

# A Naprendszer bolygóinak és néhány holdjának mágneses tere<sup>1</sup>

KIS KÁROLY<sup>2</sup>, WITTMANN GÉZA<sup>3</sup>

A Naprendszer bolygóinak mágneses teréről több mint harminc éve állnak rendelkezésre mérési adatok. Az űrszondák által végzett mérések mennyisége és minősége lehetővé tette azok értelmezését és a bolygók belső szerkezetének vázlatos meghatározását. Jelen cikk témája a szakirodalomban az elmúlt harminc év során publikált eredmények összefoglalása.

**K. KIS, G. WITTMANN: Magnetic fields of the planets and some of the satellites of the Solar System**

The magnetic fields of the planets of the Solar System have been measured in situ for about thirty years. The quality and quantity of the data obtained by the spacecrafts have made it possible to develop schematic models of the interiors of the planets. The published interpretations of the measurements are summarised.

## 1. Bevezetés

Az űrszondák által végzett mágneses mérések következtében részletes, de korántsem teljes ismeretekkel rendelkezünk a Naprendszer bolygóinak — és néhány esetben — azok holdjainak mágneses teréről. Az űrszondákon elhelyezett műszerek különböző célú méréseket végeznek, ezek közül a mágneses mérések feldolgozásának eredményeit foglaljuk össze. A mágneses mérések értelmezése olyan eredményeket szolgáltatott, amelyek jól használhatók a bolygók fejlődéstörténetének, továbbá belső szerkezetének megismerésében.

Az űrkutatási programok óriási összegeket igényelnek és magas színvonalú műszerezettséget kívánnak meg. Ennek illusztrálására szolgáljon néhány adat! A *Pioneer-11* űrszonda, amelynek tömege mindössze 250 kg, több műszer mellett hélium magnetométerrel és háromtengelyű fluxgate magnetométerrel is fel volt szerelve. Fluxgate magnetométerének tömege 272 gramm volt és működtetése 300 mW teljesítménnyel történt! A NASA tájékoztatása szerint a 30 évvel ezelőtt útjára indított *Pioneer-10* űrszondával is sikerült kapcsolatot létesítenie. Ennek a szondának egyetlen, még ma is működő műszere, a GM-számláló. A *Voyager-2* űrszonda 4 darab háromtengelyű fluxgate magnetométerrel rendelkezett, amelyek közül kettő-kettő azonos volt. Az egyik pár  $\pm 50\,000$  nT-től  $\pm 200\,000$  nT-ig terjedő tartományban, a másik pár  $\pm 50\,000$  nT-ig terjedő tartományban végzett méréseket (automatikus mérés határ beállításal). A *Voyager program* kifejlesztése és végrehajtása 11 000 ember/év munkát igényelt.

Mielőtt rátérnénk a bolygók mágneses terének ismertetésére, célszerűnek látszik a Föld mágneses terére vonatkozó ismeretek összefoglalása, hiszen a Föld mágneses terét ismerjük legrészletesebben, továbbá az alkalmazott számítási és értelmezési eljárások, bár hasonlóak a bolygók esetében is, az eredmények több esetben igen érdekes eltéréseket mutatnak a Földhöz képest.

## 2. A Föld mágneses terének jellegzetességei

A Naprendszer bolygóival történő összevetés érdekében megadjuk a Föld néhány jellemző adatát: az egyenlítői sugarra 6378,137 km, tömege  $5,976 \cdot 10^{24}$  kg, átlagsűrűsége  $5520 \text{ kg/m}^3$ , Naptól mért átlagos távolsága  $1,495979 \cdot 10^8$  km, azaz 1 CSE (CSillagászati Egység) [ZOMBECK 1990].

A földi mágneses térnek máig is érvényes analitikai leírását Karl Friederich GAUSS adta meg az *Allgemeine Theorie des Erdmagnetismus* (A földmágnesség általános elmélete) című könyvében, amely 1838-ban jelent meg. GAUSS szerint a belső eredetű mágneses tér  $W(r, \theta, \lambda)$  skalárpotenciálját gömbi polárkoordináta-rendszerben a

$$W(r, \theta, \lambda) = a \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left( \frac{a}{r} \right)^{n+1} (g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) P_n^m(\cos \theta) \quad (1)$$

sorfejtés írja le, ahol  $r$  a Föld középpontjától mért távolságot,  $\theta$  a gömbi pólustávolságot,  $\lambda$  a greenwichi kezdőmeridiántól mért gömbi hosszúságot,  $a$  a Föld egyenlítői sugarát,  $g_n^m$  és  $h_n^m$  a sorfejtés Gauss-féle együtthatóit, amelyeket az egész Földre kiterjedő mérések feldolgozása alapján lehet meghatározni,  $P_n^m(\cos \theta)$  az  $n$ -edfokú,  $m$ -edrendű gömbfüggvényt jelenti [CHAPMAN, BARTELS 1951; FARKAS 1964]. A mágneses teret a potenciál negatív gradiense határozza meg:

$$\mathbf{T}(r, \theta, \lambda) = -\text{grad}W = -\frac{\partial W}{\partial r} \mathbf{e}_r - \frac{1}{r} \frac{\partial W}{\partial \theta} \mathbf{e}_\theta - \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial W}{\partial \lambda} \mathbf{e}_\lambda \quad (2)$$

ahol  $\mathbf{e}_r$ ,  $\mathbf{e}_\theta$  és  $\mathbf{e}_\lambda$  az  $r$ ,  $\theta$  és  $\lambda$  irányú egységvektorokat jelentik.

Az elsőfokú együtthatók felhasználásával kiszámítható a földi mágneses teret első közelítésben leíró (az  $n=1$ -hez tartozó) centrikus dipólus teret létrehozó momentum és annak iránya. Az  $\mathbf{m}_d$  momentum értékét az

$$\mathbf{m}_d = \frac{4\pi}{\mu_0} a^3 \left( (g_1^0)^2 + (g_1^1)^2 + (h_1^1)^2 \right)^{1/2} \quad (3)$$

egyenlet adja meg, ahol  $\mu_0$  a vákuum mágneses permeabilitása. A dipólusmomentum értéke a 2000.0 epochára (2000. január 1-jén 0 órakor) érvényes együtthatók alapján  $7,84 \cdot 10^{22} \text{ Am}^2$ . A momentum irányának felszíni dőféspontjait nevezik földmágneses pólusoknak. Ezek szintén meg-

<sup>1</sup> Beérkezett: 2002. május 22-én

<sup>2</sup> ELTE Geofizikai Tanszék

1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/c.

<sup>3</sup> MOL Magyar Olaj- és Gázipari Rt. Kutatás-Termelés, Mélyfúrás és Geofizikai Felügyelet

1039 Budapest, Batthyány u. 45.

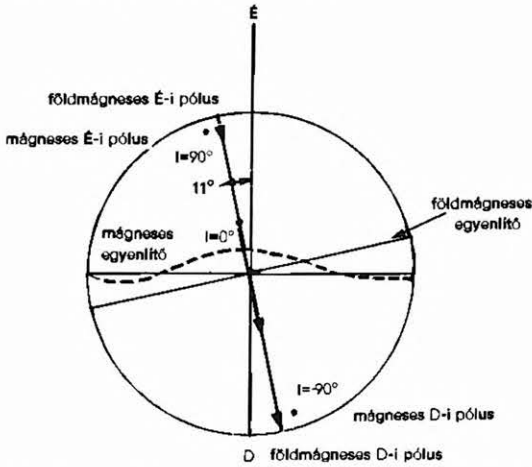
határozhatók az  $n=1$ -hez tartozó, Gauss-féle együtthatók felhasználásával, azaz

$$\theta_0 = \arctg \frac{\left( (g_1^1)^2 + (h_1^1)^2 \right)^{1/2}}{g_1^0} \quad \text{és} \quad \lambda_0 = \arctg \frac{h_1^1}{g_1^1}. \quad (4)$$

A földmágneses északi pólus koordinátái a 2000.0 epochára vonatkozóan  $\theta_0 = 10,9^\circ$ ,  $\lambda_0 = 288,9^\circ$ .

