

*Kálmán Béla*

## Napfoltok és napfoltcsoportok szerkezete és fejlődése

A „Napon látható jelek”-et először egy 3200 éves kínai jós-csont említi. Az első európai adat szerzője a Napon látható foltokról *Theofrasztoz, Arisztotelész* tanítványa az Kr. e. 4. században. Az ezután következő két évezred nem kedvezett Európában a tudományos megfigyeléseknek, Wittman és Xu (1987) listája 235 észlelést sorol fel –164 és 1684 közt, ebből csak 8 nem távol-keleti. (A –164-es év Kr. e. 165, mivel a csillagászok használják a 0. évet, míg a történészeknél Kr. e. 1. után Kr. u. 1. jön.) A távcső feltalálása után, az 1600-as évek elején többen is megfigyelték a Napot, de Galilei volt az, aki rendszeres megfigyeléseit publikálta is, ráadásul a napfoltok látszó elmozdulásából bebizonyította, hogy azok valóban a Nap felszínén találhatók, és elmozdulásukat a Nap kb. 27 nap alatt végbemenő körülfordulása okozza. A napfoltok iránti fokozott érdeklődés azután indult meg, amikor a 19. sz. közepén egyrészt kimutatták megjelenési gyakoriságuk 11 éves ciklusát, másrészt az is kiderült, hogy a napfoltok száma és a földmágneses háborgások gyakorisága párhuzamosan változik.

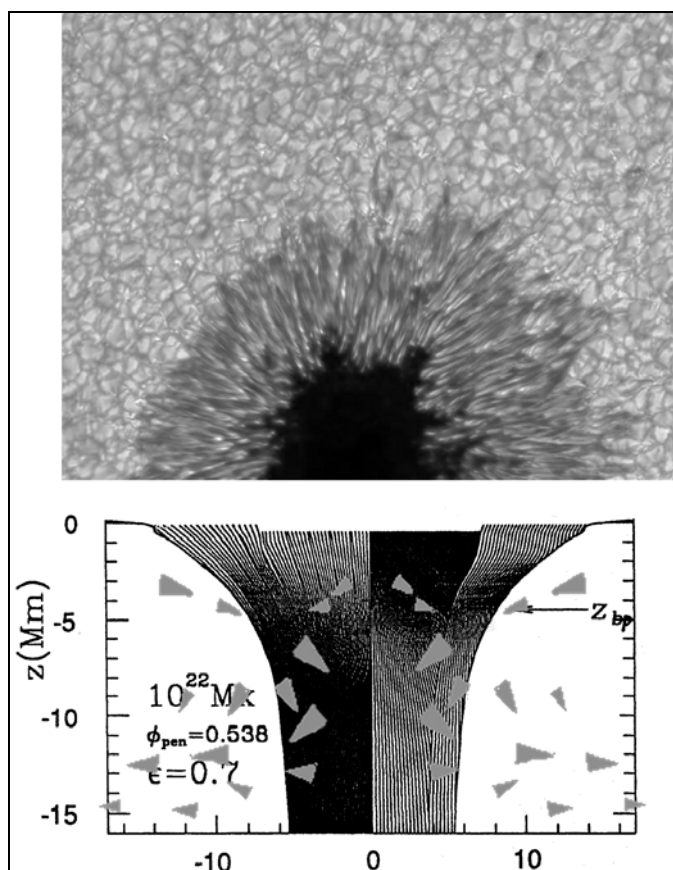
A naptevékenység fizikai természetének kiderítéséhez az első lépés Hale (1908) megfigyelése volt: a napfoltok színekében speciális polarizációs optika segítségével kimutatta a Zeeman-effektust, bebizonyítva ezáltal az erős mágneses terek jelenlétét. Hale másik jelentős találmánya a *spektrohélioszkóp* volt, ennek segítségével egy kiválasztott színekvonal fényében lehetett megfigyelni a Napot. Ha a hidrogén Balmer-sorozatának vörös,  $H\alpha$  jelű vonalára állítjuk be, akkor láthatóvá válik a Nap légkörének a középső rétege, a *kromoszféra*. Fehér fényben az alsó réteget, a *fotoszférát* látjuk, ez egy mindössze néhány száz kilométer vastag réteg, amelyen belül a Nap gázanyaga teljesen átlátszatlaná válik. A Nap felszínének a fotoszféra alját tekintjük, amelynél mélyebbre a látható fény tartományában nem láthatunk. A Nap átmérője 1,4 millió kilométer, ehhez képest a néhány száz km elhanyagolható, ezért a napkorongot éles pereműnek látjuk. A naplégkör legkülső rétege a kromoszféra feletti, rendkívül ritka, de magas (több, mint 1 millió K) hőmérsékletű *napkorona*. Ennek magas hőmérséklete miatt a benne lévő többnyire hidrogén- és hélium-atommagok egy bizonyos felszín feletti magasságtól kezdve eléri a szökési sebességet, ezáltal a napkorona állandóan kifelé „párolog”. A keletkező, néhány száz  $\text{km s}^{-1}$  sebességű, a Naprendszerben állandóan kifelé haladó részecskeáramlás a *napszél*, amely közvetíti a naptevékenység egyes hatásait a Föld környezetébe.

