

KOZMIKUS MÁGNESSÉG

Szabados László

az MTA doktora, tudományos tanácsadó,
MTA CSFK Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet
szabados@konkoly.hu

A mágneses mező az egész univerzumot áthatja. A gravitáció mellett a mágnesség szerepe is lényeges az égitestek kialakulásában és a kozmikus jelenségek létrejöttében.

Bevezetés

A 20. század elején egyetlen égitestről tudták, hogy mágneses tere van – saját bolygónkról, a Földről (lásd Kovács Péter – Heilig Balázs – Csontos András tanulmányát e cikkgyűjteményben). A csillagászoknak a mágnesség tanulmányozásakor ugyanazt a nehézséget kell leküzdeniük, mint bármely egyéb vizsgálataik során: „csillagászati” távolságokból, pusztán a megfigyelt objektum fényét észlelve kell megállapítaniuk mindazt, amire kíváncsiak. A mágnesség tekintetében a Föld naprendszerbeli bolygótársai a kivételek, amelyeket a legutóbbi évtizedekben már ember alkotta bolygószondák is felkerestek, így lehetővé vált, hogy a bolygók mágneses mezejét műszerekkel közvetlenül is kimérvék. A Föld típusú bolygók közül a Merkúrnál és a Marsnál mutattak ki mérhető mágneses mezőt, de a földinél jóval gyengébbet, míg a Vénusznál a magnetométerek nem észleltek mágneses teret. Az óriásbolygók (Jupiter, Szaturnusz, Uránusz és Neptunusz) mágneses mezejének szerkezete a földmágneses mezőé-

hez hasonló, sőt e bolygók felszínére jellemző térerősség is hasonló, kivéve a Jupitert, amelynek mágnessége a földinél jóval erősebb. A Jupiter magnetoszférájának létéről közvetve is meggyőződhetünk a bolygó pólusai környékén időnként kialakuló sarki fény láttán (*i. ábra*). Az ilyen aurora-jelenséget – miként a Földön is – a mágneses erővonalak mentén száguldó, elektromosan töltött részecskék becsapódása kelti a bolygó atmoszférájának alacsonyabb rétegeiben.

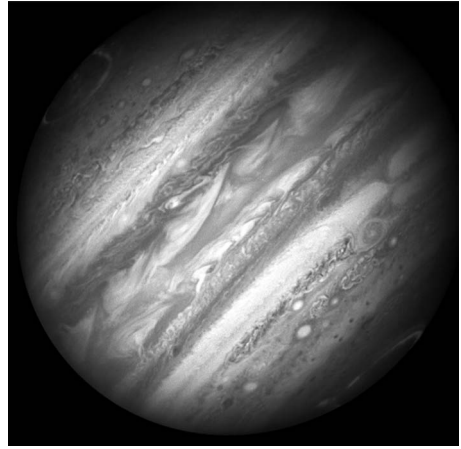
*Induljunk a kályhától! –
A Nap mágneses mezeje*

A mágneses mező távolból történő érzékelésének egyik módja a színképvonalakra gyakorolt hatás kimutatása. *Pieter Zeeman* holland fizikus 1897-ben mutatta ki, hogy mágneses tér hatására az atomi színképvonalak felhasadnak (e felfedezéséért ő lett az egyik első fizikai Nobel-díjas). Ha a mágneses mezőben az erővonalak a látóiránnyal párhuzamosak, a vizsgált forrás színképvonalai két komponensre bomlanak, amelyek egymással ellentétes irányban cirkulárisan polarizáltak. Ha pedig a látóirányra merőlegesek az erővonalak, háromfelé hasad a színképvonal, és lineáris polarizáció lép fel. A Zeeman-effektus az atom kötélekébe tartozó elektronok (töltött részecskék!) energiaszintjeinek felosztódásával

magyarázható. A komponensek közötti hullámhosszkülönbség (ami az energiakülönbségnek felel meg) a mágneses térerősséggel és magával a hullámhosszal is arányos.

