

3. Foltcsoportok mágneses szerkezete

Mivel a napfoltok végső soron a felszínre bukkanó mágneses tér következményei, logikus megvizsgálni a mágneses tér szerkezetét mind az egyes foltokban, mind pedig a napfoltcsoportokban. Már Hale & Nicholson (1938) alapvető vizsgálataikban kiderítették a napfoltok és a napfoltcsoportok alapvető mágneses tulajdonságait. A napfoltokban kimutatták, hogy az umbrában a mágneses tér közel merőleges a felszínre, tehát az umbrák egyértelműen az adott ciklusra és féltekére nézve vezető (p) vagy követő (f) polaritásúakra oszthatók. A foltcsoportok esetében bevezették a jelenleg is használt Mt Wilson mágneses osztályozást, mely a mágneses tér eloszlását jellemzi a foltcsoporton belül. Alapvetően három csoportot különböztettek meg: α – unipoláris foltok, β – bipoláris foltcsoportok, amelyekben a vezető és követő rész a polaritásoknak megfelelően elkülönül, és γ – kevert polarítások, bonyolult mágneses szerkezet. A görög betűhöz még tartozhat egy p vagy f , amely a megfelelő mágneses polaritás túlsúlyát jelöli. Az eredeti Mt Wilson vizsgálat szerint a foltcsoportok 41%-a α , 58%-a β és 4%-a γ mágneses konfigurációjú. Később, a napfoltcsoportok fler-aktivitásának tanulmányozásakor kiderült, hogy a mágneses bonyolultság nagyobb aktivitással jár, sőt Künzel (1960) bevezetett még egy típust, a δ -konfigurációt, amely különösen aktívnek bizonyult. Az ilyen napfoltcsoportokban ellentétes polaritású nagyobb umbrák egymás közvetlen közelében, azonos penumbrában figyelhetők meg. Ebben a részben mutatunk példákat aktív és passzív bonyolult napfoltcsoportokra, (bár részletesebb bemutatásuk a következő részben történik), és részletesen tanulmányozzuk a mágneses tér szerkezetét és szerepét a napfoltok és csoportok morfológiájában.

3.1. Mágneses tér-szerkezet és aktivitás

A napfoltcsoportok fler-aktivitásának statisztikai vizsgálatát a Nemzetközi Geofizikai Év hatalmas megfigyelési anyaga tette lehetővé (Smith & Smith, 1963). Ekkor derült ki, hogy a bonyolult mágneses szerkezetű (γ -konfigurációjú) csoportokban lényegesen gyakrabban fordulnak elő flerek, ráadásul lényegesen nagyobbak, és felmerült az igény egy újabb kategória létrehozására, ez lett az előbb említett δ . Rögtön a δ -konfiguráció bevezetése után már hoztak ellenpéldát is, amelyben a foltcsoport nem volt aktív, igaz, itt a δ szerkezet mozgások révén alakult ki. A későbbiekben Zirin & Liggett (1987) vizsgálták a δ -csoportokat. Szerintük az ú.n. „sziget-delta” csoportok a különösen aktívak, amelyekben egy közös penumbrában egymás közvetlen közelében mozognak különböző polaritású umbrák, vagy ha egy nagy vezető polaritású (p) folt penumbrájában bukkannak fel új dipólok. Shi & Wang (1994) szerint a 22. ciklus δ -csoportjai közül a mágnesesen kiegyensúlyozatlanok voltak aktívak.

Az általános konfiguráción kívül a mágneses tér részleteit tanulmányozták a kutatók, hogy a fler-aktivitás okait megtalálják. Erre különösen a vektor-magnetográfok megjelenése után nyílt mód. Az 1980-as években a NASA MSFC napfizikai csoportja vezette be a „mágneses nyírás” (magnetic shear) fogalmát (Hagyard et al, 1984). Egyszerű, potenciális (árammentes) mágneses teret feltételezve a mágneses erővonalak úgy kötik össze az ellentétes mágneses pólusokat (bipoláris napfoltcsoport), hogy az erővonalak nagyjából merőlegesek a polaritáselválasztó vonalra. Hagyard és társai azt vették észre, hogy az aktív

foltsoportokban a transzverzális mágneses tér iránya a polaritáselválasztó vonalra nemhogy merőleges nem volt, hanem egyes esetekben majdnem párhuzamos. Ez azt jelentette, hogy a mágneses tér erősen eltér a potenciálistól, azaz szabad energiát tartalmaz, áramok formájában. Ezeket az áramokat (pontosabban a longitudinális komponensüket) is ki lehet számolni a mágneses vektor észlelésekből (l. 2.3 fejezet), és kapcsolatba is hozták a fler-aktivitással, de egyrészt az áramok számítása eléggé függ a transzverzális mágneses komponens hibákkal terhelt méréseitől, másrészt a teljes mágneses áramvektor sem határozható meg, ezért egyértelmű következtetések nem vonhatók le.

A mágneses nyírás létrejöhet például mechanikus nyíró mozgás következményeként, amikor ellentétes mágneses polaritású umbrák antiparallel mozognak el egymás mellett, vagy sűrűlődoan ütköznek. Erre jó példa a Hale Region 17644-ben 1980. máj. 16-án lezajlott 3B/X1 fler. Ebben az esetben a nagy napfoltsoport középső részében, a polaritáselválasztó vonalnál alakult ki δ -szerkezet, és itt az umbrák kezdetben ellentétesen, majd a fler után párhuzamosan mozogtak a polaritáselválasztó vonal mentén, annak két oldalán [20].

Mágneses nyírás létrejöhet olyan esetben is, amikor két ellentétes polaritású umbra közeledik egymáshoz. Ebben az esetben, amikor mechanikus nyíró mozgás nem történik, a közeledő umbrák kölcsönhatása halmoz föl helyzeti energiát áramok formájában, aminek jele a mágneses nyírás, a vízszintes komponens közel párhuzamossága a függőleges komponens nullvonalával, és az erősen S alakú (szigmoid) polaritáselválasztó vonal.

A mágneses nyírás vizsgálata esetében lényeges lehet a perspektivikus torzítások kiküszöbölése, a látósugárirányú (longitudinális) és a látósugárra merőleges (transzverzális) mágneses tér-komponensek átszámítása a fotoszférára merőleges (függőleges, vertikális) és azzal párhuzamos (vízszintes, horizontális) komponensekre [10]. Erre példával szolgálhat a NOAA 4474 aktív vidék esete [24]. Ebben az 1984. ápr. 25-i 3B/X13.0 fehér fler körülményei lettek megvizsgálva, a napfolt-umbrák sajátmozgásai (Gesztelyi Lídia mérései, Nagy Imre koordináraszámolásai), perspektívára korrigált napfoltrajzok (debreceni és Hida Observatory, H. Kurokawa) valamint NASA MSFC vektor-magnetogramok alapján (M. Hagyard). Az umbrák mágneses polaritás-eloszlásából azonnal kiderült, hogy a NOAA 4474 számmal jelzett aktív vidékben a kezdetekben legalább négy, és végül legalább hat bipoláris napfoltsoport volt található. A komplexum követő (keleti) részén helyezkedett el a tulajdonképpeni aktivitás centruma, közös penumbrában számos nagyobb umbra, amelyek két bipoláris struktúrát alkottak. A két dipól széttartó mozgást végzett, és ápr. 26-án 12:00 UT-re szétvált. Míg a keleti dipól nagy, ellentétes polaritású umbrái viszonylag távol maradnak egymástól (a közös penumbra ellenére), addig a nyugati umbrák kezdetben egymáshoz közeledő, majd nagyjából a fler idejétől és helyétől kezdve a polaritáselválasztó vonallal párhuzamos mozgást mutatnak. Itt a közeledő, ellentétes polaritású umbrák okozhatták a mágneses nyírás kifejlődését a nyugati dipólszerkezetben. A vektormagnetogramokon a keleti dipólban is megfigyelhető volt a longitudinális polaritáselválasztó vonallal párhuzamos transzverzális mágneses komponens, ami a mágneses nyírásra utalna, mint azt Hagyard és Rabin (1986) meg is említi. Mivel azonban az aktív vidék a fler idején még meglehetősen kint, a keleti peremen ($E50 L_{CM}$ -nél) tartózkodott, a Hagyard és Rabin (1986) által 2 és 4 számmal jelzett területeken alapvetően különbözött a helyzet. A keleti dipólban (2) csak a nagy umbra szétterülő mágneses terének

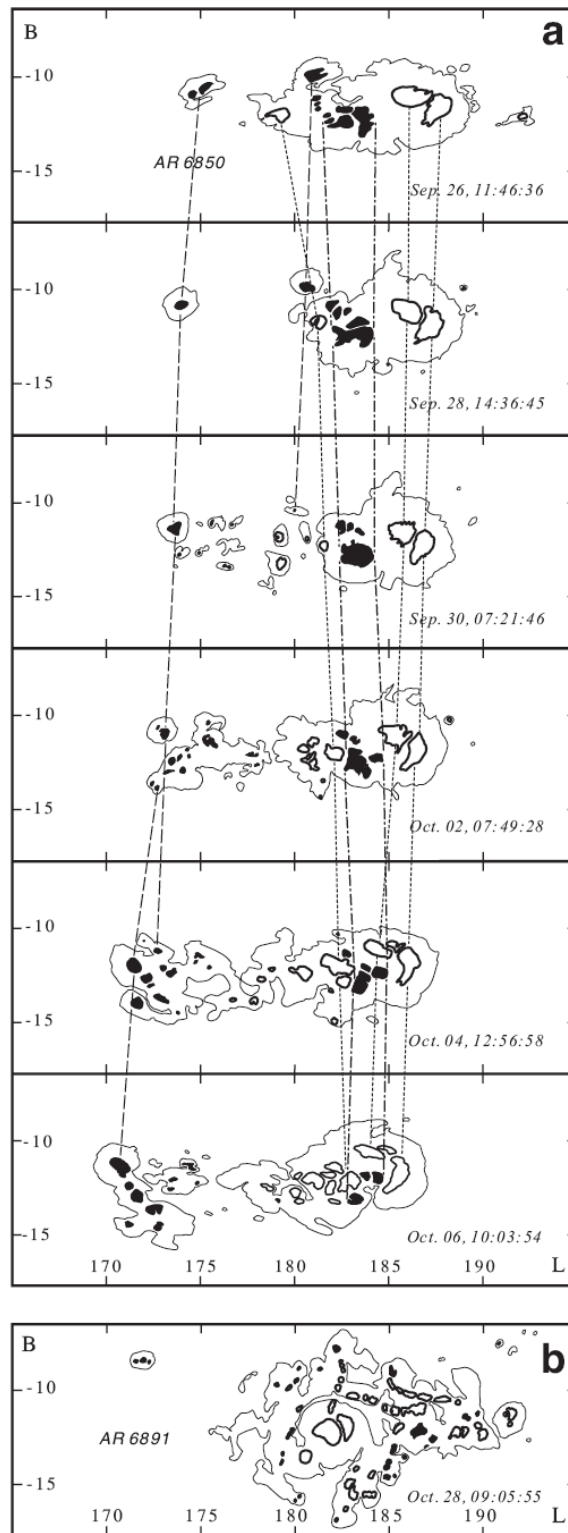
perspektíva okozta vetülete miatt párhuzamos a transzverzális mágneses tér-komponens a polaritáselválasztó vonallal, míg a nyugati dipólban (4), ahol később a nagy fler is bekövetkezik, valóban deformált, nem-potenciális a mágneses tér, valódi mágneses nyírás figyelhető meg.