A fotoszféra felszíne a napfoltoktól eltekintve sem nyugodt, a képeken állandóan fortyogó, változó felszínt látunk, a *granulációt*. Az átlagosan kb. 1000 km méretű, 10 perc élettartamú granulák a felszín alatti turbulens konvekció következményei. A hidrogénből héliumot előállító fúziós reakciók sebessége nagyon erősen függ a hőmérséklettől, ezért energiatermelés csak a Nap középpontjának kis környezetében, a sugár 25%-áig történik. Ezután az energia sugárzás formájában, elnyelési és kisugárzási folyamatok révén, lassan szivárog kifelé, egészen a sugár 70%-áig, ahol a fizikai paraméterek fokozatos változása következtében konvektív instabilitás lép fel, ezért ebben a rétegben már a konvektív áramlások szállítják a felszín felé az energiát, ahol végül kisugárzódik a világűrbe. Ezek a mozgások folyamatosan hanghullámokat keltenek a Nap anyagában, amelyeket a felszín elmozdulásának sebességéből meg lehet határozni. Ez az alapja a *hélioszeizmológiai* megfigyeléseknek, amelyekkel éppúgy meg lehet határozni a Nap felszín alatti szerkezetét, mint a geofizikusok „látják be” a Föld felszíne alá a robbantásokkal keltett vagy a földrengések által okozott hanghullámok segítségével, sőt, még a Nap túlsó oldalán látható nagyobb napfoltcsoportok is megfigyelhetők ilyen módon.

A konvektív mozgásoknak nagy szerepük van a naptevékenység folyamataiban. A Nap anyaga, hőmérséklete miatt, ionizált, ezért elektromosan jól vezető *plazma*. A plazma mozgásait leíró *magnetohidrodinamika* alaptörvénye az ún. *befagyási tétel*, amely szerint a mágneses erővonalakra merőleges anyagmozgás nem lehetséges elektromosan ideálisan vezető gázban vagy folyadékban. A Napon ez azt jelenti, hogy a mágneses tér és a gázmozgások közül az határozza meg a másikat, amelyiknek nagyobb az energiasűrűsége. Ez a rendkívül bonyolult összjáték, amelyben hol az egyik, hol a másik a főszereplő, teszi nagyon bonyolulttá a naptevékenység matematikai modellezését. Bizonyos alapvető fizikai folyamatokat azonban már sikerült felderíteni.

Az 1. ábrán egy napfolt képe és mélységi szerkezete látható a jelenleg elfogadott elképzelések szerint. A képen látható a foltot körülvevő granuláció, a középső, sötét mag, az *umbra*, és az azt körülvevő, szálas szerkezetű *penumbra*. A metszeti képen megfigyelhető az alapvetően függőleges mágneses erővonal-cső, amely a felszín felé haladva keveszerűen szétnyílik. A felszín feletti mágneses teret gyakran közelítik egy függőleges dipól terével. A szürke nyilak a hélioszeizmológiai mérésekből meghatározott felszín alatti áramlási irányokat mutatják. Ezek stabilizálják a napfoltot, mint egy füstkarika-szerű örvénygyűrűt. Az *umbra* fizikája jól érthető, az erős (0,25–0,4 tesla) mágneses tér megállítja a konvekciót, ezért kevesebb energia tud itt a felszínre jutni, az *umbra* kevésbé fűtődik, mint a zavartalan fotoszféra. Másrészt jobban is hűl, mert a mágneses erővonalak mentén, nemcsak a szimpla hanghullámok, hanem sokfajta más hullám is tovább tud terjedni felfelé, energiát is továbbítva. Az *umbra* hőmérséklete 1500–2000 fokkal alacsonyabb a kb. 6000 K-os fotoszféránál, ezért fényessége kb. tizede a fotoszféráénak. Nehezebb volt magyarázatot adni a *penumbra* szer-