Mivel a Nap a legfényesebbnek látszó égitest, természetesen ennek a csillagnak a színképében észlelték elsőként a Zeeman-effektust az égi források közül: *George Ellery Hale* amerikai csillagász 1908-ban a napfoltok felől érkező sugárzás spektrumát vizsgálva mutatta ki a színképvonalak felhasadását és polarizációját. A felhasadás mértékéből a napfoltokban uralkodó mágneses mezőre 0,2-0,3 T értéket kapott. A napkorong foltmentes vidékein akkor még nem sikerült a mágneses mező kimutatása, de ma már ismert, hogy a Nap egészét egy gyenge globális mágneses mező is áthatja.

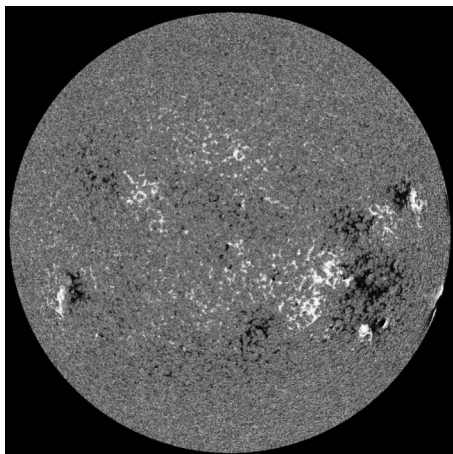
Sőt a *naptevékenység* néven ismert összetett jelenségsorozatot éppen a Nap mágneses mezeje váltja ki. A naptevékenység legkorábbi ismert elemei a napfoltok. Ezek a Nap felszíne alól törnek elő a fotoszférába, a Nap légkörének legalsó rétegébe. A napfoltok sötéteknak látszanak, mert hőmérsékletük alacsonyabb, mint a környezetüké. A környezettel való energia-egyensúly kívánja így, mivel a termikus energia alacsonyabb értékét a mágneses energia térfogategységre eső magasabb értéke kompenzálja. A napfoltok gyakoriságában észlelhető változás ciklikus jellege több mint másfél évszázada ismert. A Nap aktivitására a napfoltok csoportos megjelenése jellemző. Egy-egy napfoltcsoportban két domináns folt van, amelyek nagyjából a Nap egyenlítőjével párhuzamosan húzódnak. Ha a Nap tengely körüli forgási irányja alapján előbbre levő (vezető) folt „északi” mágneses polaritású, akkor a mögötte haladó (követő) folt „déli” polaritású. A Nap egyenlítőjétől északra egy időben mindig azonos a



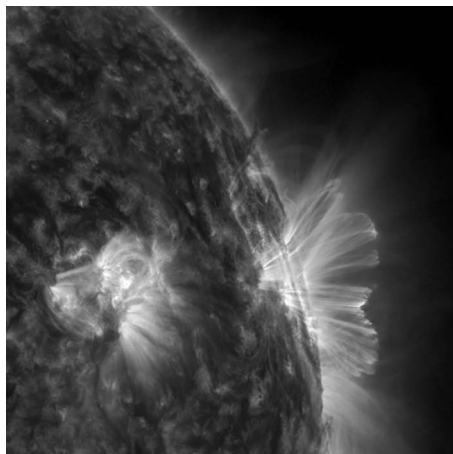
1. ábra • A Jupiter magnetoszférájáról árulkodik a bolygó pólusainál megjelenő sarki fény. A Hubble-űrtávcsővel optikai és ultraibolya hullámhosszakon készített felvételek egyesítése (forrás: NASA, ESA, Hubble Heritage Team, STScI/AURA).

vezető és követő folt mágneses polaritásának sorrendje, ugyanekkor a Nap déli félgömbjén ezzel éppen ellentétes a foltcsoportok domináns foltjainak polaritása. A mintegy tizenegy éves aktivitási ciklus végén megfordul a Nap mágneses mezeje, és a következő ciklusban a foltcsoportokban olyan lesz a mágneses polaritás megoszlása, mint az előző ciklusban a másik féltekén volt. A mágneses polaritásokat is figyelembe véve így valójában kb. 22 évig tart egy naptevékenységi ciklus. A Nap felszínének mágneses térképén jól kirajzolódnak az aktivitási centrumok, amelyeknek látható megnyilvánulásai a napfoltok (2. ábra).

