transzverzális tér irányát és nagyságát pedig vonalak irányával és hosszúságával jelzik. A napfoltokat mutató fényképeken a mágneses polaritást számítógépes képfeldolgozással lehet legkönnyebben megjeleníteni. Az alapul szolgáló fekete-fehér fényképet három összetevőre (RGB, vörös-zöld-kék) felbontva, és ezeket különböző módon, a mágneses tér ábrázolandó komponensének adott helybeli értéke szerint modulálva színes képet kapunk, amelyen a piros v. kék szín telítettsége mutatja a polaritást. Ez fekete-fehérben kinyomtatva az eredeti foltcsoport-fényképet adja vissza, mivel a számolásnál az RGB komponensek megfelelő súlyozásával az intenzitás lehetőség szerint megőrzésre kerül. Ez a feltétel ott sérülhet, ahol pl. a longitudinális komponens esetén erős mágneses tér, azaz nagyon tiszta piros v. kék szín fordul elő világos helyen, mivel különösen a kék színnek alacsony az intenzitásértéke. Szerencsére, erős mágneses terek leginkább a sötét umbrákban fordulnak elő, ez a körülmény csökkenti az eltérések lehetőségét. Ez a színes ábrázolásmód sokkal inkább áttekinthetővé teszi a napfoltcsoporton belüli mágneses polaritáseloszlást, mint pl. a fényképekre szuperponált szintvonalak, és különösen jól használható a napfoltcsoportok fejlődését vizsgáló számítógépes animációk során.

A vizsgálatokhoz felhasznált számítógépes programokat mind a szerző írta, gyári programok az eredmények formába öntésére és publikálására voltak csak használva. A szakirodalomban egyedülálló módszer a kontúrmérés napfoltcsoportok esetében, valamint a mágneses tér egyidejű, szintelítettséggel való ábrázolása a fotoszféraképeken [25].

Új tudományos eredmények

1.) A Hale 17644 sz. aktív vidékben lezajló 1981. máj. 16-i 3B/X11 fler megfigyeléseiből, amelyek az elektromágneses színek hullámhossz-tartományában addig páratlan szélességet, 12 nagyságrendet fogtak át (3,87 pm - 6,66 m) egy fler fejlődése végig lett követve a naplégkör teljes magasságtartományában. Jelentős eredmény a látható és a rádióemisszió térbeli egybeesése (9. ábra, 28. o.) 2.1 fejezet, [1], [3], [5]. Kimutatható volt, hogy a flerben az energiafelszabadulás folyamatosan, vagy legalábbis több lépcsőben történt (2.2 fej.) [10].

2.) A NOAA 4263 aktív vidékben az egyik napfolt forgó mozgásából következő mágneses tér-torzulás által felhalmozott energia kiszámolásával kimutatható volt, hogy ez elegendő lehet a bekövetkező fler táplálására (2.3 fej.) [8], [11], [12], [13].

3.) A NOAA 6659 aktív vidékben lezajlott 1991. jún. 15-i fehér fler részletes fotometriai feldolgozásával meg lett határozva ennek területe ($7,91 \times 10^{14} \text{ m}^2$), maximális luminozitása ($6,83 \times 10^{21} \text{ W}$) és összenergiája ($2,7 \times 10^{24} \text{ J}$), ez utóbbi kevéssel marad le az UV Ceti egy megfigyelt flerjének összenergiájától, míg a fler maximális és az UV Ceti nyugodt állapotban mért luminozitása hasonló nagyságrendű (2.4 fej.) [23].

4.) Napfolt-sajátmozgások és magnetogramok egyidejű feldolgozásával sikerült alátámasztani, hogy a fler-aktivitás feltételei közé tartozik a felbukkanó új mágneses fluxus, amely súroló ütközés vagy mágneses nyírás révén kölcsönhatásba lép a már létező öreg mágneses terekkel (1. v. 2. típusú δ -konfiguráció, Zirin & Liggett 1987) [2], [4], [7], [9], [15-18], [20]. A mágneses nyírás meghatározásánál, különösen a napkorong középpontjától távol, fontos a mágneses tér-vektor geometriai korrekciója, a látósugárra merőleges komponens helyett a felülettel párhuzamos komponens használata [6].

5.) A δ -konfigurációjú, felbukkanó mágneses térrel is rendelkező, de aktivitást nem mutató csoportokban az ütközések ellenére nincs mágneses kölcsönhatás, mágneses nyírás (ez a napkoronában látható), sőt, előfordul a mágneses fluxus elsüllyedése [19], [21], [24].