kezetére. Itt a mágneses tér már nem függőleges, és erőssége is kisebb. A látósugár-ra merőleges mágneses tér-komponens mérésének nehéz feladatát megoldva a teljes mágneses vektor abszolút értéke adta a megoldást. A penumbra külső határán ugyanis, bármilyen bonyolult az alakja, a térerő jó közelítéssel egyenlő az *ekvipartíciós térerővel*, azaz a mágneses és a mechanikus (mozgási) energiasűrűség egyenlő (kb. 0,075 T, Kálmán 2002). A mágneses tér a penumbrában tehát még nem elég erős ahhoz, hogy teljesen leállítsa a konvekciót, viszont jelentősen deformálja a mozgásokat. Kizárólag a napfolt tengelyén átmenő, radiális síkokban történő levezőszerű mozgást enged, a forró, fényes anyag befelé mozog az umbra felé, ott lehűl, és kifelé áramlik. Ez a magyarázata a szálas szerkezetnek.

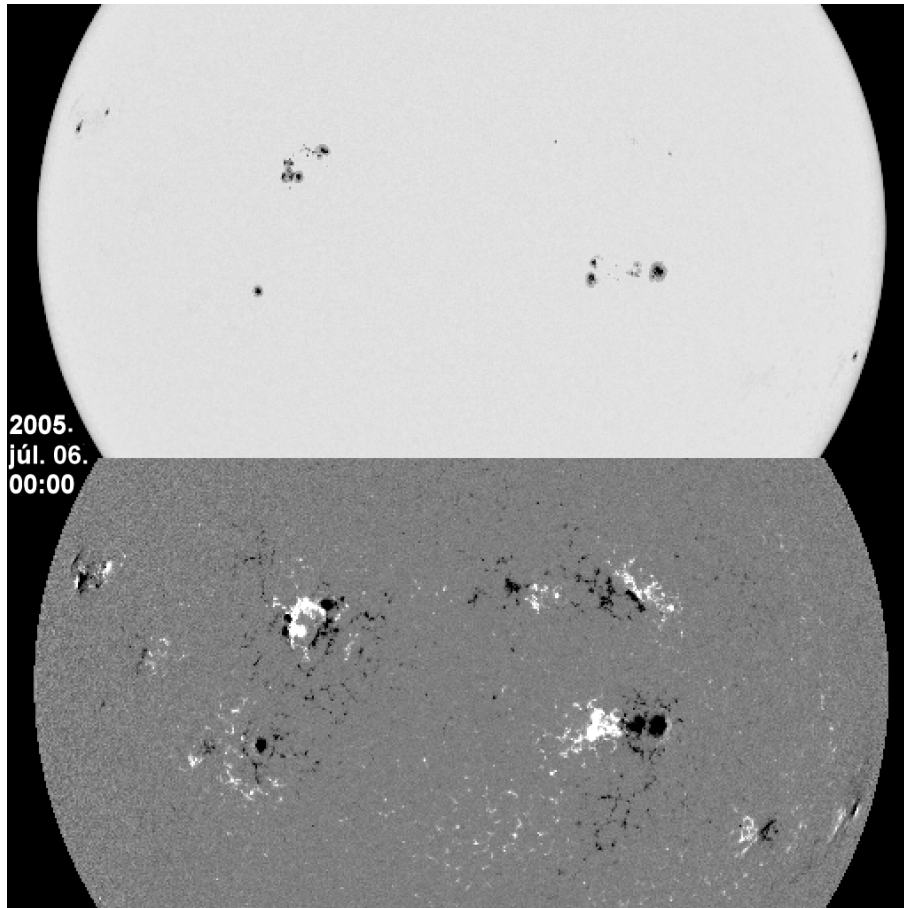


1. ábra. Fent: Egy szabályos, kerek napfolt fényképe, a légköri nyugtalanság korrigálása után (Denker, Yang & Wang, 2001). Lent: Egy szabályos napfolt mágneses terének keresztmetszete (Jahn & Schmidt, 1994), a metszet bal felén a sötétedés a mágneses tér erősségével arányos, míg a jobb felén a fehér fényben látható fényességnek megfelelő. A szürke nyilak a hélioszeizmológiai megfigyelésekből kapott felszín alatti áramlást mutatják (Zhao & Kosovichev, 2003).