A flerek és a mágneses tér-struktúra kapcsolatában megemlíthető még, hogy bármennyire nagyok is a vertikális tér-komponens gradiensei (δ -konfiguráció), és esetleg a mágneses nyírás, ha a mágneses szerkezet egyszerű dipól, nem lesz nagy aktivitás. A későbbiekben is még többször említésre kerülő NOAA 6659, amely átvonulása két hétben gyakorlatilag kétnaponta produkálta az óriási flereket, az előző rotációban már két, nagy, ellentétes polaritású, közös penumbra-ban egymás közvetlen szomszédságában elhelyezkedő umbrából állt. A penumbraszálak elhelyezkedéséből a mágneses nyírásra is lehetett következtetni, mégsem történt semmi említésre méltó. Ebben a rotációban a napfoltcsoport tiszta dipól jellegű volt (ha nem is kelet-nyugati, hanem észak-déli, tehát szokatlan orientációban). A következő rotációban azonban két lényeges változás is bekövetkezett: egyrészt a foltcsoport centrumában új mágneses fluxus kezdett felbukkanni folyamatosan, másrészt az északkelet-délnyugati dipól mellett állandóan létezett egy stabil kis, f -polaritású umbra, ami deformálta a dipólteret (C -vel jelölve [41]-ben). Korábbi nagy flerek esetében is megfigyelhetők voltak ilyen „kibic” umbrák, pl. 11-12 jelű [15], 99 jelű [24], 8 jelű [31], vagy 1 jelű Gesztelyi et al. (1986)-ban.

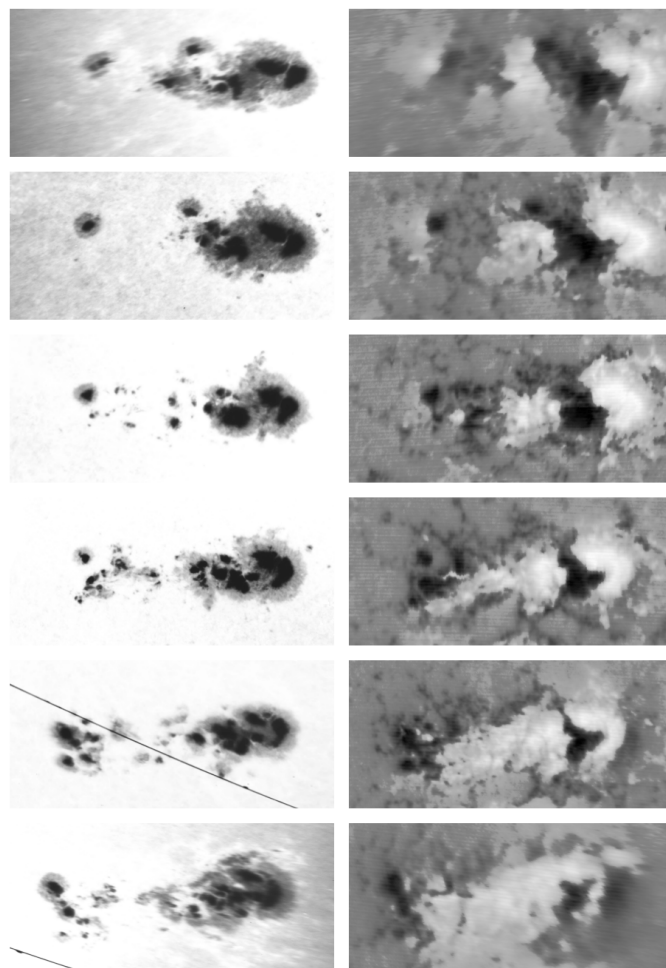
3.2. Mágneses tér eltűnése foltcsoport fejlődése közben

A napfoltok mágneses terének megszűnése komoly probléma, mióta Cowling (1946) kimutatta, hogy a Nap-plazma fizikai állapotát (mágneses tér, elektromos vezetőképesség) figyelembevéve, élettartamukra kb. 300 év adódik. Mivel az ohmikus disszipáció nem okozhatja a fotoszférikus mágneses terek eltűnését, valamilyen más mechanizmus (rekonnekció, turbulens erózió, lesüllyedés, kitágulás, kilökődés) kell, hogy szerepet játsszon. A rekonnekciót feltételezik a flerek energiaforrásának, ezenkívül szerepet játszhat a mágneses tér kitágulásában és kilökődésében is (Priest & Forbes 2000), bár a nagy flerek hatása a napfoltok mágneses terének csökkenésére még vitatott. A turbulens erózió fontos folyamat lehet az öreg, egyedülálló nyugodt napfoltok felbomlásában (Petrovay & Moreno-Insertis 1997), viszont fejlődő, bonyolult napfoltcsoportokban más folyamatok is előfordulnak. Több esetben leírtak olyan mágneses fluxus csökkenést, amelyet a tér lesüllyedésével magyaráztak (Rabin et al. 1984, Zirin 1985, Garcia de la Rosa & Collados 1987, Wang 1992). A bonyolult napfoltcsoportok vizsgálati programja során két aktív vidékben (NOAA 6850, ill 7220/22) is megfigyelhető volt a mágneses fluxus csökkenése a tér lesüllyedése révén [56].

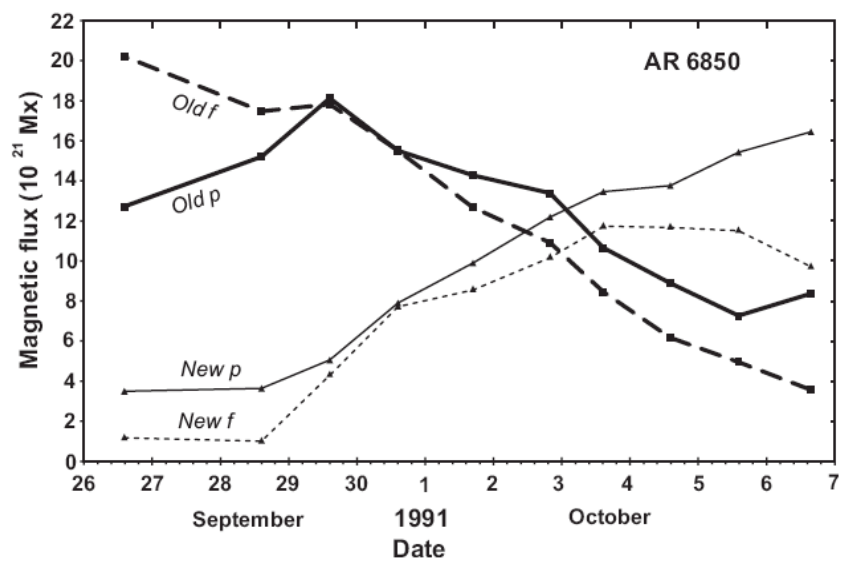
Az aktív vidékek vizsgálatához debreceni fotohéliogramok, Kitt Peak-i magnetogramok és YOHKOH napkoronaészlelések lettek felhasználva. A foltcsoportok fejlődését kontúrmérések és a NOAA 6850 esetében egy SONY videokamerával digitizált debreceni észlelések Carrington koordinátarendszerbe való átszámolásával végeztük, a magnetogramok esetében ugyancsak. A NOAA 7220/22 esetében a 12 észlelési napra mindössze 5 magnetogram állt rendelkezésre, ezért a mágneses fluxusok helyett az egyes részek penumbra-összterületét vizsgáltuk az idő függvényében.



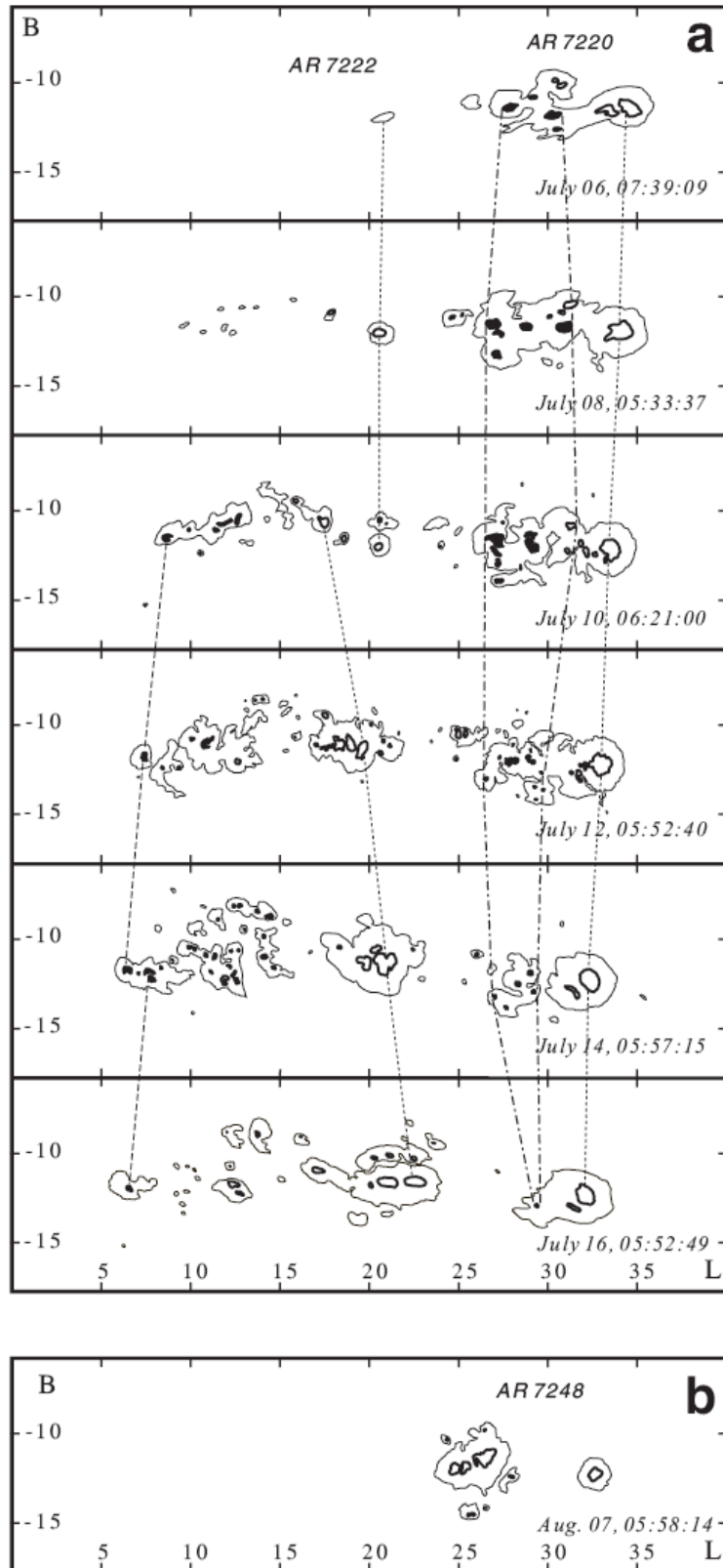
14. ábra. a.) A NOAA 6850 aktív vidék kontúrmérései, vékony kontúr – penumbra, vastag kontúr – umbra, f-polaritás fekete. Egyes umbrák függőlegesen össze vannak kötve, a mozgások hangsúlyozására, a pont-vonalas összekötés mutatja az alámerülő f-polaritású részt. b.) A napfelület ugyanazon területe, egy rotációval később, a NOAA 6891 komplex aktív vidékkel, amely a nagy p-umbrák maradványaiból, és az őket körülfoló, észak-déli orientációjú új fluxusból áll.