A naptevékenységet sok más látványos jelenség is kíséri. Ezek közé tartoznak a robanásszerű energiefelzabarással járó napkitörések (florek), valamint a Nap atmoszférájának legkülső rétegében, a kiterjedt napkoronában (3. ábra) megfigyelhető protuberanciák és a nagy mennyiségű anyag kidobó-



2. ábra • A Nap korongjáról a Zeeman-effektus alapján készített magnetogram (SOHO-MDI felvétele, forrás: NASA, Goddard Space Flight Center).



3. ábra • A napkorona anyagának mozgása jól kirajzolja a mágneses tér lokális szerkezetét. A TRACE űrszonda felvétele 17,1 nm-es hullámhosszon (forrás: NASA).

dásával járó koronakitörések (*coronal mass ejection*).

Napkitörések alkalmával a napfoltokat is tartalmazó aktív vidékeken a bonyolult szerkezetű mágneses tér erővonalai „átkötődnek”, a térszerkezet leegyszerűsödik, ami jelentős energiefel szabadulással jár. A koronakitörések során nagy sebességgel távozó anyag ugyan csak sok energiát visz magával, és amerre ez az anyagfelhő (tulajdonképpen megerősödött napszél) halad, a helioszféra állapotára befolyást gyakorol (lásd Erdős – Balogh, 2012).

A naplégkör fotoszféra és korona közötti vékony rétegéről, a kromoszféráról felvett színeképben bizonyos emissziós vonalak erőssége jelzi a naptevékenység pillanatnyi mértékét; ennek fontosságára később visszatérünk.

A naptevékenység egyes jelenségeire még nem sikerült kielégítő fizikai magyarázatot találni, de az elfogadott tény, hogy az aktivitást a Nap mint mágneses dinamó hajtja. A Nap belsejében az ott uralkodó magas hőmér-

séklet miatt az anyag ionizált, plazma állapotú, és a napfelszín alatt áramló plazma mágnességet kelt, illetve a már meglévő mágneses mezőt felerősíti.

A Nap mágneses jelenségeihez nagyban hozzájárul az a tény, hogy maga a Nap nem merev testként forog a tengelye körül: míg az egyenlítőjénél 25 nap a forgási periódusa, a pólusok felé egyre lassuló forgással a napfelszín anyaga a két pólusnál már 34 nap alatt tesz meg egy fordulatot. Ez a felszíni differenciális rotáció az egyenlítővel csaknem párhuzamossá nyújtja az eredetileg poloidális mágneses mező erővonalait, és ez okozza a vezető és követő napfoltok ellenkező polaritását egy aktív régió belül. A differenciális rotáció a napfelszínre merőlegesen is érvényesül: ugyanazon felszíni pont alatt egyre mélyebbre hatolva is folyamatosan változik a forgási periódus (mélységi differenciális rotáció). A plazma állandó mozgásával így táplálja a Nap dinamóját.

Saját csillagunk aktivitásával kapcsolatban az egyik legnagyobb rejtély az, hogy miért és hogyan kapcsol ki időnként a Nap dinamója. Előfordul ugyanis, hogy a naptevékenység hosszú időn át szünetel. Legutóbb 1645 és 1715 között, az ún. Maunder-minimum idején volt ilyen állapotban a Nap.

A napciklus analógiái csillagokon

A Naphoz hasonló csillagok vizsgálata azért is fontos, hogy jobban megértsük a naptevékenység mindaddig homályos, megmagyarázatlan „részeit”, például azt, hogy milyen gyakorisággal számíthatunk a Maunder-minimumhoz hasonló aktivitási szünetekre. A naptevékenység átmeneti hiánya ugyanis kihat a földi klímára, ezzel együtt a bioszférát is befolyásolja.