6.) A napfoltcsoportokban gyakran felbukkanó új mágneses fluxus foltjai, kerülhetik is a kölcsönhatást a régi foltokkal, kitérő mozgásokat végezve (NOAA 7216) [21], vagy elsüllyesztve a régi fluxust (NOAA 6850, 7220/22) [24], de előfordulhatnak áramlási jelenségek, súrlódó ütközések, kölcsönhatás és megnövekedett aktivitás is [22].

7.) A napfoltok penumbráját döntően határozza meg a mágneses tér, a penumbra külső határa az elvipartíciós mágneses térerőnél húzódik [25], a penumbraszálak pedig a mágneses tér-vektor által meghatározott függőleges síkban helyezkednek el [14].

8.) A megfigyelt jelenségekből kialakítható egy általános kép a napfoltcsoportok és napfoltok fejlődéséről, az Ω -O- ω hurok-sorozat. A tahoklínából felbukkanó Ω -hurok felső csúcsát a konvekció szétszedi, ez magyarázza a pórusok konvergens mozgását és összeolvadását, a dipól-struktúra kialakulását a nem túl rendezett kezdeti időszakban. A gyökerekről való leszakadás (O-hurok), bipoláris foltcsoport, majd a gyűrűáramlás által stabilizált, de a felszínen úszó, sekély napfolt (ω -hurok) már úszó fadarabként viselkedik a fotoszféra felszínén, szerkezetét legjobban a Jahn & Schmidt (1994) -féle vastag penumbramodell írja le, bomlását pedig a turbulens erózió (Petrovay & Moreno Insertis 1997, Petrovay & van Driel-Gesztelyi 1997) [22].

Irodalmi hivatkozások listája

Dezső, L., 1982, *Solar Phys.* **79**, 195

Jahn, K., & Schmidt, H. U., 1994, *Astron. Astrophys.* **290**, 295

Petrovay, K., & Moreno-Insertis, F., 1997, *Astrophys. J.* **485**, 398

Petrovay, K., & van Driel-Gesztelyi, L., 1997, *Solar Phys.* **176**, 249

Rutten, R. J., 1989, in: Stenflo, J. O. (ed.), *Solar Photosphere: Structure, Convection and Magnetic Fields*, (IAU Symp. No.138), Kluwer, Dordrecht, p.501

Zirin, H., & Liggett, M. A., 1987, *Solar Phys.* **113**, 267

A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

- [1] Ishkov, V. N., Markeev, A. K., Fomichev, V. V., Chernov, G. P., Chertok, I. M., Likin, O. B., Pisarenko, N. F., Valnicek, B., Karlicky, M., Tlamicha, A., Farnik, F., **Kálmán, B.**, 1983, Peculiarities in the development of flare on May 16, 1981 as observed in optical, X-rays and radio waves *Publ. Debrecen Obs.* **5**:193-206.
- [2] **Kálmán, B.**, Nagy, I., 1983, Proper motions in Hale Region 17644 (May 1981) and the May 16 Flare *Publ. Debrecen Obs.* **5**:207-215.
- [3] Fárník, F., Kaastra, J., **Kálmán, B.**, Karlicky, M., Slottje, C., Valnicek, B., 1983, X-ray, H-alpha and radio observations of the two-ribbon flare of 16 May 1981 *Solar Phys.* **89**:355-378.
- [4] **Kálmán, B.**, 1984, Magnetic field structure changes in the vicinity of solar flares *Adv. Space Res.* **4**(7):81-85.
- [5] Ishkov, V. N., Markeev, A. K., Fomichev, V. V., Chernov, G. P., Chertok, I. M., Likin, O. B., Pisarenko, N. F., Karlicky, M., Tlamicha, A., Fárník, F., Valnicek, B., **Kálmán, B.**, 1985, Analysis of the flare of May 16th, 1981 with a complex space-time structure using optical, X-ray data and radio observations *Bull. Astron. Inst. Czech.* **36**:81-96.
- [6] Gesztelyi, L., **Kálmán, B.** 1986, Sunspot proper motions in connection with the white-light flare of 25 April 1984 *Adv. Space Res.* **6**(6):21-24.
- [7] Bumba, V., **Kálmán, B.**, Klvana, M., Suda, J., 1986, Kinematics of the May 1981 flare complex's field decrease (H.R. 17644) *Bull. Astron. Inst. Czech.* **37**:219-226.
- [8] Hofmann, A., Rendtel, J., Aurass, H., **Kálmán, B.**, 1987, Flare and filament activation in an unusually distorted field configuration *Solar Phys.* **108**:151-167.
- [9] **Kálmán, B.**, Nagy, I., 1988, Activity and proper motion in HR 18474 (July 1982) In: Stepanov, V.E. et al.(eds.), *Solar Maximum Analysis*, Novosibirsk, Nauka, pp.38-42
- [10] Ishkov, V. N., **Kálmán, B.**, 1988, Flare Development and Magnetic Fields In: Stepanov, V.E. et al.(eds.), *Solar Maximum Analysis*, Novosibirsk, Nauka, pp.43-46
- [11] Hofmann, A., Rendtel, J., **Kálmán, B.**, 1988, Features of the vector magnetic field and dynamic chromospheric activity, In: Stepanov, V.E. et al.(eds.), *Solar Maximum Analysis*, Novosibirsk, Nauka, pp.263-266
- [12] Hofmann, A., **Kálmán, B.**, 1990, Currents and energy build-up in a flaring curled field configuration *Publ. Debrecen Obs.* **7**:112-113
- [13] Hofmann, A., **Kálmán, B.**, 1991, Electric currents and free energy in a flaring twisted field configuration (NOAA 4263) *Astron. Astrophys.* **241**:203-208.