A napfoltok azonban ritkán járnak egyedül, és sohasem keletkeznek magányosan. Hale óta ismert, hogy a Nap egyenlítőjével nagyjából párhuzamosan elnyúlt alakú napfoltcsoportok *bipolárisak*, azaz a Nap forgásiránya szerint elől haladó, vezető foltok más mágneses polaritásúak, mint a követők. A dipólok irányítása egy napcikluson belül a Nap északi vagy déli féltekéjén belül azonos, de a két féltekén ellentétes; ráadásul a következő napciklusban a féltekék vezető polaritásai felcserélődnek. Bár a jelenlegi 11 éves napciklusnak a maximuma 2000-ben volt, még mostanában is előfordulnak időszakok, amikor elég sok foltcsoport van a Napon, mint azt a 2. ábra mutatja. Fent, a fotoszféraképen láthatók a napfoltcsoportok, míg a kép alsó felén látósugár irányú mágneses térük; az alsó képen a mágneses tér nélküli helyek szürkék, a fehér az északi, a fekete a déli mágneses polaritást mutatja. A SOHO űrszonda felvételein látható, hogy az északi (felső) féltekén a bipoláris csoportokban az északi (fehér) mágneses polaritás vezet (a Nap balról jobbra forog), míg a déli féltekén ez fordított. A folt-csoportok fejlődése során rendszerint egy kis dipól, két, egymás melletti, ellentétes polaritású apró napfolt jelenik meg, amelyek az egyenlítővel párhuzamos, széttartó mozgásba kezdenek.

Közben a köztük lévő területen újabb apró foltok jelennek meg, amelyek közül a vezető polaritásúak előre, a követők hátrafelé mozognak, és összeolvadnak a régebbiekkel, így alakulnak ki a nagy, bipoláris csoportok. Időnként előfordulnak bonyolult szerkezetű csoportok is, amelyeknél a mágneses polaritások eloszlása nem követi az egyszerű dipólt. A vezető foltok többnyire nagyobbak és szabályosabb, kerek formájúak, ezért stabilabbak. Előfordul, hogy élete végén a napfoltcsoportból csak a vezető, szabályos kerek folt marad meg. Minderre akad példa a képen.