A csillagok esetében természetesen nincs mód a felszínükön kialakuló foltok mágneses terének megmérésére (például a Zeeman-effektus színképi kimutatásával), hiszen korong helyett csupán pontszerűnek látszó forrás fénye észlelhető – a csillag globális mágneses mezeje pedig mérhetetlenül gyenge. A Nap típusú csillagok mágnességére a csillagaktivitás különféle jegyeinek kimutatásából lehet következtetni.

A csillag felszínén kialakuló foltok a csillag tengely körüli forgási ideje szerinti periódussal mérhető változást okoznak a csillagkorong összfényességében. Ehhez persze elég nagy foltokra van szükség, de a mérések szerint a Naphoz hasonló hőmérsékletű, átmérőjű, tömegű és korú – röviden Nap típusú – csillagokon a Napon megfigyelhetőeknél jóval nagyobb csillagfoltok is kialakulnak. Ugyanez a helyzet a napkitöréseknek megfelelő csillagflerekkel is, különösen a csillagok fejlődésének kezdeti fázisaiban. A kis tömegű, fiatal csillagokon kialakuló flerek energiája

több nagyságrenddel felülmúlja a napkitöréseket. Ez a csillag rendkívül erős mágneses terére utal.

A naptevékenység szintjét jelző, kromoszferikus eredetű színképvonalak más csillagoknál is vizsgálhatók, ami lehetővé teszi a csillagok aktivitásának időbeli követését és a csillagaktivitás statisztikai vizsgálatát is. Már legalább negyedszázada végzett szisztematikus vizsgálatok során sok csillagnál tapasztaltak a naptevékenységéhez hasonló aktivitási ciklust néhány éves ciklushosszal. A kromoszferikus eredetű emisszió hiánya pedig arra utal, hogy a megfigyelés idején a csillag éppen nem aktív. Ha ez az állapot huzamosabb ideig tart, akkor a Maunder-minimumhoz hasonló, dinamómentes állapotban van a megfigyelt csillag. Megfelelően sok csillag viselkedését elemezve kiderült, hogy az aktivitási szünet egyáltalán nem ritka jelenség a Naphoz hasonló csillagoknál. Számítanunk kell tehát arra, hogy valamelyik napciklus végén a várt polaritásváltás helyett egy időre – évtizedekre vagy akár egy évszázadra is – átmenetileg kikapcsol a Nap belsejében jelenleg működő dinamó.

A napciklus analógiái ugyanakkor óvatosan kezelendők, mert a csillagok pólusainál is kialakulhatnak óriási foltok, míg a Napon ilyesmit soha nem tapasztaltak, a poláris foltok léte pedig a dinamó-modellel nem fér össze.

Mágnesség más csillagokban

A 20. század közepén sikerült végre a Nap után más csillagoknál is kimutatni a mágnességre utaló Zeeman-effektust: *Horace W. Babcock* előbb a 78 Virginis jelű csillagnál, majd néhány más társánál is $0,1 T$ jellemző értékű fluxussűrűséget észlelt. Ezeknek a Napnál forróbb, mágneses csillagoknak az a

közös tulajdonságuk, hogy színképük a csillagléggör anomális kémiai összetételére utal: a többi csillaghoz képest rendkívül gyakori az atmoszférájukban a króm, a stroncium, az eurórium és más ritkaföldfémek. A mágneses térerősségnek és a csillag fényességének időbeli változásából (ezek periodicitásából) nemcsak a csillag tengelyforgási periódusa állapítható meg, hanem az is kiderül, hogy a változásokat az váltja ki, hogy a csillag forgástengelye nem esik egybe a mágneses tengellyel – ez az ún. *ferde rotátor* esete. A mágneses mező szerkezete ennek alapján modellezhető. Arra azonban jelenleg még nincs magyarázat, hogy a számottevő mágneses mező hogyan idézi elő a kémiai elemek anomális gyakoriságát a csillag atmoszférájában. A mágneses csillagokról készített színképek elemzéséből az mindenestre kiderül, hogy némelyik elem nagyon egyenetlenül oszlik el a csillag felszínén. A mágneses térerősségnek a forgásból származó periodikus változásán kívül maga a mágneses mező évtizedes időskálán állandónak bizonyul. Ez a megfigyelési tény kizárja, hogy az erős mágnességet dinamó-mechanizmus kelti.