Kissé, de nem lényegesen jobb közelítése a földi mágneses tér forrásának az Adolf Schmidt által definiált excentrikus dipólus [SCHMIDT 1934], amely mintegy 480 kilométerre található a Föld középpontjától a  $\theta = 68^\circ$  és a  $\lambda = 146^\circ$  koordinátájú pont irányában.

Meg kell jegyezni, hogy a földmágneses pólusok helye valamelyest különbözik a tényleges, az  $I = \pm 90$  fokkal jellemzett mágneses pólusoktól (1. ábra). Hasonló megállapítás tehető a centrikus dipólus irányára merőleges és a Föld középpontján átmenő sík földfelszíni metszésvonala által meghatározott földmágneses és az  $I = 0$  fokkal jellemzett mágneses egyenlítőre (1. ábra).



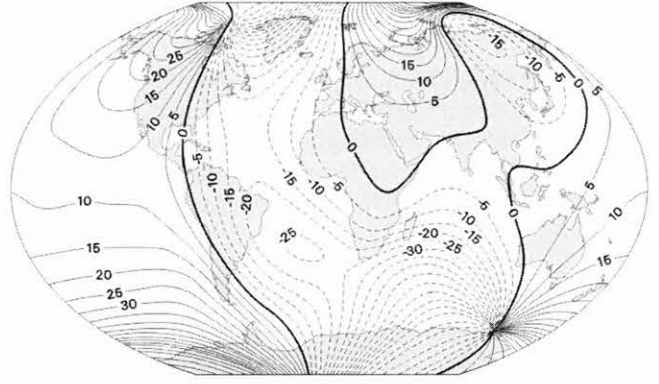
1. ábra. A földmágneses pólusok és a földmágneses egyenlítő, továbbá a mágneses pólusok és a mágneses egyenlítő elhelyezkedése

Fig. 1. The position of the geomagnetic poles, geomagnetic equator, magnetic poles, and magnetic equator

A 2000.0 epochára vonatkozó  $g_n^m$  és  $h_n^m$  együtthatók ismeretében meghatározhatók a 2000.0-ra vonatkozó IGRF összetevői. Az IGRF (International Geomagnetic Reference Field) alatt az egész Földre kiterjedő, adott epochára redukált mérések alapján meghatározott, a sorfejtésben  $n=10$ -ig figyelembe vett együtthatók alapján kiszámított mágneses teret értik. A 2., 3. és 4. ábrán a földi mágneses tér deklínációjának, inklinációjának és a totális tere abszolút értékének eloszlása látható a Föld felszínén.

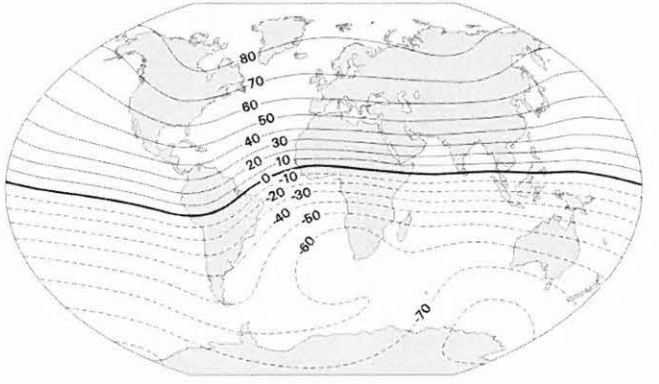
Az (1) egyenletben szereplő sorfejtésben az  $n=1$ -hez a dipólus tér, az  $n=2$ -höz a kvadrupólus tér, az  $n=3$ -hoz az oktopólus tér, míg a további  $n$ -ekhez a magasabb multipólus összetevők tartoznak. Az 5. ábrán a földi mágneses tér intenzitásának dipólus, kvadrupólus és oktopólus járuléka láthatók. Ezek aránya 1:0,14:0,07, azaz a földi mágneses tér dipólus közelítése jónak mondható.

A Föld és a mágneses térrel rendelkező bolygók kölcsönhatásba lépnek a napszéllel és a napszél által hordozott mágneses térrel. Ennek a kölcsönhatásnak az eredménye az a bolygók magnetoszférájának kialakulása. A Föld magneto-



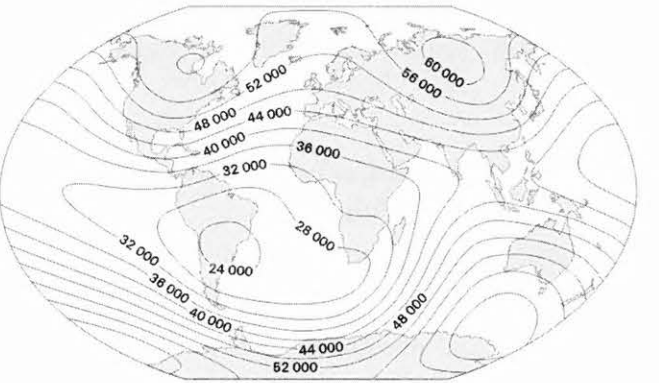
2. ábra. A deklínáció izogonjai a 2000.0-ra vonatkozó IGRF esetében, Winkler-féle vetületben ábrázolva. Az izovonalak egysége fok, a szaggatott izogonok a negatív értékeket jelölik [MANDEA, MACMILLAN 2000]

Fig. 2. Contour map of the IGRF 2000.0 for the  $D$  component, in Winkler's projection, isolines are given in degrees, dashed lines indicate negative values [MANDEA, MACMILLAN 2000]



3. ábra. Az inklináció izoklinjei 2000.0-ra vonatkozó IGRF esetében, Winkler-féle vetületben ábrázolva. Az izovonalak egysége fok, a szaggatott vonal a negatív értékeket jelöli [MANDEA, MACMILLAN 2000]

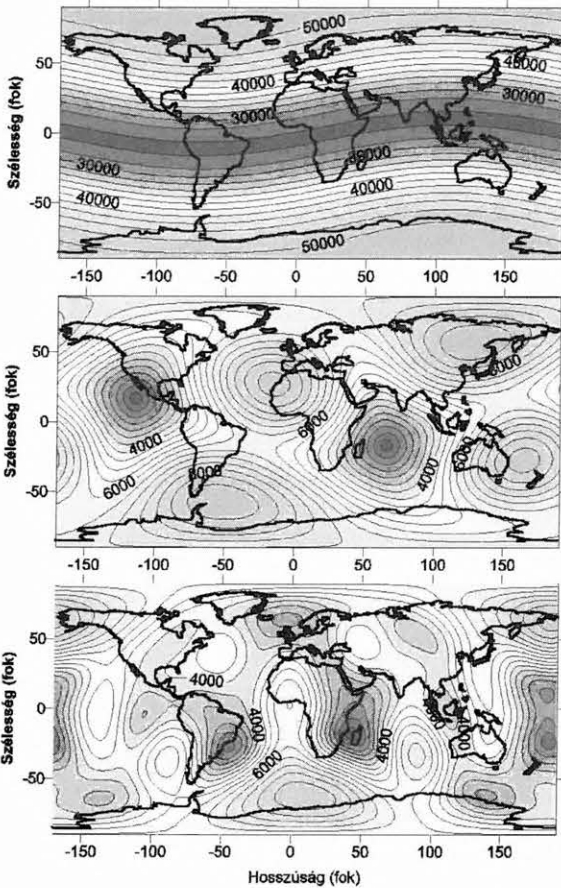
Fig. 3. Contour map of the IGRF 2000.0 for the  $I$  component, in Winkler's projection, isolines are given in degrees, dashed lines indicate negative values [MANDEA, MACMILLAN 2000]



4. ábra. A totális mágneses tér izodinamjai 2000.0-ra vonatkozó IGRF esetében, Winkler-féle vetületben ábrázolva. Az izovonalak egysége nT [MANDEA, MACMILLAN 2000]

Fig. 4. Contour map of the IGRF 2000.0 for the  $T$  component, in Winkler's projection, isolines are given in nT [MANDEA, MACMILLAN 2000]

szférájának határa a Nap irányában mintegy 10 földugrányira található. Ez a határ ott alakul ki, ahol a napszél kinetikus nyomása és a földi mágneses tér nyomása egyensúlyban van. A Nappal ellentétes oldalon a magnetoszféra közel 1000 földugrány távolságig terjed. A magnetoszféra csővéja a földi mágneses tér és a napszél által hordozott mágneses tér kölcsönhatásának következtében alakul ki (6. ábra).