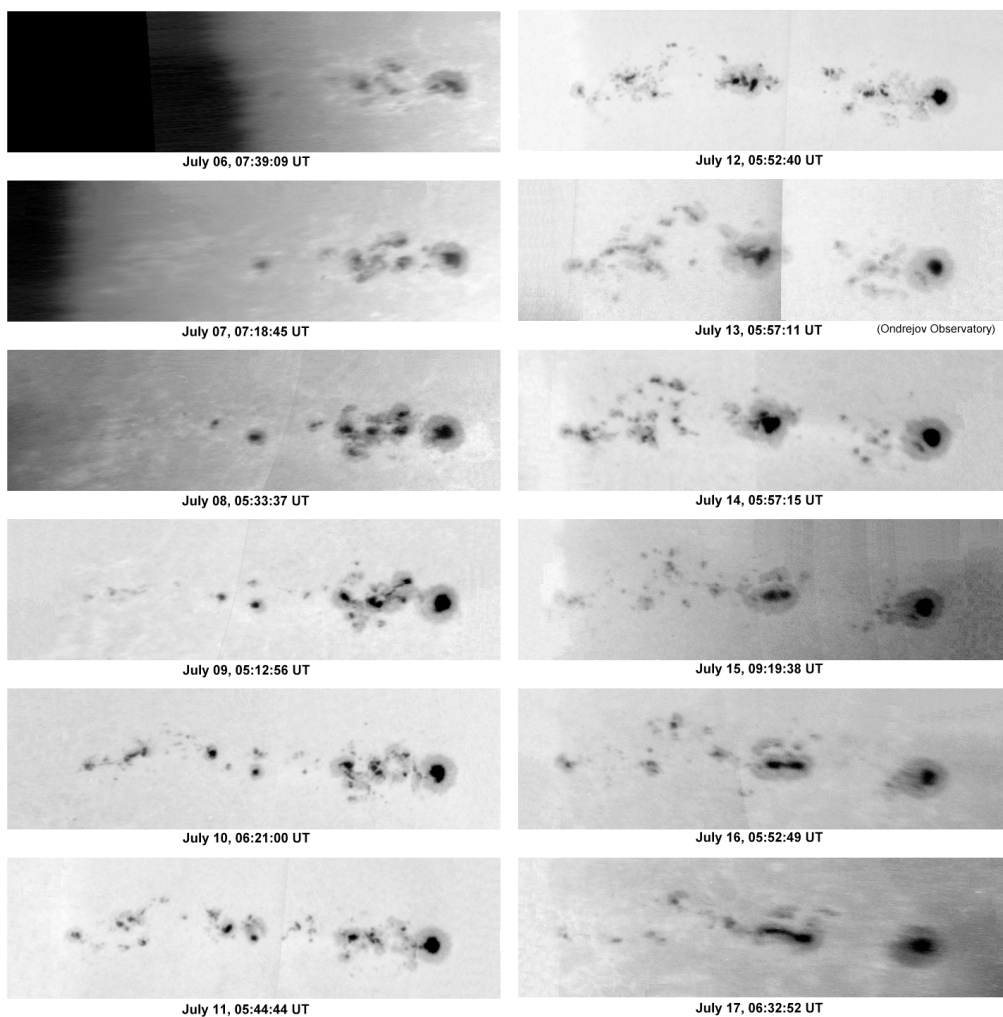
15. ábra. A NOAA 6850 aktív vidék 1991. szept. 26, 28, 30 és okt. 2, 4, 6-án. Baloldalt debreceni fotografikus, jobboldal Kitt Peak-i mágneses észlelések, transzformálva a Carrington koordinátarendszerbe. Jól látható a követő (fekete) polaritás alámerülése a nyugati (jobboldali) részen.



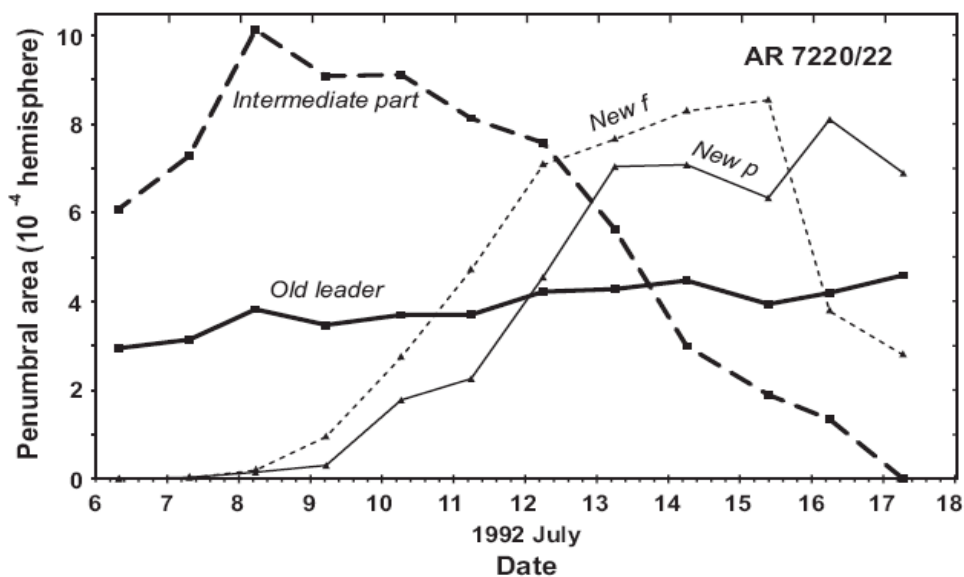
16. ábra. A NOAA 6850 aktív vidék különböző eredetű mágneses fluxusainak változása az idővel.



17. ábra. a.) A NOAA 7220/22 aktív komplexum fejlődése, a 14. ábrához hasonlóan bemutatva. b.) A fotoszféra ugyanazon területe egy rotációval később, a két p-foltból képződött pszeudo-bipoláris (de ugyanolyan polaritású umbrákból álló) napfoltcsoporttal.



18. ábra. A NOAA 7220/22 komplexum fejlődése debreceni, Carrington-rendszerbe transzformált felvételeken (a júl. 13-i felvétel onrejovi, V. Bumbától).



19. ábra. A NOAA 7220/22 aktív komplexum különböző mágneses struktúrákhoz tartozó területeinek változása a fejlődés során. Vastag szaggatott az eltűnő rész.

A két aktív vidék fejlődését és foltmozgásait az ábrák mutatják. A lényegét tekintve mindkét esetben pontosan a meglévő napfoltcsoport tengelyében felbukkan egy új bipoláris napfoltcsoport, a NOAA 6850 esetében a foltcsoporton belül, a 7220/22 esetében közvetlenül mögötte. Az új aktivitás a szokásos mozgást mutatja, p umbrák gyorsan előre, f umbrák lassabban hátrafelé. Eközben az új foltok ütköznek a régiekkel és deformálják azokat. A 6850 aktív vidékben a meglévő f -polaritás beszorul a régi, álló és új, előre nyomuló p -polaritás közé, és eközben lassan elsüllyed. A folyamat során kb. 16×10^{21} Mx mágneses fluxus semmisül meg. Az öreg, kettéosztott p umbra is deformálódik, csökken, de ez csak 4×10^{21} Mx fluxuscsökkenés az első és utolsó mérés közt. Ez az umbra a következő naprotációban is megmarad, mint egy nagyon bonyolult és aktív δ -foltcsoport központi, stabil foltja.

A NOAA 7220/22 aktív vidék esetében a meglévő 7220 mögött keletkező 7222 előremozgó kettős p -umbrája elsüllyeszti a 7220 stabil és változatlan vezető foltja mögött lévő bipoláris mágneses fluxust. Mágneses mérések híján itt a penumbra-területeket véve alapul, kb. 1000 m.s.h. foltterület tűnik el 10 nap alatt. A következő naprotációban csak a két foltcsoport p -foltjai maradnak meg, látszólag egy bipoláris, valójában azonban két p -polaritású foltból álló csoportot alkotva.

3.3. A penumbra és a mágneses tér kapcsolata

A napfoltokban a penumbra jelenleg a legkevésbé értett rész (Priest, 1982). Az umbra fizikai viszonyai érthetőek, itt a felszínre közel merőleges mágneses tér elegendően erős ahhoz, hogy a külső rétegekben az energiát elsősorban a felszínré szállítás konvekciót teljesen leállítsa, ezáltal kevésbé melegszik, ezenkívül a mágneses tér mentén különböző (Alfvén, magnetoakusztikus, stb.) hullámok révén energia tud továbbjutni a kromoszférába, ezért jobban is hűl. A penumbrában a mágneses tér gyengébb, a felülettel akár párhuzamos is lehet. A penumbra átlagban is világosabb az umbránál, viszont strukturált, többnyire radiális irányú világosabb és sötétebb szálakból áll, amelyek épp a földi távcsövek felbontóképesége határának megfelelő szélességűek ($<1''$). Ezekben a szálakban mind spektroszkópiailag, mind morfológiailag sugárirányú mozgások figyelhetők meg. Nem csoda, hogy az első jóminőségű penumbra-fényképfelvételek 1957-ben a légkör zavaró hatása nélkül, a Stratoscope I nevű ballon-távcsővel készültek kb. 20 km magasságból (Danielson 1961). Manapság aktív optikával és/vagy számítógépes képjavító eljárásokkal a földfelszínről is elég jó képeket lehet készíteni, azonban ezek időbeli felbontóképesége még nem igazán jó. Így is lényeges felfedezéseket hozott a kanári szigeteki svéd vákuum-távcső (SVST), amelynek felvételein megkülönböztethető volt, hogy egyes fényes penumbraszálaknak sötét a közepe (Scharmer et al., 2002). Áttörést hozhat a 2006 végén felbocsátott Hinode (Solar B) mesterséges hold, amelynek 0,5 méter átmérőjű távcsőve $0,2''$ felbontású fényképeket és magnetogramokat képes készíteni néhány másodperces időbeli felbontással. Az első eredmények igazolták a sötét és világos penumbraszálak mágneses terének különböző nagyságát és irányát (Bellot Rubio et al., 2007).

A fő érdekességet a penumbrában az okozza, hogy a magnetohidrodinamika befagyási tétele szerint a mozgások csak a mágneses erővonalak mentén történhetnek (ez jól megfigyelhető pl. a protuberancia-csomók esetében),

ugyanakkor a penumbrában a mágneses tér elég nagy szöget zár be a felszínnel, viszont a penumbraszálak hajlásszöge elég kicsi a fotoszférához. A fizikai folyamatok tisztázásához ezért érdekes lehet összehasonlítani a mágneses tér-vektor és a penumbraszálak egymáshoz viszonyított irányát [38].

A mágneses tér felülethez viszonyított szögét a penumbrában többször meghatározták, először Hale & Nicholson (1938) úttörő munkájukban. A látósugár irányú és arra merőleges mágneses tér-komponenseket is mérve azt az eredményt kapták, hogy a napfolt-umbrák közepén a mágneses tér közel merőleges a felszínre, a folt tengelyétől kifelé haladva ez a szög egyre kisebb, a penumbra külső peremén 0° -ra csökkenve. Az adott vizsgálatban ismét lényeges a különbségtétel a longitudinális – transzverzális, ill. függőleges – vízszintes komponensek közt. E részben a mágneses tér és a felszín közti szög (γ) lesz használva, amely $\pm 90^\circ$ közt változik, ellentétben az általában használt 0° és 180° közt változó, a napfelület normálisától mért szöggel. A vizsgálat esetében nincs jelentősége, ha a mágneses tér iránya 180° -kal megfordul, ezért a γ szög abszolút értéke van felhasználva, $0^\circ \leq \gamma \leq 90^\circ$. A mágneses tér-vektor longitudinális és transzverzális komponenseiből, valamint a mérés helyének a napkorongon elfoglalt helyzetéből kiszámíthatók a függőleges és vízszintes komponensek (Adam 1963, [11], Hagyard 1987). Ugyanakkor ezt a számítást nehezíti, hogy fizikai okokból a transzverzális komponens iránya csak $\pm 180^\circ$ -os kétértelműséggel határozható meg. A két irányból rendszerint kiválasztható a megfelelő, bár éppen az érdekes, nem-potenciális helyeken sokszor ez nehézségekbe ütközik. A két lehetőség közti választásban az egyik módszer a (részben) Teller E. által kidolgozott „simulated annealing” eljárást használja [52].