Mágnesség fehér törpékben

A csillagok kezdeti tömegüktől függő ütemben fejlődve előbb-utóbb – ugyancsak a kezdeti tömegük által meghatározott – végállapotba kerülnek. Ha a csillag tömege a magfúziók megszűntekor nem éri el a Nap tömegének 1,4-szeresét, akkor fehér törpe lesz belőle. (A jelenleg 4,5 milliárd éves Nap legalább ugyanennyi idő múlva jut el a fehér törpe állapotba.)

Sok olyan fehér törpét találtak, amelyeknél a Zeeman-effektus, illetve a színképvonalak polarizációja alapján a mágneses fluxussűrűség 10 000 tesla nagyságrendű. Ez a közön-

séges csillagok mágnességéhez vagy a Földön keltett mágneses mezőkhöz viszonyítva rendkívül erős, de a magnetohidrodinamikai befagyás tétele (lásd Abonyi Iván tanulmányát e cikkgyűjteményben) alapján nem meglepő az ilyen nagy érték, hiszen a fehér törpék átmérője a Földéhez hasonló – a csillagállapotból ekkora méretűre zsugorodó objektumban rendkívüli módon felerősödik a mágneses mező. Ilyen erős mágnesség esetén a Zeeman-effektus is bonyolultabb formát ölt (kvadratikussá Zeeman-effektus és Paschen-Back-effektus), illetve az objektum folytonos színképe egészeben polarizálódik.

A mágneses eredetű vonalfelhasadás és polarizáció a fehér törpék egy részénél periodikusan változik. Az 1 óra és 20 nap közötti periodicitás az égitest tengelyforgási ideje lehet, és a megfigyelhető változás ez esetben is egyszerűen magyarázható a ferde rotátor modell keretében. A változás hiánya pedig a mágneses tengelynek a látóiránnyal bezárt kis szögére, illetve nagyon lassú tengelyforgásra utal.

A vizsgált fehér törpék többségénél viszont nem találtak mérhető értékű mágneses teret, a mágneses fehér törpék aránya mindössze 4%, ami alapjaiban megnehezíti az ebbe a végállapotba került égitestek mágnességének megmagyarázását. Igaz, hogy a csillagfejlődés során a fehér törpe állapotot megelőzően a csillag vörös óriás fázison ment át, amely szakaszban a csillag anyaga teljesen konvektív, és ilyenkor kedvezőek a feltételek ahhoz, hogy a csillag megszabaduljon mágneses fluxusának nagy részétől, de ettől még nem derül ki, hogy miért léteznek erősen mágneses és egyáltalán nem mágneses fehér törpék.

Neutroncsillagok és magnetárok

A nagyobb kezdeti tömegű csillagok a belsejükben végbemenő fúziós energiatermelés

megszűntével több anyagot tartalmaznak annál, hogy fehér törpeként végezzék. A gravitáció uralkodóvá válásával így jóval kisebb és sűrűbb testté, *neutroncsillaggá* zsugorodnak. Az ilyen égitest sugara mindössze 10 km, ezért a magnetohidrodinamikai befagyás hatására még az eredetileg akár csekély mágneses tér is elképesztően felerősödik: a neutroncsillagokra az egymillió-egymillárd tesla értékű fluxussűrűség jellemző. És nincs is olyan neutroncsillag, amely ne lenne ennyire mágneses! Viszont azok között a fiatal csillagok között, amelyek jelenlegi tömegük alapján majd neutroncsillaggá válnak, egyetlenegyél sem tapasztaltak mérhető mágneses teret.