5. ábra. A földi mágneses tér intenzitásának dipólus (a), kvadrupólus (b) és oktopólus (c) összetevői a 2000.0-ra vonatkozó együtthatókból meghatározva. Az izovonalak egysége nT

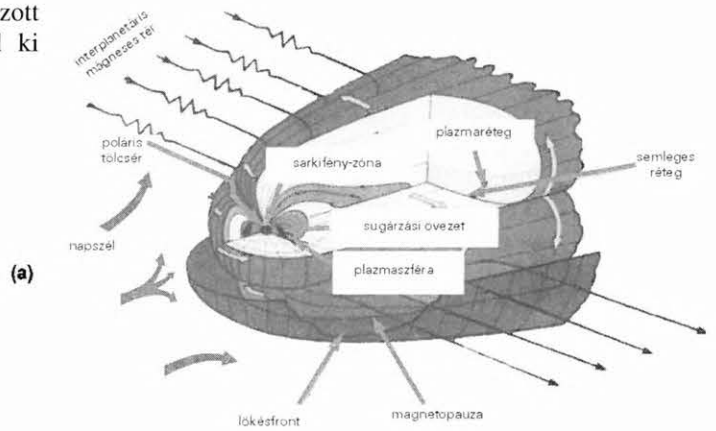
Fig. 5. The dipole (a), quadrupole (b), and octupole (c) intensities of the Earth's magnetic field from the IGRF coefficients for 2000.0. Isolines are given in nT

### 3. A belső eredetű mágneses teret létrehozó folyamatok

A belső eredetű mágneses tér a folyékony (külső) földmag jó elektromos vezetőképességű anyagának bonyolult konvekciós mozgására vezethető vissza, amelyeket termikus illetve kémiai eredetű heterogenitások hozhatnak létre (dinamóelmélet).

A Naprendszer bolygóit két csoportba lehet besorolni: a Föld típusú bolygók (Merkúr, Vénusz, Föld, Mars, Plútó?) és az óriásbolygók (Jupiter, Szaturnusz, Uránusz, Neptunusz) kategóriájába. Az elméletekkel és a mérésekkel összhangban a Föld típusú bolygók kérge és köpenye szilícium- és magnézium-oxidokból áll, és magjuk minden bizonnyal valamiféle vasötvözet. Az óriásbolygók ezzel szemben a Nap összetételéhez hasonló gáz kondenzálódott anyagából

épülnek fel. Magjuk valószínűleg vas- és magnézium-szilikátokból áll, míg a külső részek szilárd halmazállapotú víz, ammónia és metán keverékei, ezekhez jelentős mennyiségű hidrogén és hélium komponensek járulnak.



6. ábra. A Föld magnetoszférája, a napszél és a bolygóközi mágneses tér

Fig. 6. The magnetosphere of the Earth, the solar wind, and the interplanetary magnetic field

A földmagban kialakuló mágneses tér energetikai hátterre egyszerű számítással megbecsülhető [MERRILL, MCELHINNY 1983]. A mágneses tér energiasűrűsége:  $T^2/2\mu_0$ . A földi mágneses teret első közelítésben leíró dipólustér értéke a földmagban  $4 \cdot 10^{-3}$  T. Így a tér energiasűrűségére mintegy  $1 \text{ J/m}^3$  érték adódik. A földmag térfogatát nagyságrendileg  $10^{20} \text{ m}^3$ -nek tekintve a tér energiájára hozzávetőlegesen  $10^{31} \text{ J}$  adódik. A mágneses tér  $\tau$  lecsengési idejét a

$$\tau = \frac{L^2}{k_m} \quad (5)$$

összefüggés alapján lehet megbecsülni, ahol  $L$  a mágneses tér karakterisztikus mérete (ez most legyen azonos a földmag méretével, azaz  $3 \cdot 10^6 \text{ m}$ -rel),  $k_m$  pedig a mágneses diffuzivitás, amely fordítva arányos a  $\sigma$  vezetőképességgel:

$$k_m = \frac{1}{\sigma \mu_0} \quad (6)$$

A  $\sigma$  vezetőképesség legyen a fémes vezetőképességgel azonos nagyságú ( $\sigma = 10^6 \text{ A/Vm}$ )! Ezek szerint a földi mágneses tér  $\tau$  lecsengési idejére  $\sim 10^5$  évet kapunk, a mágneses tér fenntartásához  $\sim 10^8 \text{ W}$  teljesítmény szükséges.

A dinamófolyamat fenntartásához szükséges energia származhat radioaktív bomlásból. Ez a spontán folyamat hőtermeléssel jár. A Földben jelentős szerepet játszó radioaktív elemek: az uránium ( $^{238}\text{U}$ ), a tórium ( $^{232}\text{Th}$ ) és a kálium ( $^{40}\text{K}$ ). A földmag összetételére vonatkozó elképzelések szerint az uránium és a tórium jelenléte a magban elhanyagolható, viszont 0,1 százalék káliumtartalmat tételezünk fel. A bomlásból  $4 \cdot 10^{12} \text{ W}$  teljesítmény származhat. Teljesítmény eredhet a külső mag-belső mag határán történő fázisátalakulásból is. A belső mag a hűlés következtében növekszik és ez a fázisátalakulás  $10^{11}$ – $10^{12} \text{ W}$  teljesítményt hozhat létre.

BUSSE [1978] végzett számításokat a mágneses tér energiasűrűsége a Merkúrra, a Földre és a Jupiterre vonatko-



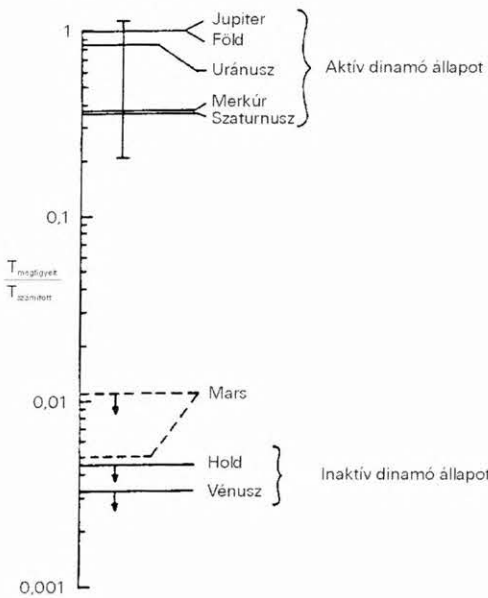
zón. BUSSE szerint mindhárom bolygó aktív dinamóval rendelkezik.