Hale és Nicholson kezdeti mérései után sokan tanulmányozták a mágneses tér szerkezetét a napfoltokban. A korábbi eredményeket Beckers (1981) közli összefoglaló cikkében, az ezutániakat az 1. táblázat tartalmazza:

1. táblázat. A mágneses tér felszínnel bezárt szöge a napfolt-penumbrában

Hivatkozás	Umbra – penumbra határ ($0,42 r$)	Penumbra	Penumbra – fotoszféra határ	Folton kívül	Módszer
Hale & Nicholson, 1938	60°		0°		PH
Bumba, 1960	45°		35°	$r=2,28 \rightarrow 0^\circ$	PH
Stepanov & Gopasyuk, 1962		37°	25°	24°	MG
Severny, 1965		20°			MG
Beckers & Schröter, 1969	49° 38°		0°		PH
Deubner & Göhring, 1970	45°		15°	$r=1,2 \rightarrow 0^\circ$	PH
Kotov, 1970	57°		8°		MG
Adam, 1971	42°				PH
Wittman, 1974	31°		0°		PH
Hagyard et al., 1981	56°		23°		FMG
Kawakami, 1983	48°	31°	15°	$r=1,3 \rightarrow 0^\circ$	PH
Adam, 1990	46°		20°		PH
Lites & Skumanich, 1990	45°	33°	20°	$r>1,2 \rightarrow 0^\circ$	SM
Zirin, 1990		$30-40^\circ$			VMG

Utolsó oszlop rövidítései: PH – fotografikus módszer, MG – Babcock-magnetográf, FMG – filter-magnetográf, VMG – videomagnetográf, SM – Stokesmeter

Mint látható, a korai mérések horizontális mágneses teret ($\gamma = 0^\circ$) adtak a fotoszféra-penumbra határon, míg a későbbiek már $15\text{-}20^\circ$ -os γ értéket találnak. Mindezek a mérések rendszerint szabályos, kerek foltokban történtek.

A szabálytalan, bonyolult szerkezetű foltcsoportok általános szerkezetét csak elvétve vizsgálták, főleg a transzverzális mágneses mérések kalibrációs és értelmezési nehézségei miatt. A krími vektor-magnetográf (Stepanov & Severny 1962) szolgálatba állítása után azonnal Stepanov és Gopasyuk (1962) leírták a foltcsoport általános mágneses szerkezetét: a napfolt mágneses tere egy széttartó erővonalköteg, időnként spirális szerkezettel, azaz nem mindig sugárirányban széttartó. Már az első vektor-magnetográfos észleléseknél kiderült, hogy a transzverzális mágneses komponens iránya és a penumbra finomszerkezetének iránya közt jó egyezés mutatkozik (Kuklin & Stepanov 1963, Tsap 1964), de ezek a napfoltok a korong közepén voltak, ahol a transzverzális és horizontális komponensek egybeesnek. Egy, a napkorong közepétől távolabbi csoport esetében feltűnt, hogy a fehér fényben megfigyelhető szerkezet kevésbé jó egyezést mutat a transzverzális komponens irányával, mint a $H\alpha$ -finomszerkezet (Tsap 1965). Jelen sorok írója két napfoltcsoport átvonulását vizsgálta meg fotografikus és vektor-magnetográfos észlelések összevetésével [6, 7, 10], az utolsó cikkben már a mágneses tér fizikailag értelmezhető, tehát a (héliografikus) függőleges és vízszintes komponensek alapján lett vizsgálva. E felbontás fontosságát a NASA GSFC kutatói is hangsúlyozzák (Venkatakrishnan, Hagyard & Hathaway 1988, 1989, Gary & Hagyard 1990). A vizsgálatokban kiderült, hogy a penumbra finomszerkezete a mágneses tér horizontális, azaz felszínnel párhuzamos komponense irányával esik egybe, ez okozza azt a jelenséget, hogy a látósugárhoz képest transzverzális komponens szerinti irányítottsága leromlik, amint a napkorong közeletről a szélek felé haladunk. Ezt a jelenséget megerősítette Makita et al. (1985) valamint Kawakami, Makita & Kurokawa (1989), bár ők a $H\alpha$ struktúra és a transzverzális mágneses tér egybeesését vizsgálták. Ez motiválta a penumbra finomstruktúra és a mágneses tér kölcsönös irányítottságának újabb vizsgálatát.

Mivel az adott időben még meglehetősen kevés helyen történtek ilyen észlelések, a vizsgálathoz hét saját feldolgozású, négy publikált (Zvereva & Severny 1979, ill. Ikhsanov & Schegoleva 1980) és két megküldött NASA GSFC vektor-magnetográf mérés lett felhasználva 1966. júl. 5 – 1984. ápr. 24. közti időintervallumban, 5 napfoltcsoportról (McMath 8362, 10135, 11482, Hale 17117, NOAA 4474). A mérések zöme (10) a Krími Asztrofizikai Obszervatórium vektor-magnetográfjával készült, kettő a NASA GSFC, egy pedig a Pulkovói Obszervatórium műszerével. Az összehasonlító fotoszféraképek többsége (9) Debrecenben készült, 3 esetben publikált krími észlelések (Steshenko 1969) lettek felhasználva, egy esetben pedig a Sacramento Peak Observatory napfoltképével lett összehasonlítva a mágneses tér. A korábban már publikált saját feldolgozású krími anyag újra lett redukálva, a Kawakami, Makita & Kurokawa (1989) cikkben közölt módszerrel, az összehasonlíthatóság miatt.

A módszer lényege az, hogy a magnetogram letapogatási struktúrája szerint egy átlátszó négyzetrács kerül a fényképekre, úgy, hogy a magnetogram mérési pontjai kerüljenek a cellák középpontjába. A fényképek és a magnetogramok fedésbe hozása vagy a magnetogrammal egyidejű intenzitásmérések, vagy a longitudinális mágneses tér-komponens térképe alapján történt. Minden egyes cellában (magnetogram mérési pontban) meg lett határozva egyrészt a mágneses

tér transzverzális komponensének, másrészt a penumbraszálaknak a letapogatási iránnyal bezárt szöge. Ezekután a megfelelő pontokban (ahol mindkét szögnek volt értéke) egy fok pontossággal ki lett számolva a két irány különbsége (δ), ahol $0^\circ \leq \delta \leq 90^\circ$. E δ szög eloszlásfüggvényének változása lett vizsgálva a héliocentrikus szög (θ) függvényében, oly módon, hogy minden egyes magnetogramra 3 arányszám lett meghatározva: R45 azon cellák száma, amelyekben $\delta \leq 45^\circ$ [$n(\delta \leq 45^\circ)$], osztva azon cellák számával, amelyekben $\delta > 45^\circ$ [$n(\delta > 45^\circ)$], és végül szorozva 45/46-tal. Hasonlóan $R30 = (60/31)(n(\delta \leq 30^\circ) / n(\delta > 30^\circ))$ és $R15 = (75/16)(n(\delta \leq 15^\circ) / n(\delta > 15^\circ))$. A szorzófaktorok 1-re normalizálják ezeket az arányokat δ teljesen véletlenszerű eloszlása esetén. A 2. táblázat összefoglalja ezeket a „beállási arányokat” a napkorong középpontjától való távolodás függvényében:

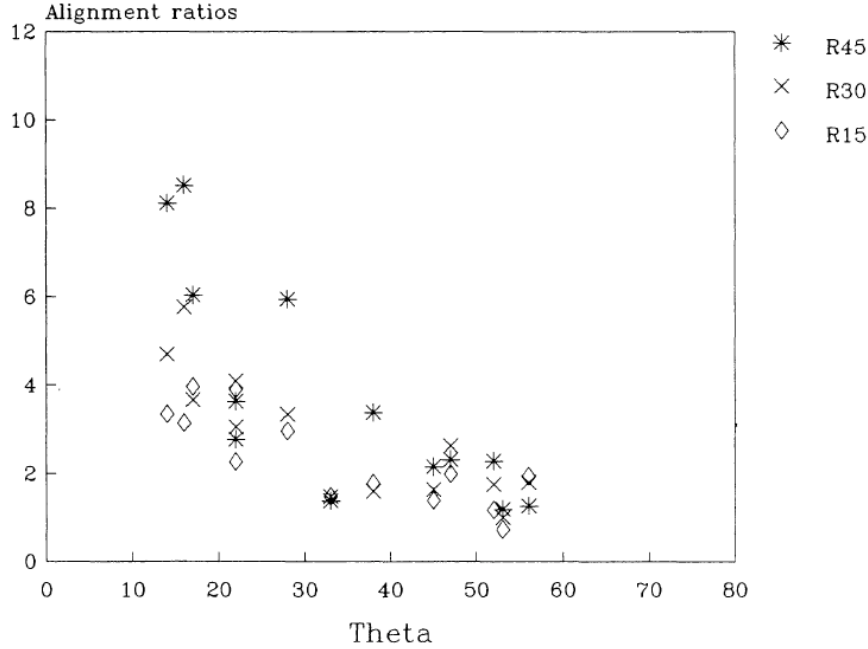
2. táblázat. R „beállási arányok” a napkorong középpontjától való távolság függvényében

Dátum	Távolság a középponttól		Mérésszám (n)	beállási arány		
	fokban (θ)	sugár(ρ)		R15	R30	R45
1969. jún. 10.	14	0,242	195	3,125	4,290	7,478
1980. sep.15.	16	0,276	262	2,939	5,486	7,773
1969. jún. 09.	17	0,292	179	3,689	3,683	5,630
1969. jún. 11.	22	0,375	174	3,969	4,105	3,350
1971. aug. 24.	22	0,375	172	2,167	2,914	2,739
1969. jún. 08.	28	0,470	106	3,030	3,048	5,625
1969. jún. 12.	33	0,545	204	1,415	1,429	1,318
1966. júl. 05.	38	0,616	40	1,897	1,636	3,444
1969. jún. 13.	45	0,707	370	1,336	1,592	2,083
1966. júl. 06.	47	0,731	47	2,121	2,476	2,357
1984. ápr. 24.	52	0,788	974	1,149	1,662	2,183
1969. jún. 14.	53	0,799	157	0,647	0,990	1,151
1966. júl. 07.	56	0,829	48	2,059	1,840	1,286

A 2. táblázat mutatja a három beállási arány változását a középponttól távolodva, megjegyzendő, hogy R15 szoros kapcsolatban van Kawakami, Makita & Kurokawa (1989) „egybeesési arányával” (l. alább). Amennyiben a penumbrastruktúra teljes pontossággal követné a mágneses tér térbeli irányát, mindhárom R végtelen nagyságú lenne, mivel sehol sem lehetne $\delta > 15^\circ$, nem is beszélve $\delta > 30^\circ$, vagy $\delta > 45^\circ$ -ról. Ugyanakkor a táblázatban véges, bár többnyire >1 arányok találhatók. Az is jól látható, hogy ezek az arányok csökkennek a középponttól való távolsággal. A 20. ábra mutatja grafikusan ezt a változást.