A neutroncsillagok mágnességének másik furcsasága az, hogy van közöttük egy alcsoport, amelynek tagjai még erősebben mágnesesek. Ezekben az ún. *magnetárookban* százmilliárd tesla a mágneses mező fluxussűrűsége. A magnetárokról kiderült, hogy azonosak az 1979 óta ismert lágygamma-ismétlőkkel. Ez utóbbiak az elektromágneses színekép legnagyobb energiájú tartományában, a gamma-sugárzásában – igaz, annak a kisebb frekvenciájú, a röntgentartománnyal szomszédos részén, azaz a lágygamma-tartományban – ismétlődő kitéréseket produkálnak. A gammakitérések ténye akkor már nem volt újdonság a csillagászoknak, de addig egyetlen olyan forrást sem ismertek, amelyik ismételtelen felfénylett.

A magnetárkitérés pontos oka nem ismert, de egy elfogadhatónak tűnő modell szerint a neutroncsillagok szerkezete és a bennük uralkodó szupererős mágneses mező váltja ki. A mágnesség és a neutroncsillag szilárd kérgének kölcsönhatása néha gigantikus csillagrengéshez vezet, amelynek során elképesztően sok energia szabadul fel (tizedmásodpercek alatt annyi, amennyit a Nap évez-

redék alatt sugároz ki), ez észlelhető magnetárkitérésként. Hatására a neutroncsillag kérge átrendeződik, és egy ideig „megnyugszik”. A mágneses tér fékezi a neutroncsillag egyébként rendkívül gyors (jellemzően másodpercnél is rövidebb periódusú) forgását. Az ismert magnetárok forgási periódusa a röntgensugárzásuk erősségének periodikus változása alapján valóban hosszabb, mint egy pulzárként viselkedő átlagos neutroncsillagé: 7–8 másodperc. A modell szerint a neutroncsillag mágneses mezeje a dinamó-mechanizmus hatására erősödik fel az eredeti érték százszorosára, majd néhány ezer év alatt lebomlik a neutroncsillagokra jellemző „normális” szintre.

A mágneses tér szerepe csillagkeletkezéskor

Bár a csillagok túlnyomó többségének mágneses mezeje észlelhetetlenül gyenge, feltételezések szerint mégsem tekinthetjük úgy, hogy a csillagokban nincs mágnesség. A megfigyelések és a modellek szerint a mágnességnek már a csillagok kialakulása során is lényeges szerep jut.

A csillagkeletkezés a csillagközi anyag sűrű molekulafelhőiben megy végbe. A felhő legsűrűbb tartományában, a felhőmagokban levő anyag saját gravitációja hatására összehúzódásba kezd, kialakulnak a protocsillagok. A csillagkezdemény egyre több anyagot vonz magához a környezetéből, miközben zsugorodik és melegszik. A protocsillag forgása eközben gyorsul (az impulzusnyomaték megmaradása miatt), és anyaga folyamatosan gyarapszik a körülötte levő lapos, tömegbefogási (akkréción) korongból. A bezuhanó anyagtól a sűrűsödő és egyre kisebb átmérőjű protocsillag belseje magas hőmérsékletűvé válik, miközben a peremvidéke hideg marad. A csillagkezdemény anyaga konvektív állapotba kerül. Az anyagáramlás és a gyors forgás

a dinamó-mechanizmussal mágneses teret kelt, s ez a mágneses mező kölcsönhat a befelé hulló anyaggal. Az akkréciós korongban a protocsillag felé áramló ionizált gáz (plazma) egy része a mágneses erővonalak mentén a kialakuló csillagba hullva annak tömegét gyarapítja, a korong anyagának legnagyobb perdületű része pedig a korongra merőlegesen, a nyitott mágneses erővonalak mentén kirepül a rendszerből (4. ábra). Ezzel az ún. magneto-centrifugális széllel jelentős mennyiségű impulzusnyomaték is távozik, így a még összehúzódo csillag nem pörög fel túlságosan – különben a begyűjtött anyaga lerepülne róla, és nagy tömegű csillagok nem is tudnának kialakulni. A mágneses tér szerepének felismerése előtt nem is sikerült megmagyarázni, hogy miként szabadul meg a protocsillag a számára fölösleges perdülettől. A Nap 4,5 milliárd évvel ezelőtt ment át ilyen fejlődési fázison.