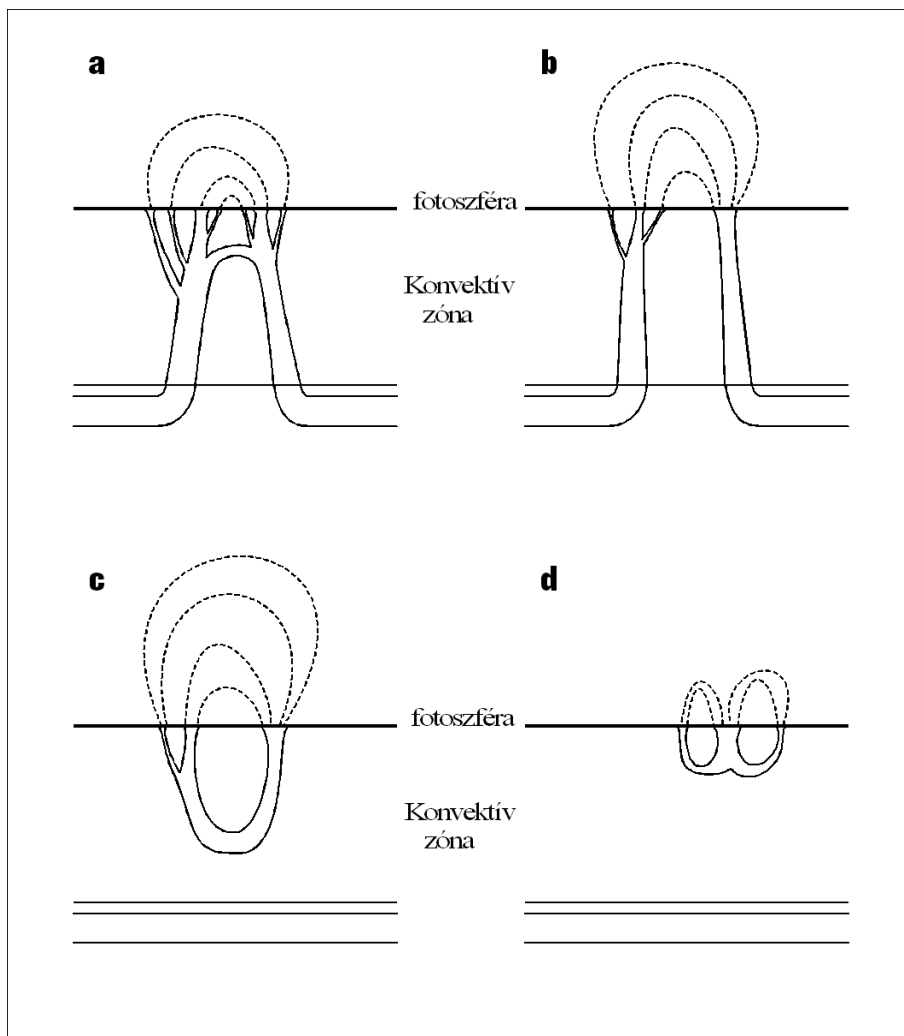
A mágneses tér megjelenése megmagyarázza a napfoltok létét, de felveti a soronkövetkező kérdést: honnan ered maga a mágneses tér? Egyébként nemcsak a megjelenése, hanem az eltűnése is elgondolkodtató, mivel az 1940-es években már Cowling kimutatta, hogy a Nap fotoszférájának fizikai állapotát (legfőképpen elektromos vezetőképességét) figyelembe véve, a napfoltok mágneses tere néhány száz év alatt tűnne csak el az anyag elektromos ellenállása következtében a megfigyelhető hetek, legfeljebb hónapok helyett. A jelenlegi elméletek szerint a Nap konvektív zónájában (főleg közvetlenül alatta) egy *dinamó-folyamat* működik, amely a mágneses teret létrehozza. A hélioszeizmológiai mérések szerint a sugárzási zóna merev testként forog, de a konvektív zónában a *differenciális rotáció* jelensége figyelhető meg, azaz a Nap egyenlítői része a Földről nézve kb. 25 nap alatt fordul körbe, míg a sarkok (forgástengely) környéke kb. 30 nap alatt. A felszín esetében ez már több, mint másfél százada ismert, az új módszerrel a mélységi változásokat is ki lehetett mutatni, eszerint a napfoltok megjelenési övezetében (nagyjából az 5–35 szélességi fokok közt) a forgási sebesség befelé eleinte nő, azután csökkenni kezd. Ugyanezen szélességek közt a konvektív zóna gyorsabban forog, mint az alatta lévő sugárzási zóna, a kettő között egy nyírási réteg alakul ki, amelyet egy fél évtizede megteremtett szakkifejezéssel *tahoklínának* (latin–angol: *tachokline*) neveznek.



2. ábra. A Nap 2005. július 6-án a NASA/ESA SOHO űrszonda felvételein, fent fehér fényben a fotoszférában látható napfoltcsoportok, lent a látósugár irányú mágneses tér-komponens, fehér az északi, fekete a déli polaritás (SOHO MDI, <http://sohowww.nascom.nasa.gov/>)

A befagyási tétel szerint itt, mivel a gáztömegek nyíró mozgásának nagyobb az energiasűrűsége, a Napot átható eredetileg dipólszerű mágneses tér erővonalai felcsavarodnak, és a konvektív zóna alatt a felszínnel párhuzamos erővonalcsövek alkotta ún. *toroidális tér* alakul ki. A mágnesezett részekben csökken a gáznyomás (ezáltal a sűrűség is), mivel itt a mágneses tér nyomása a gáznyomással összeadódva kell, hogy kiegyensúlyozza a környező mágnesesen semleges részek tiszta gáznyomását. Minél erősebb a mágneses tér, annál kisebb a sűrűség, ezért a toroidális erővonalcső előbb-utóbb instabillá válik, egy felfelé haladó, felúszó ív alakul ki, amelyben az anyag az erővonalak mentén lefelé mozog. Ez növeli a felhajtóerőt, gyorsítja az erővonalak köteg felbukkanását. A konvektív zó-

nában létező turbulencia ráadásul még az eredetileg egységes erővonalcsövet vékonyabb szálakra is fel tudja bontani, Amint az erővonalköteg első szálai felbukkannak a fotoszférában, az itteni viszonyok miatt közel függőleges helyzetet vesznek fel. A lefelé áramlás miatt ugyanis itt is csökken a gáznyomás, az erővonalcső összenyomódik, amíg az így erősödő mágneses nyomással együtt egyensúlyba nem jut a környezetével. Ezért még a legkisebb napfoltokban, az ún. *pórusokban* is már 0,2 T körüli mágneses tér figyelhető meg.