A CURTIS és NESS [1986, 1988] által levezetett összefüggés szerint eldönthető, hogy egy bolygó az aktív dinamóval rendelkező kategóriába kerül-e vagy sem. Az egyenlet a magnetosztrifikus egyensúlyból vezethető le. (A magnetosztrifikus egyensúly a Lorentz-erő és a Coriolis-erő egyensúlyát fejezi ki, és a két erő egyensúlyának fontos szerepe van a dinamófolyamatot leíró egyenletekben.) A levezetett egyenlet érdekessége, hogy olyan mennyiségeket tartalmaz, amelyek megfigyelhetők. Az egyenlet a

$$T_{\text{számított}} = r^{-3} \rho^{1/3} M^{1.54} \omega^{1/2} E^{1/6} T_{\text{Föld}} \quad (7)$$

alakot ölti, ahol  $T_{\text{számított}}$  a bolygó egyenlítői mágneses térének számított értéke,  $r$  a sugara,  $\rho$  az átlagsűrűsége,  $M$  a tömege,  $\omega$  a forgási szögsebessége,  $E$  a bolygó belső eredetű hőáramsűrűségének értéke. A bolygó sugara, átlagsűrűsége, tömege, szögsebessége és hőáramsűrűsége a Föld azonos adataira vannak normálva, így mértékegység nélküli mennyiségek. Ha a bolygó  $T_{\text{megfigyelt}}$  egyenlítői mágneses térének normáljuk az előző egyenletből meghatározott  $T_{\text{számított}}$  értékkel, akkor a hányadosok két kategóriába sorolhatók. Az egyik, ahol a  $T_{\text{megfigyelt}}/T_{\text{számított}} \approx 1$ ; a másik kategória esetében  $T_{\text{megfigyelt}}/T_{\text{számított}} \ll 1$ . Amennyiben a hányados közelítőleg egyenlő 1-gyel akkor fennáll a magnetosztrifikus egyensúly. Az egyensúly azt a kategóriát jelöli, amely az aktív dinamó állapotát jellemzi.

A 7. ábrán a (7) egyenlet alapján meghatározott mennyiségek láthatók logaritmikus skálán. A Naprendszer bolygói közül a Merkúr, a Föld, a Jupiter, a Szaturnusz, az Uránusz és valószínűleg a Neptunusz kerül az aktív dinamóval rendelkező égitestek csoportjába, míg a Vénusz, a Mars és a Hold a jelenleg aktív dinamóval nem jellemezhető kategóriába tartozik.



7. ábra. Az aktív és inaktív belső eredetű mágneses térrel rendelkező bolygók csoportosítása a Curtis–Ness összefüggés alapján [CURTIS, NESS 1988]

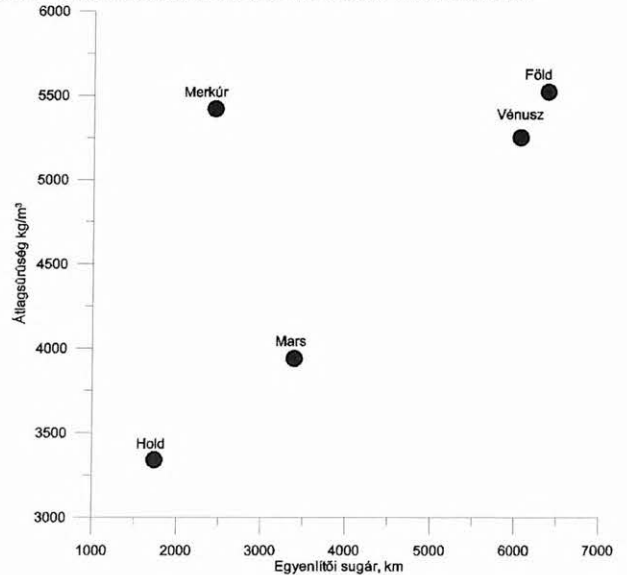
Fig. 7. The categories of the planets which have active or inactive intrinsic magnetic field of dynamo origin; the categories are determined by the Curtis–Ness scaling law [CURTIS, NESS 1988]

#### 4. Merkúr

A Merkúr a Naprendszer legbelső bolygója, amelynek egyenlítői sugara 2436 km, tömege  $3,3 \cdot 10^{23}$  kg, átlagsűrűsége  $5420 \text{ kg/m}^3$ , Naptól mért átlagos távolsága 0,3871 CSE [ZOMBECK 1990].

A Merkúr mágneses terére, illetve magnetoszférájára vonatkozó ismereteket NESS et al. [1975], WHANG [1977], NESS [1979], WHANG [1979] és RUSSEL [1993] tanulmányai foglalják össze. A Merkúr mágneses térének az 1973. november 3-án indított *Mariner-10* űrszonda magnetométere regisztrálta. Az űrszonda 1974-ben kétszer, míg 1975-ben egyszer közelítette meg a bolygót. A *Mariner-10* űrszonda esetében a megközelítés legkisebb távolsága 327 km volt, a mágneses tér 400 nT értékűnek adódott. Noha az űrszonda mérései nem tárták fel teljes részletességgel a mágneses tér szerkezetét, az adatok feldolgozása alapján meg lehetett határozni a momentum értékét, amely  $2 \cdot 10^{19}$ – $5 \cdot 10^{19} \text{ Am}^2$  tartományba esik [RUSSEL 1993] (ez a Föld momentumának 0,025–0,064%-át teszi ki). A momentum iránya 4–10 fokot zár be a bolygó forgástengelyével. A dipólus, a kvadrupólus és az oktapólus összetevők aránya a Merkúr esetében 1:0,45:0,29 [WHANG 1979], azaz a bolygó mágneses térében a kvadrupólus és az oktapólus összetevők nagyobb szerephez jutnak, mint a Föld esetében.

Ha a 8. ábrát tekintjük, amely a Föld típusú bolygók és a Hold átlagsűrűségét ábrázolja egyenlítői sugaruk függvényében, akkor érdekes következtetésre juthatunk a Merkúr belső szerkezetét illetően. Ha feltételezzük, hogy az említett bolygó köpenye és magja hasonló összetételű, mint a Földé, akkor a Merkúr magjának sugarára 1500 km adódik, ami kicsit több, mint az egyenlítői sugarának 60%-a. A dinamóelméletben elfogadott Busse-féle [1978] becslés alapján meghatározott mágneses energia lehetővé teszi az aktív dinamó működését a Merkúrra vonatkozóan.

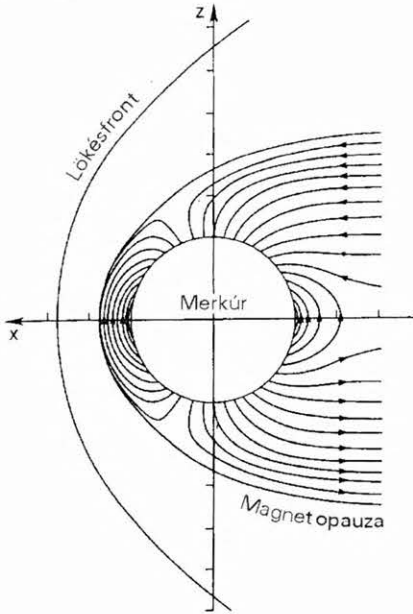


8. ábra. A Merkúr, a Vénusz, a Föld, a Mars és a Hold átlagsűrűsége egyenlítői sugaruk függvényében

Fig. 8. The average density of the Mercury, Venus, Earth, Mars, and Moon versus their equatorial radius

A Merkúr magnetoszférájának alakja a 9. ábrán látható, amely hasonló a Föld magnetoszférájához, bár mérete lé-

nyegesen kisebb, mint a Földé: a Nap irányában  $(1,85 \pm 0,15) R_{\text{Merkúr}}$  távolsáig terjed, ami 5–6-szor kisebb, mint a Föld esetében.