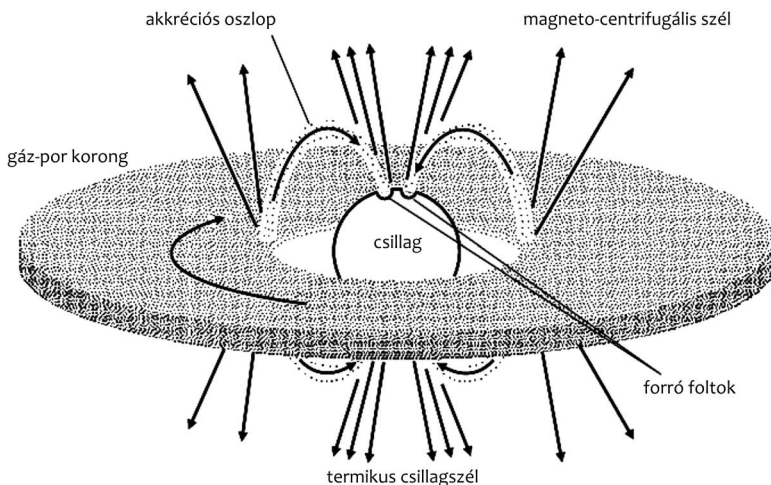
A Tejútrendszer mágneses mezeje

Nem csupán az egyedi égitestekre jellemző a mágnesség. A kozmikus objektumok nagyobb rendszereit, így saját galaxisunkat, a Tejútrend-

szert is mágneses mező hatja át. Itt azonban egészen kis fluxussűrűségről, milliárdod (10^{-9}) tesla értékről van szó. Figyelembe véve ugyanakkor a mágneses mező hatalmas kiterjedését (ti. a Tejútrendszer korongjának átmérője százezer fényév), a mágneses energia jelentős tényező a galaxis dinamikai folyamatai során.

A csillagok kapcsán már volt szó arról, hogy többségük mágnessége észlelhetetlenül gyenge – itt a kimutatást az optikai színekben levő vonalak észrevehetetlen Zeeman-efektusa hiúsítja meg. Ha nem csillagokról van szó, akkor viszont szóba jöhetnek más jelenségeken alapuló módszerek is a mágneses mező kimutatására.

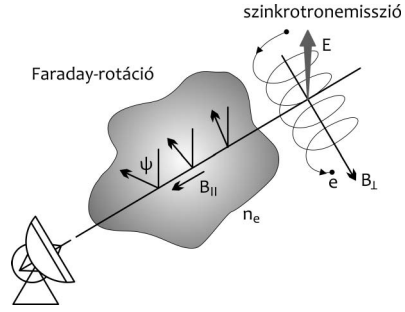
Mágnességre utal a szinkrotronsugárzás, amelyet töltött részecskék bocsátanak ki, amikor a fénysebességhez közeli sebességgel mozognak mágneses térben. A szinkrotron-emisszió a rádiósugárzás tartományában detektálható. Itt egyébként a csillagközi gázban levő hidrogénatomok 21 cm-es hullámhosszú színekvonalának Zeeman-felhasadása is mérhető – hiába annyira alacsony a mágneses fluxus sűrűsége –, annak a ténynek



4. ábra • Protocsillag és környezete a dinamó keltette mágnesség létrejötte után (Kun, 2005)

köszönhetően, hogy a Zeeman-hatástól eredő felhasadás mértéke a megfigyelési hullámhosszal arányos A Tejútrendszer globális mágneses mezejére utal a csillagok és a csillagközi porfelhők fényének polarizációja is. A csillagközi por szemcséit ugyanis a mágneses mező úgy rendezi, hogy a hossz tengelyük párhuzamos legyen a mágneses erővonalakkal. Emiatt a porfelhők felől érkező fény poláros. Rádiófrekvenciákon megfigyelhető még az ún. Faraday-rotáció (Faraday-effektus) is, amelynek lényege az, hogy mágneses mezőben az erővonalakkal párhuzamosan haladó, lineárisan polarizált sugárzás polarizációs síkja elfordul (5. ábra).