- [14] **Kálmán, B.**, 1991, Vector magnetic field measurements and penumbral structure *Solar Phys.* **135**:299-317.
- [15] Schmieder, B., Demoulin, P., Hagyard, M., Machado, M. E., Ai, G., Zhang, H., Fu, Q., Li, Z., Luan, T., **Kálmán, B.**, and Györi, L., 1993, Relationship between Magnetic Field Evolution and Flaring Sites in AR 6659 in June 1991. *Adv. Space Res.* **13(9)**:123-126.
- [16] Bumba, V., Klvana, M., **Kálmán, B.** and Györi, L., 1993, Evolution, Activity, Magnetic Fields, Line of Sight and Proper Motions in the Solar Active Region NOAA 6659 (June 3-16, 1991) *Astron. and Astrophys.* **276**:193-210.
- [17] Schmieder, B., Hagyard, M., Ai, G., Zhang, H., **Kálmán, B.**, Györi, L., Rompolt, B., Demoulin, P. and Machado, M.E., 1994, Relationship between Magnetic Field Evolution and Flaring Sites in AR 6659 in June 1991. *Solar Phys.* **150**:199-219.
- [18] Bumba, V., Klvana, M., **Kálmán, B.** and Györi, L., 1993, Line of Sight and Proper Motions in the Flaring June 1991 (NOAA 6659) Active Region. in: Zirin, H., Ai, G. and Wang, H. (eds), *The Magnetic and Velocity fields of Solar Active Regions*, (Proc. of the 141. IAU Coll.), ASP Conf. Ser. Vol. 46., pp.373-376.
- [19] Bumba, V., Klvana, M., and **Kálmán, B.**, 1994, NOAA 6850: an Inactive Delta Configuration and its Magnetic and Velocity Fields *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **109**:355-373.
- [20] Fontenla, J. M., Ambastha, A., **Kálmán, B.** and Csepura, Gy, 1995: The magnetic evolution of AR 6555 which led to two impulsive, relatively compact, X-type flares *Astrophys. J.* **440**:894-906.
- [21] Bumba, V., Klvana, M. and **Kálmán, B.**, 1996, Doppler and proper motions accompanying formation of an additional magnetic flux in the mature solar active region (NOAA 7216) *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **118**:35-46.
- [22] **Kálmán, B.**, 1997, Flow patterns around old sunspots and flare activity *Astron. Astrophys.* **327**:779-785.
- [23] Babin, A. N., Baranovskij, Eh. A., Koval' A. N., **Kálmán, B.**, O. Gerlei, 1998, The white-light flare of 15 June 1991: observations and model calculations *Kinematika Fiz. Nebesn. Tel* **14**:330-341.
= *Kinematics Phys. Celest. Bodies* **14**:253-261.
- [24] **Kálmán, B.** 2001, Submergence of magnetic flux in interaction of sunspot groups *Astron. Astrophys.* **371**:731-737.
- [25] **Kálmán, B.** 2002, On the outer boundary of the sunspot penumbra *Solar Phys.* **209**:109-117.