9. ábra. A Merkúr magnetoszférájának dél-éjfél irányú metszete [RUSSEL 1993]

Fig. 9. The noon-midnight meridian of the Mercury's magnetosphere [RUSSEL 1993]

Mivel a Merkúr bolygóról kevés in situ méréssel rendelkezünk, ezért a NASA (National Aeronautical and Space Administration, az Egyesült Államok Légügyi és Űrhajózási Igazgatósága) és az ESA (European Space Agency, az Európai Űrügynökség) kutatási programjában szerepel a legbelső bolygó kutatása. A NASA 2004-ben tervezi a *MESSENGER* (MERCURY SURFACE SPACE ENVIRONMENT GEOCHEMISTRY AND RANGING) nevű, míg az ESA 2009-ben a *BeppiColombo* nevű űrszonda indítását a Merkúr részletes vizsgálatára. Az ESA által tervezett űrszonda nevét Giuseppe Colombo olasz csillagász után kapta.

## 5. Vénusz

Ha a Vénusz bolygó 6053 km-es egyenlítői sugarát,  $4,87 \cdot 10^{24}$  kg tömegét,  $5250 \text{ kg/m}^3$  átlagsűrűségét [ZOMBECK 1990] és ezeket összevetjük a Föld adataival, akkor mágneses terére vonatkozóan is hasonlóságot várhatunk. Az űrszondák mérései egészen más jellegzetességet mutattak. A bolygó Naptól mért átlagos távolsága 0,7233 CSE.

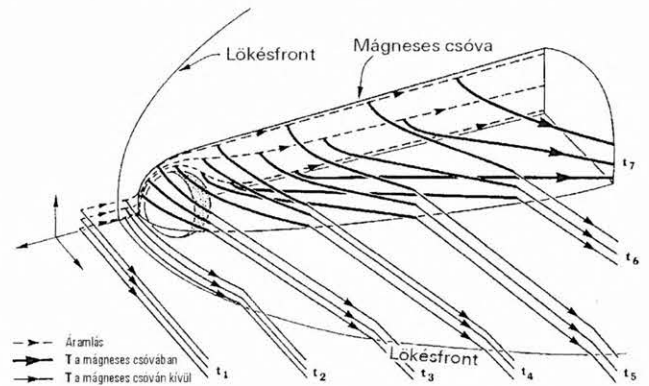
A Vénusz mágneses terére vonatkozó eredményeket RUSSEL et al. [1980], PHILLIPS, RUSSEL [1987] és RUSSEL [1993] tanulmányai foglalják össze. A Vénusz mágneses terét — egyéb vizsgálatok mellett — a *Mariner-2* (1962. augusztus 27.), *Venyera-4* (1967. június 12.), *Mariner-4* (1967. június 14.), *Venyera-9* (1975. június 8.), *Venyera-10* (1975. június 14.), *Pioneer Venus-1* (1978. május 20.), *Pioneer Venus-2* (1978. augusztus 8.) (zárójelben az indítás időpontja) űrszondák mérték meg.

RUSSEL et al. [1980] részletesen ismerteti a *Pioneer Venus* orbiter egységének mágneses méréseit, azok feldolgozását, illetve összefoglalja a korábbi mérésekből levont

következtetéseket. Az orbiter egységet közel poláris ( $105^\circ$  inklinációjú) pályára állították, amely 140 km-re közelítette meg a bolygót. A mérések alapján a Vénusz mágneses momentumára  $(4,29 \pm 2,03) \cdot 10^{18} \text{ Am}^2$  értéket határoztak meg. Ez az érték a Föld mágneses momentumának 0,005%-a. A dipólus iránya 15 fokot zár be a bolygó forgástengelyével. D. J. STEVENSON okfejtése szerint [RUSSEL 1993] a Vénusz valószínűleg úgy differenciálódott, mint a Föld, azzal a különbséggel, hogy a bolygó belső magja még nem alakult ki, mivel a Vénusz magjában a hőmérséklet valószínűleg nagyobb az olvadási pontnál. A belső mag kialakulása során bekövetkező fázisátalakulás következtében szabadulhat fel olyan mértékű energia, amely a dinamófolymat elindulását eredményezheti. Így a Vénusz valószínűleg a dinamófolymat megindulása előtti állapotban van.

A *Pioneer Venus-1* radarmérései alapján térképezték fel a bolygó topográfiáját, de nem találtak kapcsolatot a felszíni alakzatok és a mágneses tér szerkezete között.

Az űrszondák és a bolygó körüli pályára állított szondák vizsgálták a Vénusz mágneses csóvját is. A mérések szerint a bolygó kis intenzitású mágneses tere nem elegendő a Földön tapasztalt csóva kialakításához. A mért gyenge mágneses csóva úgy alakul ki, hogy a bolygó keringési pályasíkjában elhelyezkedő bolygóközi mágneses tér elvonszolódik a bolygó mint akadály körül (10. ábra).



10. ábra. A Vénusz mágneses csóvjája [RUSSEL 1993]

Fig. 10. The magnetic tail of Venus [RUSSEL 1993]

## 6. Mars

A Naprendszer Vörös Bolygónak is nevezett égitestje hamarosan a legintenzívebben kutatott bolygóvá válik a közeljövő űrkutatási programjainak következtében, így mágneses terére vonatkozó ismereteink is lényegesen bővülni fognak. A Mars egyenlítői sugara 3393 km, tömege  $0,642 \cdot 10^{24}$  kg, átlagsűrűsége  $3940 \text{ kg/m}^3$ , a Naptól mért átlagos távolsága 1,542 CSE [ZOMBECK 1990].

A bolygó mágneses terére vonatkozó kutatások első fázisát a *Mariner-4* (1964. november 28.), a *Marsz-2* (1971. május 19.), *Marsz-3* (1971. május 28.), *Marsz-5* (1973. július 25.), *Viking-1* (1975. június 20.), *Viking-2* (1975. szeptember 9.), és a *Fobosz-2* (1988. július 12.) űrszondák mérései jelentették [DOLGINOV et al. 1976, DOLGINOV 1978a, 1978b, RUSSEL 1978, RUSSEL 1979, RUSSEL et al. 1984, RUSSEL 1993], amelyek nyomán meghatározásra került a Mars  $2,5 \cdot 10^{19} \text{ Am}^2$  értékű mágneses momentuma.

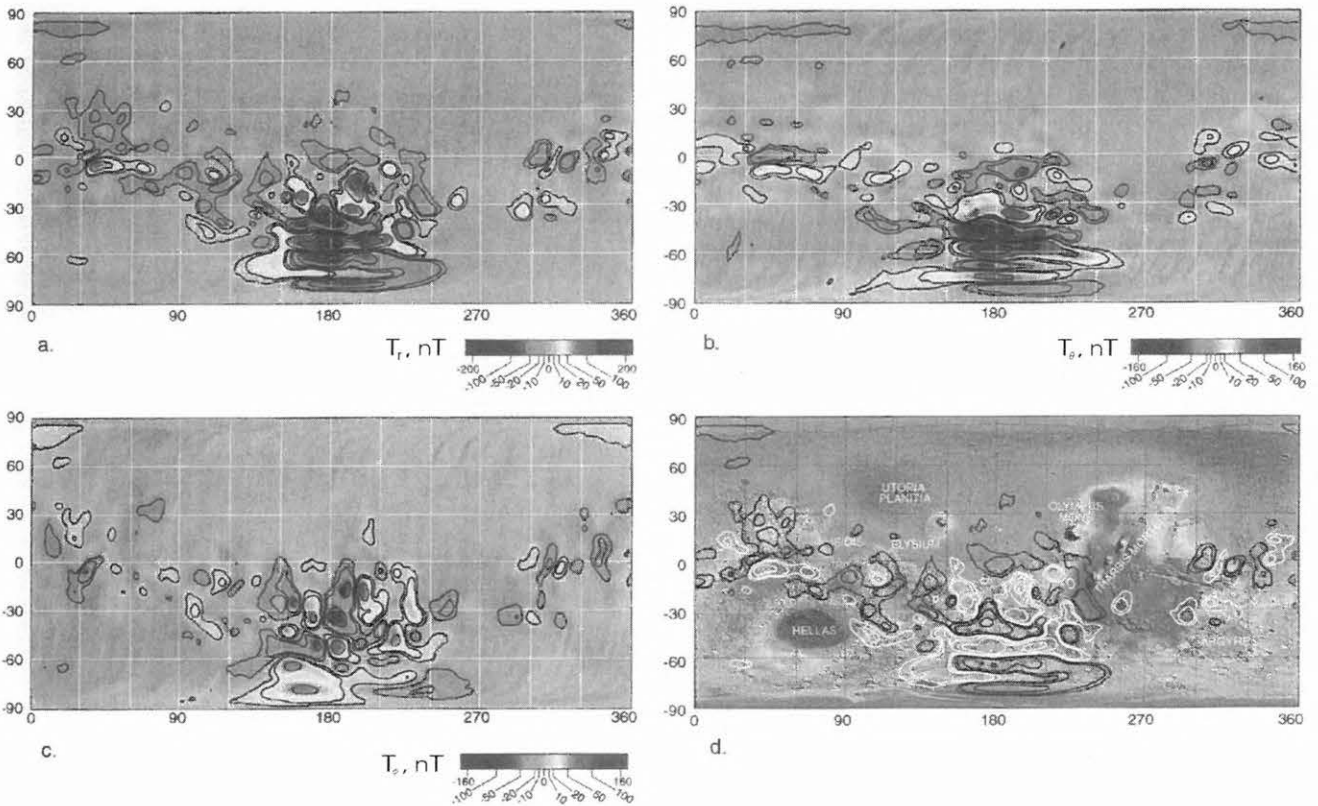
Ez a Föld mágneses momentumának mintegy 0,032%-a. Ezeknek a méréseknek feldolgozása során felmerült a kérdés: a Mars rendelkezik-e belső eredetű mágneses térrel?