E módszerekkel nemcsak a tejútrendszerbeli globális mágneses mező erősségét és szerkezetét sikerült feltérképezni, de más, viszonylag közeli extragalaxisokban is tanulmányozni lehet a mágneses mező struktúráját.



5. ábra • A szinkrotronemisszió és a Faraday-rotáció kialakulása

Intergalaktikus mágnesség

A galaxisok nagy kiterjedésű külső régiójának, a halónak a mágnességéről az onnan érkező szinkrotronsugárzás tanúskodik. A galaxisok között előforduló aktív magú galaxisok gigantikus, de keskeny kúpszögű nyalábok formá-

objektum	mágnesesfluxus-sűrűség (T)	jellemző méret (km)	megjegyzés
Föld	0,0001	10 000	enyhe aszimmetria, időbeli változás
bolygók	10^{-8} – 0,001	1000 – 100 000	
Nap	kb. 0,1 (napfoltok)	10^6	enyhe aszimmetria, időbeli változás, mágneses ciklusok, hosszú minimumok
hideg csillagok	?	10^6	a naptevékenységhez hasonló mágneses ciklusok
forró csillagok	1	10 000	
fehér törpék	10 000	10	ferde rotátor
neutroncsillagok	10^8	10	ferde rotátor
magnetárok	10^{11}	10	ferde rotátor
galaxisok	10^{-9}	10^{18}	tengelyes szimmetria
intergalaktikus tér	$<10^{-10}$	$>10^{20}$	

1. táblázat

jában anyagot lövellnek ki hatalmas sebességgel az intergalaktikus térbe. A bipoláris kilövelléseket a mágneses mező hajtja, miként a csillagkeletkezésnél is láthatjuk. Így közvetett bizonyítékok utalnak arra, hogy a galaxisok közötti térséget is áthatja a mágneses mező, bár annak fluxussűrűsége olyan alacsony, hogy lehetetlen megmérni. Kivételt csak a galaxishalmazok belseje képez: a galaxisok közötti régióra vonatkozóan 10^{-10} T fluxussűrűséget határoztak meg az onnan érkező sugárzás Faraday-rotációját megmérve.

A kozmológiai modellek is figyelembe veszik az univerzum mágnességét. Legalább 10^{-16} T fluxussűrűség kell ahhoz, hogy a megfigyelhető világegyetemben kialakult struktúrákat és jelenségeket le lehessen származtatni a korábbi állapotokból. A mágnesség kialakulására vonatkozóan azonban csak elgondolások (illetve azokra épülő modellszámítások) vannak. Az egyik iskola szerint maga a

mágnesség primordiális: vagy az ősrobbanást követő kozmológiai infláció, vagy az ősi (elektrogyenge vagy kvark-hadron) fázisátmenetek során keletkezett, hogy aztán az utóbb kialakuló galaxisokban és azok halmazáiban dinámóhatással felerősödjön. A másik elgondolás szerint a mágneses mező csírái csak a már kialakult galaxisokban és galaxishalmazokban jöttek létre plazmaeffektusok során, s ugyan csak a dinámóhatás erősítette fel a mágneses csírákat. Tehát az alapkérdésre, hogy honnan ered a kozmosz mágnessége, még nem tudjuk a választ. Az égitestek és kozmikus jelenségek szerteágazó, tarka világát mindenesetre gazdagítja a világegyetem mágnessége, amelynek erőssége elképesztően tág határok között (legalább 10^{21} -szeres faktorial) változik (1. táblázat).

Kulcsszavak: *mágnesség, magnetár, mágneses befagyás, naptevékenység, differenciális rotáció, ferde rotátor, Zeeman-effektus*

IRODALOM

Erdős Géza – Balogh André (2012): A helioszféra háromdimenziós szerkezete. *Magyar Tudomány*. 12, 1419-1425. • <http://www.matud.iif.hu/2012/12/03.htm>

Kun Mária (2005): Fialat csillagok és környezetük kölcsönhatásai. *Fizikai Szemle*. 9, 309-313. • <http://wwwold.kfki.hu/fszemle/archivum/fsz0509/kuno509.html>