Az arányok végeessége lehet a transzverzális mágneses tér-komponens mérési hibáinak következménye is, mivel ez egy elég bonyolult mérés, ami a fény lineáris polarizációját méri. A lineáris polarizációt befolyásolhatja a távcsövön belüli és a légköri polarizáció, ezenkívül négyzetes effektus, tehát jóval kisebb a longitudinális komponens által kiváltott lineáris effektusnál. Az R értékek csökkenése a napkorong széle felé azonban valamilyen szisztematikus hatásra utal. Korábban [10] ki lett mutatva, hogy az irányok egybeesése javul, ha a transzverzális komponens helyett a horizontális komponenssel hasonlítjuk össze a penumbraszálak irányát. Ez természetes, ugyanis a penumbra alapvetően felszíni képződmény, amelynek dőlésszöge a fotoszférához nem haladhatja meg az $5\text{--}10^\circ$ -ot, ellenkező esetben nem látnánk a napfoltok umbráját $\theta = 80\text{--}85^\circ$ héliocentrikus szögek esetén (21. ábra). Másrészt a penumbrában a mágneses tér γ szöge $30\text{--}35^\circ$

körül van (1. táblázat), így a peremhez közel a mágneses tér iránya nem eshet egybe a felszínhez nem annyira erősen hajló penumbrastruktúrával. Ezek a megfontolások egy egyszerű modellhez vezetnek, amely szerint a penumbrastruktúra és a mágneses tér-vektor egyazon függőleges síkban fekszenek.



20. ábra. Az R15, R30 és R45 beállási arányok változása a héliocentrikus szög (Theta) függvényében. Az arányok úgy vannak definiálva (lásd a szövegben), hogy a mágneses tér irányával 15°-nál (vagy 30°-nál, 45°-nál) kisebb szöget bezáró penumbrastruktúrák többletét jellemezzék, úgy normálva, hogy teljesen véletlenszerű eloszlás esetén értékük 1,00 legyen.

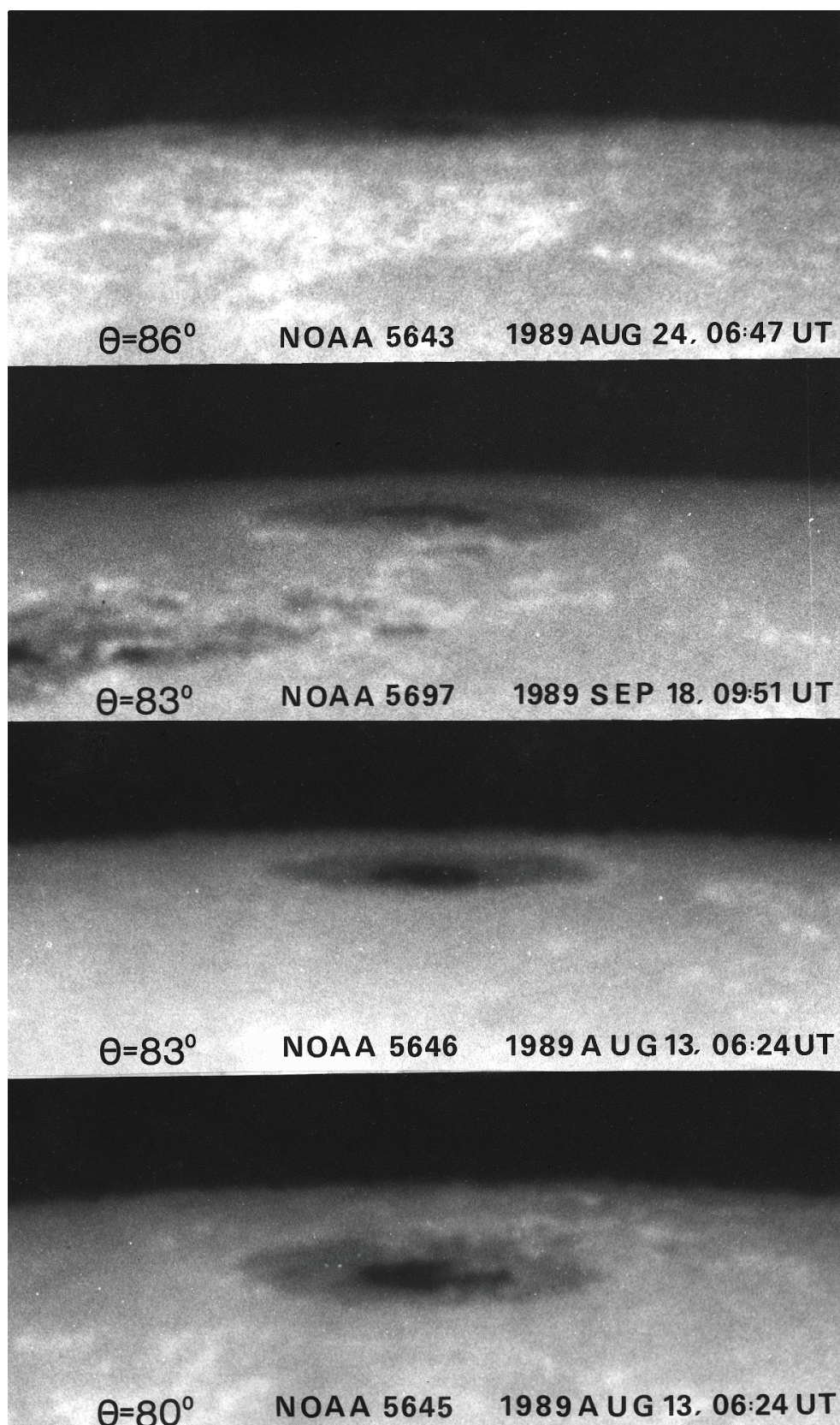
Ezt az egyszerű geometriai modellt használva kiszámítható a δ különbségi szögek eloszlása a képsíkban a radiálisnak feltételezett penumbraszálak képe és a transzverzális mágneses tér-komponens közt, és ezen eloszlás változása a héliocentrikus θ szöggel. Ha a folt helyének héliocentrikus szögtávolsága a napkorong középpontjától θ , a mágneses térnek a napfelszínnel bezárt szöge γ , α pedig a folt középpontjában a napfelszínre helyezett érintősíkban mérve e sík metszésvonala a mágneses tér-vektort tartalmazó függőleges, a folt tengelyét is tartalmazó síkkal és az érintősík metszésvonala a napkorong középpontján, a Nap középpontján és a folt középpontján átmenő síkkal közti szög, akkor ezen adatokból kiszámítható a β_1 szög a képsíkban a mágneses vektor vetülete és a napkorong középpontja felé mutató irány közt:

$$\tan \beta_1 = (\cos \gamma \sin \alpha) / (\sin \gamma \sin \theta + \cos \gamma \cos \alpha \cos \theta).$$

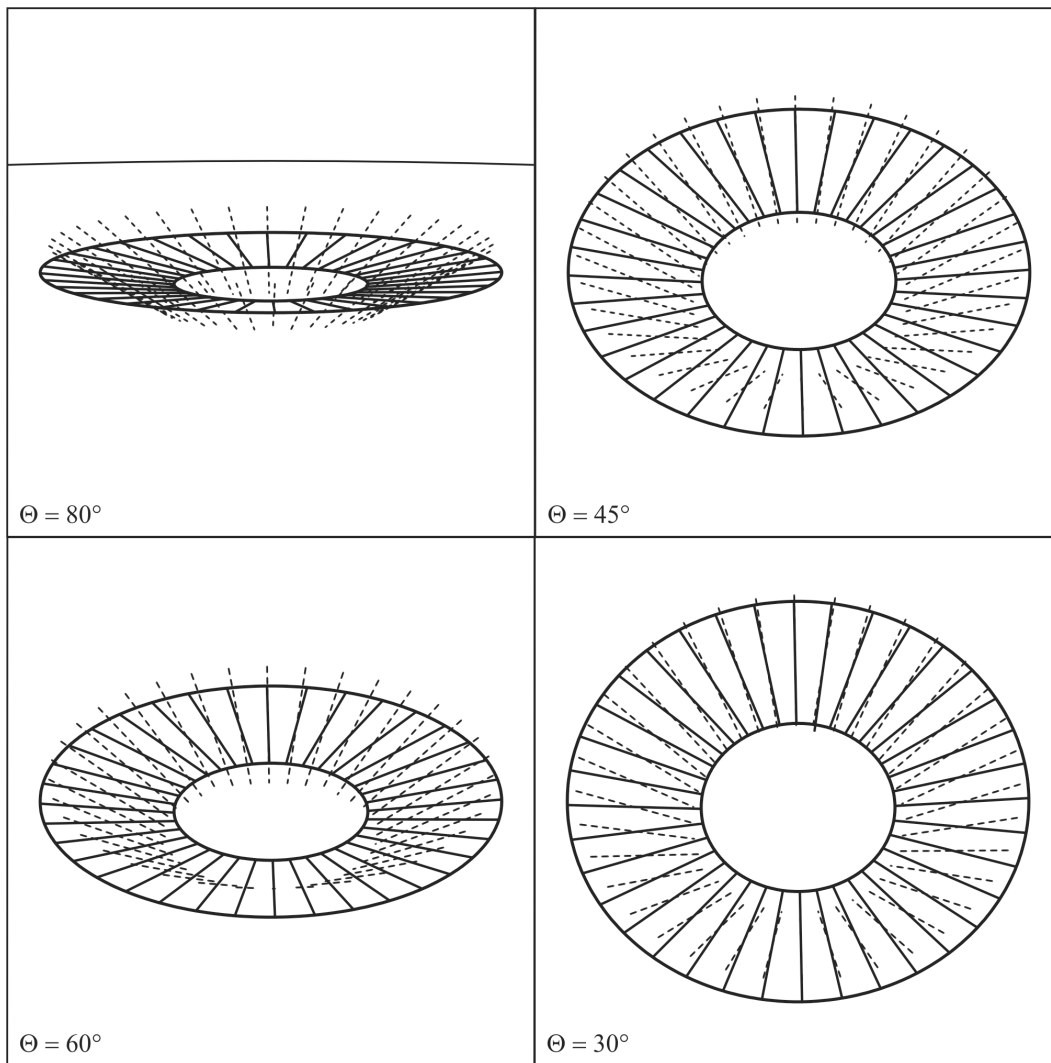
Hasonlóképpen, ha feltételezzük, hogy a radiális penumbraszálak nem vízszintesek, hanem ϕ szöget zárnak be a felszínnel, kiszámolható a β_2 szög a penumbraszál képsíkban lévő vetülete és a napkorong középpontja felé mutató irány közt:

$$\tan \beta_2 = (\cos \phi \sin \alpha) / (\sin \phi \sin \theta + \cos \gamma \cos \alpha \cos \theta).$$

A vetületek közti szög $\delta = \beta_2 - \beta_1$, amit 0° és 90° közé kell normalizálni.