A Mars kutatásának második fázisát a *Mars Global Surveyor* (1996. november 7.) mérései, illetve azok feldolgozása jelentette. Természetesen az újabb mérési adatokat összevetették a korábbi eredményekkel. A kutatások újabb eredményeit ACUÑA et al. [1992], ACUÑA et al. [1999], CONNERNEY et al. [1999], HARGRAVES et al. [2000], NIMMO, STEVENSON [2000], ACUÑA et al. [2001], CONNERNEY et al. [2001] tanulmányai tartalmazzák. Az újabb mérések nyomán a Mars mágneses momentumát  $2 \cdot 10^{17}$  Am<sup>2</sup> értékre módosították [ACUÑA et al. 2001].

A Naprendszer égitestjei közül három esetében rendelkezünk paleomágneses mérésekkel, amelyek alapvető adatokat szolgáltatnak a mágneses tér múltjára vonatkozóan. Kőzetminták állnak rendelkezésre a Holdról, a Marsról és természetesen a Földről. A Marsról származó, a szakirodalomban röviden SNC meteoritoknak nevezett közetemcsék jelölése az első megtalálási helyükre utal: Shergotty (India), Nakhla (Egyiptom), Chassigny (Fran-

ciaország). Ezek a közetemcsék kristályosodott lávából származnak, feltehetően a Marson bekövetkezett nagyméretű meteorbecsapódás következtében kerültek a Földre. A nagyméretű meteorbecsapódás közölhet olyan mértékű mozgási energiát a közetemcsékkel, hogy azok sebessége meghaladja a marsi szökési sebességet (5 km/s) és a bolygóközi térbe távoznak. Kedvező esetben ezek a szemcsék a Földre is eljutnak. Az Antarktiszon talált SNC meteoritok gázzárványainak analízise hasonló eredményeket szolgáltatott, mint amelyeket a Marsra leszállt *Viking* szondák mérései adtak. Az SNC meteoritok paleomágneses vizsgálata szerint a közetemcsék mágnesesítése 103–104 nT intenzitású mágneses térben történt. A Mars egyenlítőjén a jelenlegi átlagos mágneses tér értéke 20–60 nT.

A *Mars Global Surveyor* bolygókörüli pályája során részletes mágneses méréseket végzett. Ezekből meghatározták a Mars mágneses anomália térképét (11. ábra) [ACUÑA et al. 2001; CONNERNEY et al. 2001], amelyből megállapítható, hogy a Mars jelenleg nem rendelkezik globális (belső eredetű) mágneses térrel. Az anomáliáktól el-



11. ábra. A Mars mágneses anomália térképe 400 km-es magasságból mérve (a) a mágneses tér radiális komponense; (b) a mágneses tér  $\theta$  irányú komponense; (c) a mágneses tér  $\lambda$  irányú komponense (hosszúság irányú); (d) a mágneses tér radiális komponense és a topográfia együttes ábrázolása [CONNERNEY et al. 2001]

Fig. 11. Magnetic anomaly maps of the Mars at 400 km altitude. (a) The radial component of the magnetic field, (b) the  $\theta$  component of the magnetic field, (c) the  $\lambda$  component of the magnetic field, (d) comparison of the radial field component with the topography [CONNERNEY et al. 2001]

tekintve a felszíni tér a bolygó egyenlítője mentén  $\sim 0,5$  nT. A kéregből származó anomáliák maximuma eléri a 220 nT értéket. A mágneses anomáliák érdekes eloszlást mutatnak. Az erősebben mágnesezett kéreg a bolygó déli félgömbjén jelentkezik, míg az északi félgömbön, a marsi mélyföldön nem találhatók mágneses anomáliák. Az anomáliáknak

ez az eloszlása a mareológiának jelenleg még meg nem oldott kérdése. Amennyiben elfogadjuk — és ezt az SNC meteoritok mágneszettsége alátámasztja —, hogy a Mars mintegy 4,6–3,8 milliárd évvel ezelőtt (a marsi kronológia szerint a Noachian korban) rendelkezett aktív dinomóval, akkor az anomáliák kialakulása valószínűleg ekkor történ-



hetett. A térképek alapján látható, hogy a Hellas és Argyre becsapódási medencék nem mutatnak mágneses anomáliát. Ezeknek a becsapódási medencéknek a korát 300 millió évnél fiatalabbnak tartják [ACUÑA et al. 2001]. Az északi félgömbön a marsi mélyföldeken található, alig mágnesezett marsi kéreg valószínűleg később, a marsi dinamó működésének megszűnte után alakult ki. A Mars déli félgömbjén a Terra Sirenum és a Terra Cimmeria régióban 100 km szélességű és 2000 km hosszúságú, közel párhuzamos mágneses anomáliákat határoztak meg [CONNERNEY et al. 1999]. Ezeknek jellege hasonló a földi óceáni hátságok területén mért mágneses anomáliákhoz. Az anomáliák alakjából a földi lemeztectonikához hasonló folyamatot tételeznek fel. A közel 400 km-es magasságban mért 100–200 nT intenzitású mágneses anomáliákat valószínűleg nagy mágnesezettségű kőzetek okozzák. Az anomáliák amplitúdója mintegy a 20-szorosa a *Magsat* által a földközeli pályán hasonló magasságban mért mágneses anomáliáknak.

A Marson mért mágneses anomáliák kialakulását és a bolygó termális fejlődését NIMMO és STEVENSON [2000] vetette össze. Modellszámításokkal azt vizsgálták, hogy milyen mértékű — a bolygó magjából származó — hőáram szükséges a dinamó folyamat elindulásához és fenntartásához. Arra a következtetésre jutottak, hogy a marsi dinamó a bolygó első 500 millió éves története során működött, és a kőzetek remanens mágnesezettsége ebből az időszakból származik.

A Mars kutatásának harmadik fázisát a 2003 decemberében a Marsra leszálló *Beagle-2* űrszonda (ESA) és a NASA által kiválasztott tíz újabb Mars-szonda jelenti majd. Ezeknek az indítását 2007-től tervezik és a szondák kifejlesztésére és elkészítésére 300 millió dollárt fordítanak.