3. ábra. Egy napfoltcsoport fejlődésének vázlata: a konvektív zóna alatti mágneses erővonal-köteg felbukkanása (a,b), a hurok lefűződése a gyökeréről (c), majd a legvégül megmaradó magányos vezető folt (d).

A napfoltcsoport további életét a 3. ábra mutatja vázlatosan. Az egyenlítővel nagyjából párhuzamos erővonalköteg szálainak felbukkanása magyarázza a napfoltcsoportok bipoláris szerkezetét. Ahogy a turbulenciának legkevésbé ellenálló ív-tető után az erővonalcso stabilabb részei is előbukkannak, mivel a látható napfoltok lényegében a fotoszféra vékony rétege által képezett metszetét mutatják az erővonalkötegnek, azt láthatjuk, hogy a kis napfoltok összetartó mozgása után kialakul egy stabil, nagy napfolt. A 3.a. és 3.b. ábrán látható helyzetet az erővonalköteg alakja miatt  $\Omega$ -huroknak nevezik. A napfoltcsoportban folyó napfolt-sajátmozgások vizsgálatából (amely témában a debreceni Napfizikai Observatórium vezető helyet foglal el a világban) feltételezni lehet, hogy a turbulencia előbb-utóbb leválasztja „gyökeréről” a napfoltcsoportot, bár elég gyakran előfordul, hogy meglévő napfoltcsoporton belül új, fiatalabb dipólok jelennek meg, ezek sajátos mozgásokról felismerhetők, tehát a konvektív zóna alatt még működik az instabilitás. Ha a gyökeréről leszakad a napfoltcsoport, ezt O-huroknak (3.c. ábra) nevezi a szakirodalom, ez már a bomlás időszaka. A napfoltok élettartama már attól függ, hogy az örvénygyűrű-áramlás körülöttük mennyire tudja őket stabilizálni, miközben a turbulencia a külső határukon, és odalent a konvektív zónában egyre jobban kikezdi a mágneses erővonalköteget. Végül rendszerint a nagy, szabályos, kerek vezető folt marad meg, az erővonalköteg és mozgásrendszer alakja szerint mint  $\omega$ -hurok (3.d. ábra), és lassan ezt is szétszedi a turbulencia.

A napfoltcsoportok szétszóródott mágneses terét a meridionális áramlások viszik tovább, a vezető részeket inkább az egyenlítő felé, ahol az ellentétes félteke ellentétes vezető polaritásával összeadódva kioltódnak, míg a követő részek a pólusok felé haladva a dipólus-tér megfordulását okozzák, ezáltal újraindul a dinamó, most megcserélt polaritásokkal. A dinamó-elméletnek is vannak azért nehézségei, mivel Cowling azt is kimutatta, hogy szimmetrikus mozgások esetén nem növekedhet a mágneses tér, azaz nem működik a dinamó. A jelenlegi elméletek szerint a konvekcióban a felfelé és lefelé történő mozgások nem teljes egyenértékűsége (lefelé koncentráltabb) miatt a Coriolis-erő eredője nem zérus, és ez a rotáció működteti valahogy a dinamót. Sajnos, jelenleg még túl sok az elmélet és a szabad paraméter, ami arra utal, hogy még dolgoznunk kell a napciklus folyamatainak megértésén. A napfoltok felett, a kromoszférában és a napkoronában a mágneses tér energiája különböző jelenségeket tud létrehozni, amelyek egyike-másika Földünk kozmikus környezetét is érintheti, de ezek leírása már messze túlhaladja a jelen rövid cikk kereteit. A szerző e tárgyú munkáit az OTKA a T037426 sz. pályázat alapján támogatta.

#### *Irodalom*

- DENKER, C., YANG, G., WANG, H., 2001, *Solar Physics*, 202, 63 .  
JAHN, K & SCHMIDT, H. U. 1994, *Astronomy and Astrophysics* 290, 295.  
HALE, G. E., 1908, *Astrophysical Journal* 28, 315.  
KÁLMÁN, B., 2002, *Solar Physics* 209, 109.  
WITTMAN, A & XU, H, 1987, *Astronomy and Astrophysics Suppl. Ser.* 70, 83.  
ZHAO, J. W. & KOSOVICHEV, A.G., 2003, *Astrophysical Journal* 591, 446.