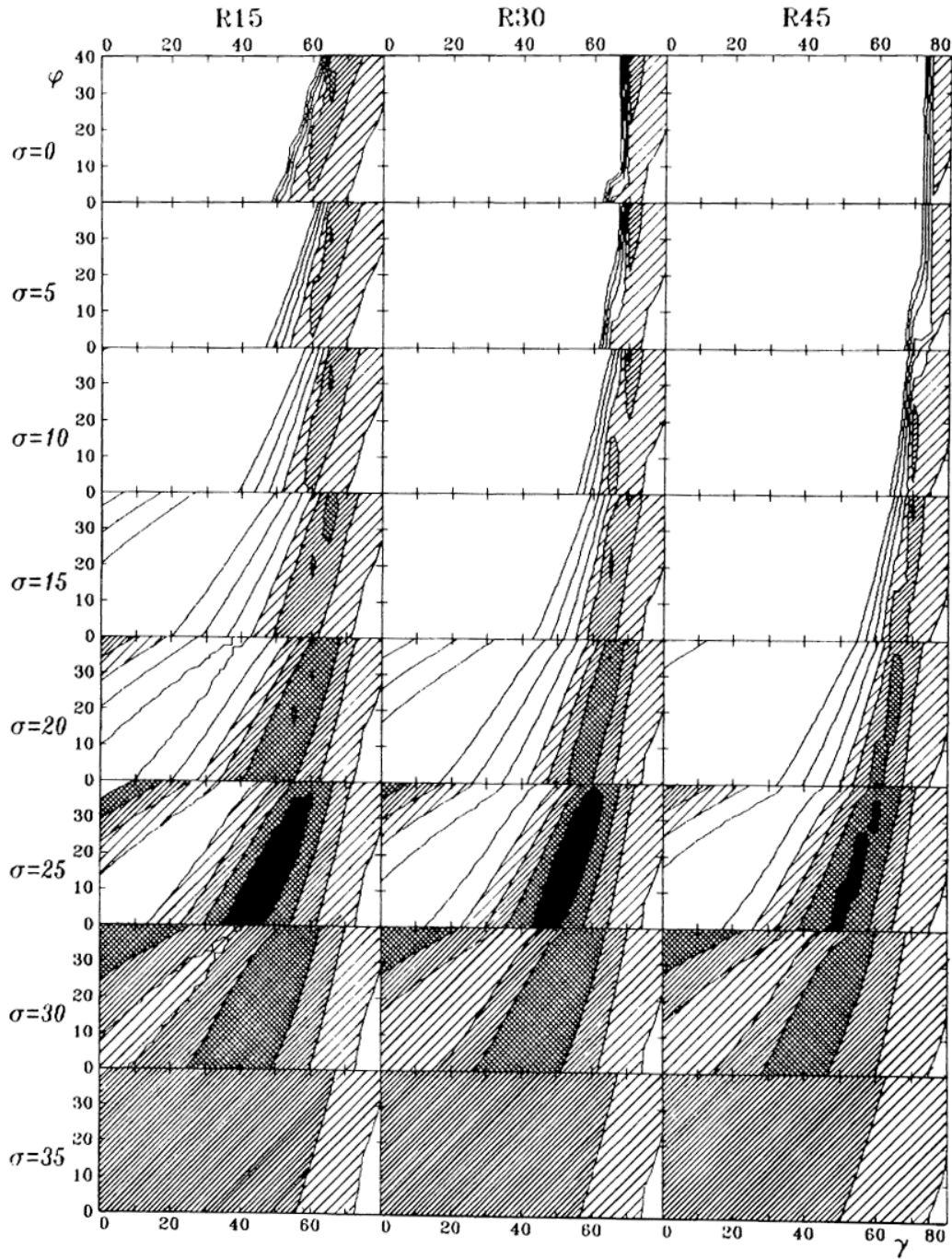
21. ábra. Néhány közel szabályos napfolt képe a napkorong pereméhez közel. Az umbra látható marad egészen $\theta = 86^\circ$ -ig, ezért a penumbra hajlásszöge a felszínhez (ϕ) nem lehet nagyobb 4° -nál. A kép vízszintes mérete 2,25 ívperc. Az MTA CsKI debreceni Napfizikai Obszervatóriuma megfigyelési anyagából.



22. ábra. Szabályos napfolt egyszerű geometriai modelljének képe különböző szögtávolságokban (Θ) a napkorong középpontjától. A folt átmérője 1 ívperc (43520 km), hasonló a 20. ábrán bemutatottakhoz, az umbra sugara $0,42 r_p$, a penumbra (folytonos vonal) felszínnel bezárt szöge $\phi = 5^\circ$, a mágneses tér (szaggatott vonal) $\gamma = 30^\circ$. A folt hengerszimmetrikus, azaz a penumbraszálak és a mágneses tér a folt tengelyét is tartalmazó függőleges síkban vannak. Már $\Theta = 45^\circ$ esetén is meglehetősen nagy szögek figyelhetők meg a penumbraszálak és a mágneses tér vetülete közt, ami egészen derékszögig nő $\Theta = 60^\circ$ -nál.

A 22. ábra mutatja a napfolt egyszerű geometriai modell szerint kiszámított szerkezetét, a megadott paramétereknek 1100 km umbramélység (Wilson-depresszió) felel meg, ez kissé túl nagy. Látható, hogy nagyobb θ értékeknél, különösen a foltnak a korong középpontja felé eső oldalán a mágneses tér transzverzális vetületének iránya és a penumbraszálak közt egészen derékszögig növekedhet a bezárt szög (δ).

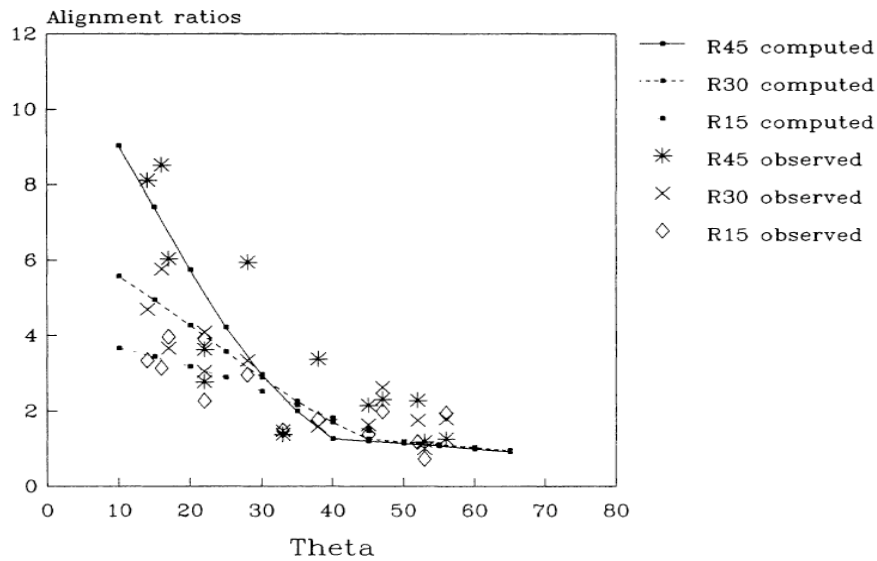
A modell alapján a foltban körbehaladva 1000 egyenletesen elosztott pontban lett kiszámolva δ értéke (a szimmetria miatt elegendő volt α 500 értékére) különböző γ és ϕ értékekre 5° -ként. Végezetül a kapott δ -eloszlás alapján ki lettek számolva a megfelelő R15, R30, R45 arányok. Az elméleti eloszlások azokra a θ értékekre lettek kiszámolva, amelyekre a megfigyelési adatok vonatkoztak.



23. ábra. A számított és megfigyelt R -arányok különbségeinek négyzetösszege (Σ) a 22. ábra egyszerű geometriai modellje alapján. A normálás úgy lett megválasztva, hogy $\Sigma = 1.00$ teljesen véletlenszerű elosztás esetén. Három változó paraméter van: a penumbra hajlásszöge ϕ , a mágneses tér hajlásszöge γ és a szimulált Gauss-eloszlású mérési hibák standard deviációja σ . Az elmélet és a megfigyelés jó egyezéséről beszélhetünk $\Sigma \ll 1$ esetében. Az izovonalak értéke 8,0; 4,0; 2,0; 1,0; 0,5; 0,25; 0,125. Fekete terület: $\Sigma < 0,125$; kereszt-sraffozás: $0,125 < \Sigma < 0,25$; sűrű sraffozás: $0,25 < \Sigma < 0,5$; ritka sraffozás: $0,5 < \Sigma < 1,0$. A legjobb az egyezés $\sigma = 25^\circ$ esetén, és $\gamma = 40-50^\circ$ -ra a fizikailag elfogadható $\phi = 0-5^\circ$ -nál.

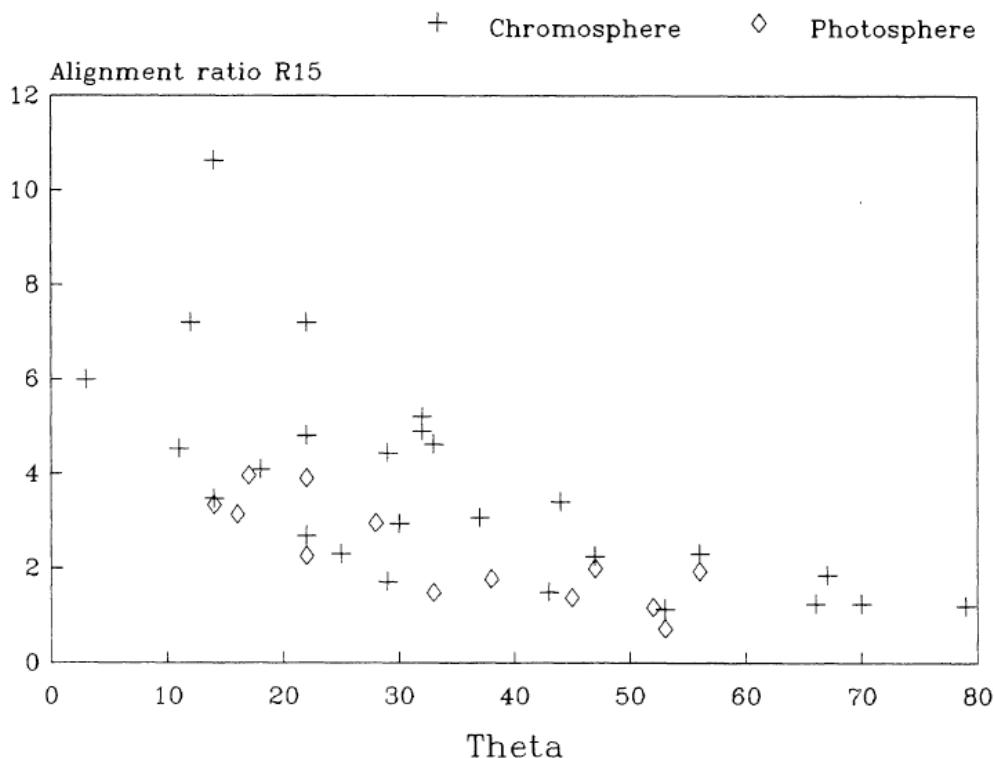
Az egyszerű geometriai modell és a megfigyelések összevetésére minden γ - ϕ pár esetében ki lett számolva a számított és megfigyelt R értékek különbségei négyzetének összege (Σ). Ebben a számolásban a végtelen (elméleti) R értékek helyére 100 lett behelyettesítve. A számolás szerint a legkisebb Σ értéke adja a megfelelő γ - ϕ értéket. Az első számolások azonban nagyon valószínűtlen értéket adtak, a mágneses tér hajlásszögére $\gamma = 70^\circ$ -ot, a penumbra hajlásszögére $\phi = 30$ - 40° -ot. Ezek az értékek nyilvánvalóan lehetetlenek, különösen az utóbbi. Ezért még egy paraméter, a mérések hibája lett bevonva a számításokba a következőképpen: miután az 500 α értékre ki lett számolva a δ értéke, 100 Gauss-eloszlású, 0 középértékű és σ standard deviációjú véletlen hiba ϵ lett hozzáadva minden értékhez. Ez el lett végezve $0^\circ \leq \sigma \leq 45^\circ$ esetére 5° többszöröseire. Minden esetben kiszámolásra kerültek az R-arányok, és meg lett határozva a számított és mért R-arányok különbségeinek négyzetösszege, Σ , úgy normálva, hogy teljesen véletlenszerű δ eloszlás esetén $\Sigma = 1,0$. Az egyezés az elmélet és a megfigyelés közt annál jobb, minél kisebb Σ .