## 7. Jupiter

A Jupiter a Naprendszer legnagyobb bolygója. A Jupiter egyenlítői sugara 71 372 km, tömege  $1,9 \cdot 10^{27}$  kg, átlagsűrűsége  $1330 \text{ kg/m}^3$ , Naptól mért átlagos távolsága 5,2 CSE [ZOMBECK 1990].

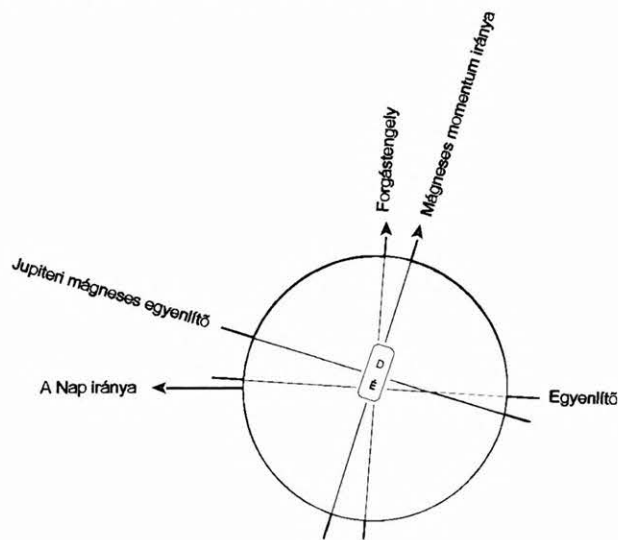
A Jupiter mágneses terére vonatkozó vizsgálatokat ACUÑA és NESS [1976], SMOLUCHOWSKI [1979], CONNERNEY [1981], CONNERNEY et al. [1982] és CONNERNEY [1993] tanulmányai foglalják össze.

A Jupiter mágneses tere az űrszondák in situ mérései előtt is ismert volt. 1955-ben regisztrálták a bolygó 22 MHz-es rádiósugárzását, amelyet nem-termikus eredetű sugárzásként azonosítottak. Ez a rádiósugárzás a Jupiter belső eredetű mágneses tere által befogott és Van Allen övezetében nagy sebességre gyorsított elektronok szinkrotron sugárzásának felel meg. Az említett rádiósugárzás vizsgálatából meg lehetett becsülni a Jupiter dipólus terének a forgástengelyével bezárt szögét, amely  $9,5^\circ$ -nak adódott, továbbá momentumát, amelynek értéke  $4,25 \cdot 10^{27} \text{ Am}^2$  [CONNERNEY 1993]. Ezeknek az értékeknek alapján tervezték meg a későbbi űrszondák mágneses méréseit.

Az első in situ mágneses méréseket (más mérések mellett) az 1972. március 2-án és az 1973. április 6-án felbocsátott *Pioneer-10* és *-11* űrszondák végezték 1973 decemberében, illetve 1974 decemberében. A *Pioneer-10*  $1,7 R_{\text{Jupiter}}$ , míg a *Pioneer-11* űrszonda  $6 R_{\text{Jupiter}}$  távolságra közelítette meg a Jupitert. A *Pioneer-10* és *-11* űrszondák

mágneses méréseinek egyik érdekes eredménye a Jupiter egyenlítői zónájában folyó, lemez formájú áramrendszer detektálása. Közeliítőleg  $300 \cdot 10^6$  A áram folyik keleti irányban. Ez mintegy  $5 R_{\text{Jupiter}}$  távolságtól körülbelül  $50 R_{\text{Jupiter}}$  távolságra terjed, vastagsága eléri az  $5 R_{\text{Jupiter}}$  méretet. A Jupiter Io holdjának pályája ( $5,9 R_{\text{Jupiter}}$ ) keresztezi ezt az áramrendszert [ACUÑA, NESS 1976].

Az 1977. augusztus 20-án indított *Voyager-2* és az 1977. szeptember 5-én pályára bocsátott *Voyager-1* űrszondák 1979. július 9-én, illetve 1979. március 5-én érték el a Jupitert. A *Voyager* űrszondák sok egyéb érdekes mérés mellett a Jupiter mágneses terét is vizsgálták. A *Voyager-1* űrszonda  $4,9 R_{\text{Jupiter}}$  távolságra közelítette meg a Jupitert, míg a *Voyager-2*  $10 R_{\text{Jupiter}}$  távolságban haladt el a bolygó mellett. A *Voyager* űrszondák mérései megerősítették a *Pioneer* űrszondák mágneses méréseiből meghatározott eredményeket, illetve pontosították azokat. A *Voyager* űrszondák mérései alapján a Jupiter mágneses momentumának értéke  $1,48 \cdot 10^{27} \text{ Am}^2$  (ez a Föld momentumának közel 18 900-szorosa), a hajlásszöge a forgástengelyhez  $13,3^\circ$  a  $194^\circ$  hosszúság irányában. A dipólus excentrikus helyzetű, távolsága a bolygó középpontjától  $0,1 R_{\text{Jupiter}}$  a forgástengely mentén. A 12. ábra mutatja a Jupiter egyenlítőjét és forgástengelyét, továbbá a bolygó excentrikus helyzetű dipólusának elhelyezkedését és a dipólusra merőleges jupiteri mágneses egyenlítő pozícióját. A Jupiter mágneses terében a dipólus, kvadrupólus és az oktupólus összetevők 1:0,24:0,21 arányúak [ACUÑA, NESS 1976].



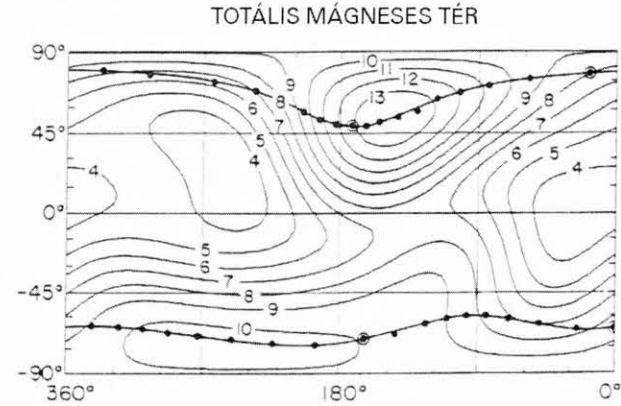
12. ábra. A Jupiter forgástengelyének és egyenlítőjének elhelyezkedése; excentrikus mágneses momentumának iránya és a jupiteri mágneses egyenlítő helyzete

Fig. 12. Axis of rotation and equator of the Jupiter; direction of the excentric magnetic moment of the planet and the Jovian magnetic equator

A 13. ábrán a Jupiter totális mágneses terének felszíni eloszlása látható. A bolygó mágneses tere az egyenlítői régióban 300 000 nT, míg az északi poláris területeken a 1 400 000 nT-t is eléri [ACUÑA, NESS 1976].

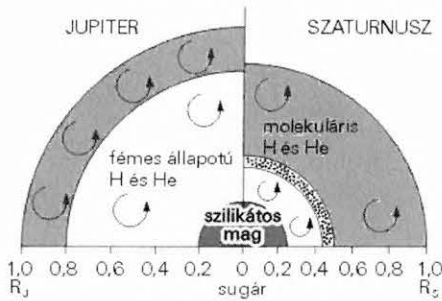
Az óriásbolygók szerkezetének leírására a Stevenson-féle modellt használják [CONNERNEY 1993]. SMOLUCHOWSKI [1979] és JOHNSON [2000] vizsgálatai szerint a  $\text{H}_2 \rightarrow$  fémes vezetőképeségű H fázisátalakulás 200–300 GPa nyomás mellett következik be, ami a Jupiter esetében  $(0,8-0,75) R_{\text{Jupiter}}$

sugár mellett áll elő. Ebben a nyomástartományban a sűrűség 26%-kal növekszik. A Jupiter intenzív mágneses tere a  $(0,8-0,2) R_{\text{Jupiter}}$  sugárral jellemzett tartományban lejátszódó folyamatok következtében jön létre. A 14. ábrán a Jupiter (valamint a Szaturnusz) belső szerkezetének Stevenson-féle modellje látható [CONNERNEY 1993]. A bolygó legkülső héja, amely  $(1-0,8) R_{\text{Jupiter}}$  kiterjedésű, folyékony halmazállapotú hidrogént és héliumot tartalmaz. Ebben a tartományban konvekciós áramlások mehetnek végbe. Az ezt követő héj a  $(0,8-0,2) R_{\text{Jupiter}}$  tartományban a hidrogén és a hélium fémes vezetőképes állapotban van. A bolygó magja valószínűleg vas- és magnézium-szilikátokból épül fel. A bonyolultabb szerkezetű mágneses tér feltehetően a forrásnak a bolygó felszínéhez viszonylag közeli helyzetéből ered.