Az összehasonlítás eredményeit a 23. ábra foglalja össze, amely Σ függését mutatja be a három (ϕ , γ , σ) paramétertől. Látható, hogy σ kis értékei nem felelnek meg jól a méréseknek, Σ értékei majdnem mindenütt 1 fölött vannak, a minimum nem túl mély, és lehetetlenül nagy ϕ értékekhez tartozik. A helyzet javul σ növelésével, és a legjobb (legkisebb Σ) értékeket $\sigma = 25^\circ$ esetén kapjuk. Ekkor a minimum kiszélesedik, és elfogadható értékek felé tolódik, $\phi = 0$ - 5° , $\gamma = 30$ - 40° -hoz. Ha tovább növeljük σ -t, a helyzet gyorsan romlik, Σ térképe a ϕ - γ síkban az állandó 1,0 értékhez, az egyenletesen véletlenszerű eloszláshoz tart. A véletlen mérési hibák bevezetése lehetővé tette a megfigyelések valóságú modellezését ($\Sigma \ll 1,0$ elérését), fizikailag elfogadható $\phi = 0$ - 5° és $\gamma = 30$ - 40° paraméterek mellett. Figyelemreméltó, hogy mindehhez $\sigma = 25^\circ$ szükséges. Mondható tehát, hogy az egyszerű geometriai modell, amely szerint a penumbraszálak és a mágneses tér-vektor azonos függőleges síkban vannak, kielégítően leírja a megfigyeléseket, ha a δ szögeltérés mérési hibája $\sigma = 25^\circ$.



24. ábra. A ténylegesen megfigyelt R-arányok összehasonlítása a minimális Σ segítségével meghatározott paraméterekkel ($\sigma = 25^\circ$; $\phi = 0^\circ$; $\gamma = 40^\circ$ R15-nél, $\gamma = 45^\circ$ R30-nál és $\gamma = 50^\circ$ R45-nél).

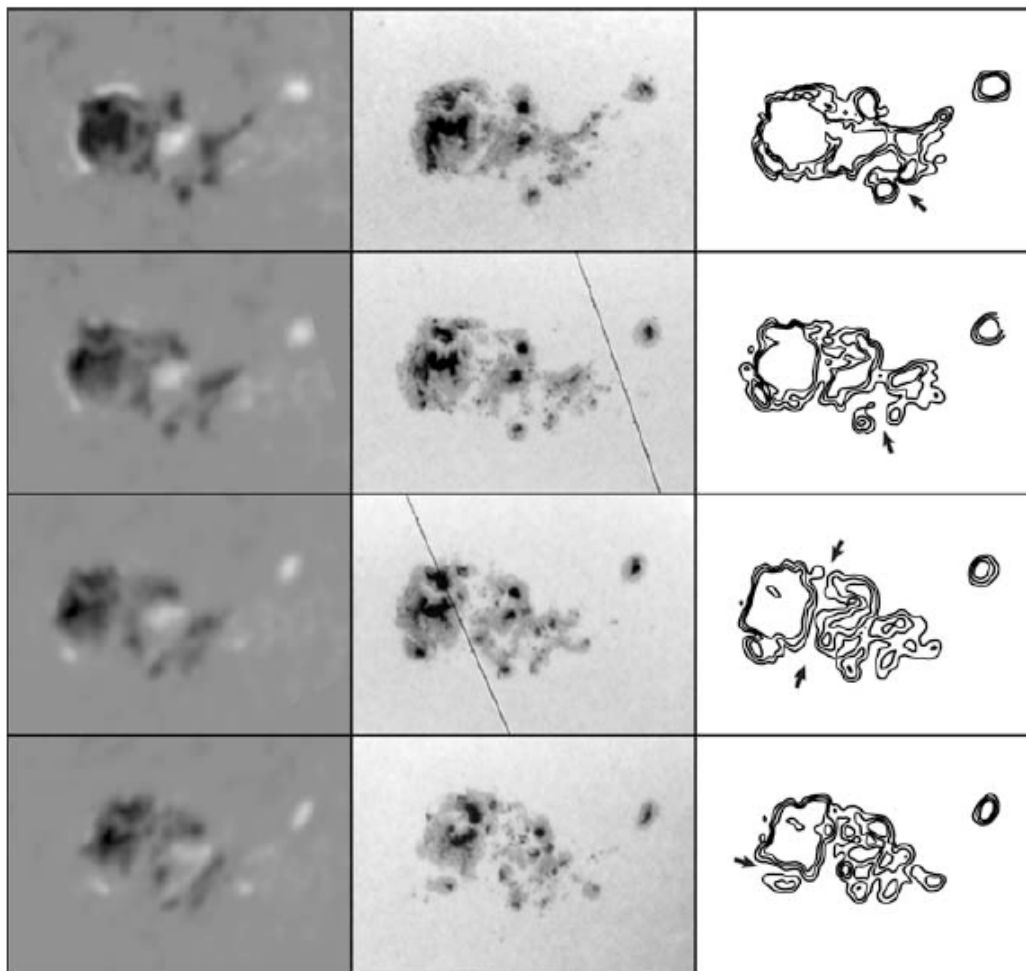
Ellenőrzésképpen a 24. ábra mutatja a beállási arányok változását a héliocentrikus távolsággal a napkorong középpontjától (θ) a legkisebb hibanégyzetösszegek módszerével meghatározott paraméterekkel kiszámolt elméleti görbék és a megfigyelt értékek feltöltésével. Az egyezés jónak mondható. Más, korábbi vizsgálatok a kromoszférikus szerkezet és a transzverzális mágneses tér irányegyezését vizsgálták (Tsap 1964, Makita et al 1985, Kawakami, Makita & Kurokawa 1989). Ha a fotoszférában teljesülnek a magnetohidrodinamikai befagyás feltételei, a kromoszférában ennek még inkább így kell lenni a jóval kisebb sűrűség miatt. A fő különbség az, hogy a mágneses tér-vektort fotoszférikus színekpárhuzamos vonalak segítségével mérjük. A legutolsó említett cikkben numerikus számítások is történtek, feltételezve, hogy a kromoszféraszálak vízszintesek, a fotoszférikus mágneses tér hajlásszöge a felszínhez α , és azimutális irányai között β eltérés van. Ezek a számítások gyakorlatilag egybeesnek a jelen vizsgálat számításaival $\phi = 0^\circ$ esetére, az ottani α itt γ -nak, az ottani β itt ε -nak felel meg. Az egyetlen eltérés, hogy ott β bizonyos határok között egyenletes eloszlású, míg itt ε Gauss-eloszlású, 0° átlaggal és σ standard deviációval. Az említett cikk „egybeesési arányt” (CR) használ, ami azon esetek számaránya az összeshez képest, amely esetekben a struktúra és a mágneses tér által bezárt szög kisebb, min 15° . Ez könnyen transzformálható a jelen vizsgálatban használt R15-re, $R15 = 5 \times CR / (1 - CR)$. A 24. ábra mutatja a cikk adatait, összehasonlítva az itt kapottakkal. A kettő között jó az egyezés, bár a kromoszférikus pontok magasabban helyezkednek el, a kromoszférában jobb az egyezés, mint várható is, a durvább szerkezet és dominánsabb mágneses tér miatt.



25. ábra. A jelen vizsgálatban meghatározott fotoszférikus R15 arány változása a héliocentrikus θ szöggel, összehasonlítva Kawakami, Makita & Kurokawa (1989) cikkében közölt kromoszférikus aránnyal. Az egyezés jó, bár a kromoszférikus struktúrák jobban követik a mágneses tér irányát.

Összefoglalva, a nagyon egyszerű geometriai modell, amelynek lényege, hogy a mágneses tér vektora és a penumbraszálak azonos függőleges síkban helyezkednek el, kielégítően leírja a helyzetet, mint azt az e modell alapján számított és a valóságban meghatározott eredmények mutatják.

3.4. A szerkezeti határok és a mágneses tér jellemzői

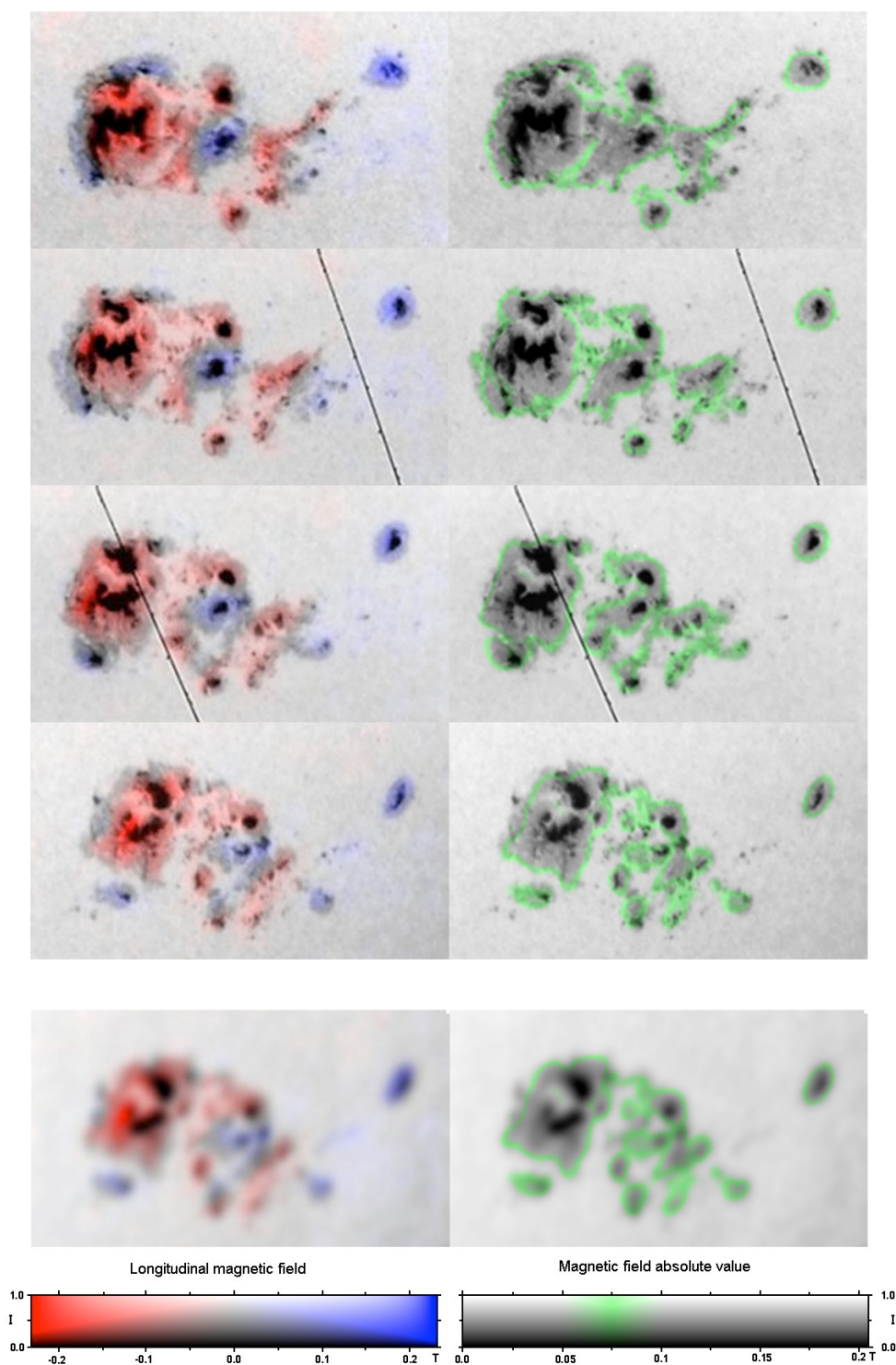


26. ábra. Bal oszlop: longitudinális (látóirányú) magnetogram, középső oszlop: az AR 6555 aktív vidék debreceni észlelései, jobb oszlop: a mágneses tér abszolút értékének izogaussz-vonalai 1991. márc. 23-26-ra. A magnetogramokon fehér – északi, fekete – déli mágneses polaritás, az izogaussz-vonalak 500, 750 és 1000 gauss értékeknél vannak meghúzva. A magnetogramok (fotók) idei, felülről lefelé: márc. 23. 18:03 (15:05), márc. 24. 16:27 (12:33), márc. 25. 13:38 (14:33), márc. 26. 13:37 (15:54). A ferde vonal a középső két fotón az (égi) észak-dél irányt jelző fonálkereszt. A jobb oszlopban a nyilak azokra a helyekre hívják fel a figyelmet, ahol különösen jól látszik a 750 gauss-os izovonal és a penumbrahatár egyezése. (Magnetogramok – NASA Marshall Space Flight Center, fotók – Napfizikai Observatórium, Debrecen.)

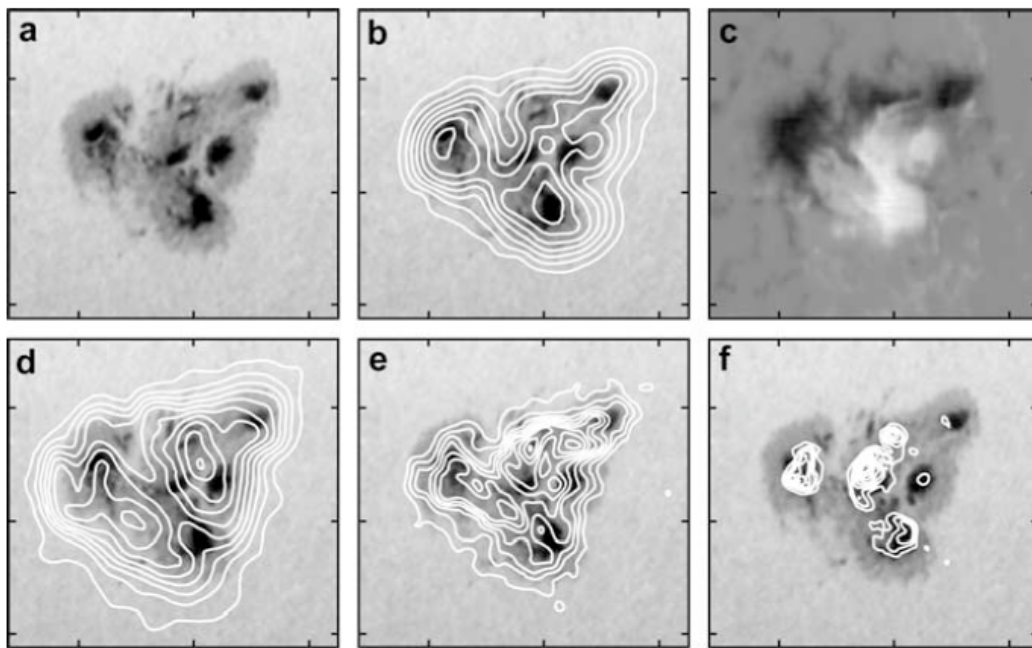
Az előző részben már szó esett a penumbrában zajló fizikai folyamatokról, amelyekkel mostanában egyre többen foglalkoznak. Kevesen foglalkoznak viszont az irodalomban azzal a kérdéssel, hogy mi alakítja ki a napfoltok (azaz tulajdonképpen a penumbra) külső határát. A régi, kisebb felbontású mérések (Beckers & Schröter 1969) felülettel párhuzamos, nullára csökkent mágneses teret találtak a penumbra külső határán. A későbbi, nagyobb felbontással végzett mérések viszont azt mutatták, hogy mind a mágneses tér értéke, mind a felülettel bezárt szöge határozottan különbözik nullától (Skumanich 1991, Solanki & Schmidt 1993 és az ottani hivatkozások, Wiehr 1999). Az új, nagyteljesítményű távcsövek és a képjavító eljárások segítségével többen vizsgálták a mágneses tér- és sebességvektorok eloszlását a penumbrában (Stanchfield, Thomas & Lites 1997, Rüedi, Solanki & Keller 1999, Martínez Pillet 2000, Westendorp Plaza et al. 2001 a,b), de ezek a vizsgálatok inkább az előző fejezet témájába illettek, és senki nem foglalkozott azzal a kérdéssel, hogy mi az a fizikai paraméter, ami a penumbra külső határát jelenti. Ezért egy korábbi vizsgálat [13] alapján új adatok felhasználásával pontosítottuk és értelmeztük a mágneses tér jellemzőit a penumbra külső határán [57].

A vizsgálatra felhasznált NOAA 6555 bonyolult aktív vidék fejlődése és mozgásai egy másik cikkben [45] már publikálva voltak, a debreceni megfigyelési anyagból négy felvétel lett kiválasztva, amelyekkel közel egyidejű vektor-magnetogramok rendelkezésre álltak a NASA Marshall Space Center archívumában 1991. márc. 23-26. közt. Ezek alapján készült el a 26. ábra, amelynek oszlopai a napfoltcsoport longitudinális (látósugár irányú) mágneses terét, fényképét és a teljes mágneses tér-vektor abszolút értékének izogauss-vonalait mutatják. Maga a foltcsoport mágnesesen eléggé bonyolult szerkezetű volt, érdekes foltmozgásokkal [45, 51], új aktivitás, új napfoltok felbukkanásával a régi napfoltcsoport területén. A penumbra bonyolult szerkezete ellenére, külső határa meglepően jó egyezést mutat a 0,075 T (750 gauss) szintvonallal, ha figyelembe vesszük a mágneses térkép eredendően rosszabb térbeli felbontását. Különösen feltűnőek a morfológiai egyezések a penumbra-határ és a mágneses tér abszolút értékének szintvonala közt a nyíllal jelzett részeken. Még jobban megfigyelhető az egybeesés, ha a napfoltcsoport fényképein a mágneses tér abszolút értékének 750 gauss közeli részei színtelítettséggel kódolva kerülnek ábrázolásra (27. ábra).

A következtetés ellenőrzésére egy másik bonyolult napfoltcsoport (NOAA 6615) 1991. május 7-i fényképe és rádióészlelései (White 1999) lettek felhasználva (28. ábra). A gírorezonancia-emissziós rádiósugárzás a napfoltok fölötti koronában lévő mágneses tér abszolút értékétől függ. Az 5 GHz-es rádiósugárzásnak 450 gauss, a 8,4 GHz-esnek 750 gauss felel meg, ezeknek a szintvonalai (és a mágneses tér abszolút értékének 750 gaussos szintvonala) szépen kirajzolják a penumbra külső határát. Még magasabb frekvencia, 15 GHz már 1350 gaussnak felel meg, ez a rádióészlelés már csak a nagyobb umbrák felett mutat emissziót, valamint a bonyolult δ -csoport közepén, a polaritáselválasztó vonalon, ahol az ellentétes mágneses terek kölcsönhatása zajlik.



27. ábra. A 26. ábra színes változata, a baloldali oszlopban a longitudinális tér, a jobboldali oszlopban a mágneses tér abszolút értéke van szintelitetséggel kódolva a fotoszféraészlelés fekete-fehér képébe. Mint a legalsó kalibrációs skálák mutatják, a baloldalon $-0,25$ T felel meg a telített piros, $+0,25$ T a telített kék színnek. A jobboldalon a $0,075$ T abszolút érték a telített zöld, a zöld árnyalat még ettől $\pm 0,025$ T-ig terjed, egyre csökkenve. Az első négy sor megfelel a 26. ábra képeinek, a debreceni fotóknak, az utolsó képek a márc. 26-i MSFC magnetogram intenzitáscsatornájából készültek, mutatva ennek lényegesen kisebb felbontását.



28. ábra. A NOAA 6615 aktív vidék megfigyelései 1991. máj. 7-én. a) a folt Debrecenben, 06:16 UT-kor készült fényképe, amely az izovonalaknak háttérül szolgál, b) a mágneses tér abszolút értékének izogaussz vonalai a NASA MSFC 17:58-kor végzett méréseiből, 450 gauss-tól 300 gaussonként, c) Kitt Peak longitudinális magnetogram 14:34-kor, fehér az északi (p)-polaritás, d) – f) VLA rádióészlelések a napkorona girarezonancia-sugárzásáról White (1999) cikkéből. A kontúrok a legnagyobb intenzitás 10%-ánál kezdődnek, és 10%-konként növekednek. d) az 5 GHz-es emissziót mutatja, amely 450 G abszolút értékű koronában található mágneses térnek felel meg, e) és f) a 8,4 és 15 GHz-es emisszió intenzitását mutatják, amelyek 750, ill. 1350 G-nak felelnek meg.

A 750 gauss abszolút érték nem véletlen. Ez az ún. *ekvipartíciós térerő*, amely értéknél a turbulens konvekciós mozgások és a mágneses tér belső energiasűrűsége megegyezik. A magnetohidrodinamikai befagyási tétel szerint ennél erősebb mágneses térben a mágneses tér határozza meg a mozgásokat, ha pedig gyengébb a tér, a mozgások tudják deformálni és elsodorni a mágneses erővonalakat. Ezért kézenfekvő a feltételezés, hogy az ekvipartíciós térerő elérésével a mágneses tér, ha még nem is tudja teljesen leállítani a konvekciót, mint az umbrában, de lényegesen tudja deformálni, *kicserélődési konvekcióvá* alakítva. Ez lehetővé tesz bizonyos energiatáplálást a penumbrába, amelynek folyamatait a Jahn & Schmidt (1994) és Jahn (1996) által bevezetett vastag penumbra-modell írja le legjobban, és amelynek az előző fejezetben leírt mozgások is nagyon jól megfelelnek. További, a napfoltcsoportok mélységi szerkezetére vonatkozó következtetéseket a 6. részben lehet találni.

A 27. ábrán alkalmazott módszer a fotoszférakép és a mágneses tér egyes információinak egyidejű ábrázolására eddig még sehol sem fordult elő az irodalomban. 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 vonalkák irányával és hosszúságával jelzik. Mivel az adott esetben a látható struktúra és a mágneses tér összefüggését kellett ábrázolni, olyan módszerre volt szükség, amely a lehetőség szerint legkevésbé zavarja a napfoltcsoport fényképi megjelenését. Szerencsére a számítógépes képfeldolgozás segítségével ez ma már könnyen megoldható. 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 jött létre a 27. ábra. 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.