13. ábra. A totális mágneses tér eloszlása a Jupiter felszínén, az izovonalak egysége 105 nT; az Io holdon átmenő erővonalak talppontját pontok mutatják [ACUÑA, NESS 1976]

Fig. 13. Contours of the total magnetic field of Jupiter, isolines are given in 105 nT units; the foot of the Io flux tube is indicated by dots [ACUÑA, NESS 1976]



14. ábra. A Jupiter és a Szaturnusz belső szerkezetének Stevenson-féle modellje [CONNERNEY 1993]

Fig. 14. The schematic model of Jupiter and Saturn by Stevenson [CONNERNEY 1993]

A Jupiter Io nevű holdja áthalad a bolygó mágneses terén. Azoknak a mágneses erővonalaknak a talppontjait, amelyeket az Io keresztesz, a 13. ábra szintén feltünteti.

További mágneses méréseket végeztek a Jupiter körül az 1989. április 4-én felbocsátott *Galileo*, és az 1990. október 6-án indított *Ulysses* űrszondák. Az előbbi 1995 decemberétől két évig, míg az utóbbi 1992 februárjában végzett különböző, többek között mágneses méréseket.

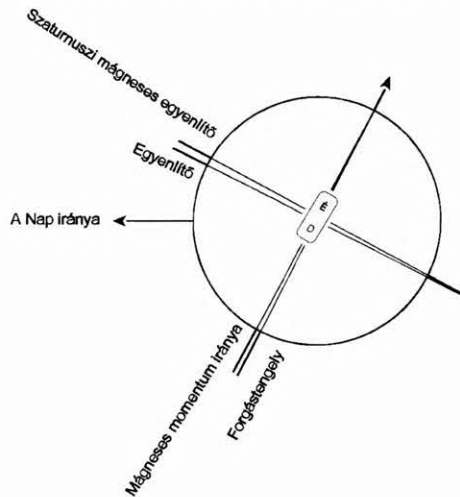
A *Galileo* űrszonda megmérte a Jupiter legnagyobb holdjának, a Ganymedesnek saját belső eredetű mágneses terét. Feltételezik, hogy a Ganymedes 1500 km sugarú,

vas-vasszulfid összetételű maggal rendelkezik, amelyet 700 km vastagságú köpeny vesz körül [JOHNSON 2000]. A *Voyager* űrszondák sarki fényt észleltek a Jupiter poláris zónájában, a *Galileo* űrszonda a Jupiter légkörében villámokat regisztrált, amelyeknek a fényessége 1000-szerese a Földön látottaknál [JOHNSON 2000].

## 8. Szaturnusz

A Szaturnusz a Naprendszer második legnagyobb bolygója, egyenlítői sugara  $60\,208\text{ km}$ , tömege  $5,686 \cdot 10^{26}\text{ kg}$ , átlagsűrűsége  $690\text{ kg/m}^3$ , Naptól mért átlagos távolsága  $9,539\text{ CSE}$  [ZOMBECK 1990].

A Szaturnusz mágneses terét a *Pioneer-11*, a *Voyager-1* és *-2* űrszondák mérték meg. A mérések értelmezését SMOLUCHOWSKI [1979], ACUÑA et al. [1983], CONNERNEY [1993] tanulmányai ismertetik. A *Pioneer-11* űrszonda 1979 szeptemberében haladt el a Szaturnusz mellett, a *Voyager-1* 1980 novemberében, a *Voyager-2* 1981 augusztusában végzett mágneses méréseket. A *Pioneer-11* közelítette meg a bolygót legjobban, míg a *Voyager-1* és *-2* nagyobb távolságban végzett méréseket. A Szaturnusz mágneses momentumának értéke  $4,37 \cdot 10^{25}\text{ Am}^2$ , amely a Föld momentumának 557-szerese. A momentum iránya 1 fokot zár be a bolygó forgástengelyével, polaritása fordított a földihez viszonyítva, és  $2400-3000\text{ km}$ -re excentrikus északi irányában [ACUÑA, NESS 1980; ACUÑA et al. 1983]. A 15. ábrán a Szaturnusz egyenlítőjének és forgástengelyének elhelyezkedése látható. Az ábra mutatja a bolygó kicsit excentrikus helyzetű dipólusának helyét, a momentum irányát és a szaturnuszi mágneses egyenlítőt. A Szaturnusz mágneses tere közel tengelyszimmetrikus, a mágneses terét lényegében a zonális harmonikusok írják le. A dipólus és kvadrupólus összetevők aránya  $1:0,076$ . A Szaturnusz egyenlítőjén a mágneses tér értéke  $18\,000\text{ nT}$ , míg az északi pólusán  $84\,000\text{ nT}$ , a déli pólusán  $65\,000\text{ nT}$ .



15. ábra. A Szaturnusz forgástengelyének és egyenlítőjének elhelyezkedése; excentrikus mágneses momentumának iránya és a szaturnuszi mágneses egyenlítő helyzete

Fig. 15. Axis of rotation and the equator of the Saturn; direction of the excentric magnetic moment of the planet and the Saturnian magnetic equator

A Szaturnusz belső szerkezetét a 14. ábrán látható Stevenson-féle modellel írják le [STEVENSON 1980;



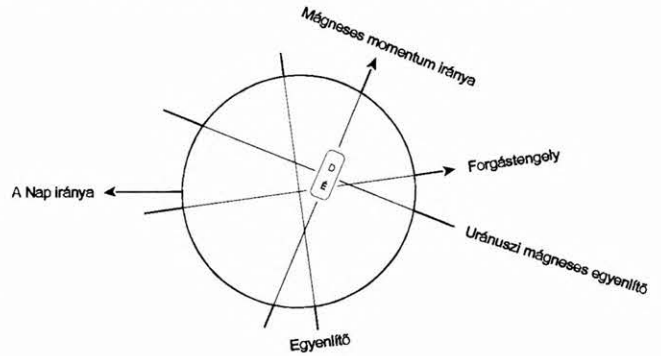
CONNERNEY 1993]. A bolygó külső héja, amely sugarának feléig terjed, molekuláris szerkezetű hidrogénből és héliumból áll. Ez a héj elektromos szempontból szigetelőnek tekinthető, benne konvekciós áramlások mennek végbe. A fémes vezetőképeségű H fázisátmenet a bolygó belsejében, a sugarának fele-ötöde mélységben következik be. Ebben a rétegben is áramlások mehetnek végbe. A mag külső határán viszonylag vékony, fémes vezetőképeségű héj található, amelyben áramlás nem következik be. A mag legbelső része szintén fémes vezetőképeségű vas- és magnézium-szilikátokból épülhet fel. Stevenson a Szaturnusz mágneses terének tengelyszimmetrikus formáját a mag külső héjának és az alatta található réteg differenciális rotációjával magyarázza.

## 9. Uránusz

Az Uránusz a nagybolygók egyike, amelynek egyenlítői sugara 26 150 km, tömege  $8,69 \cdot 10^{25}$  kg, átlagsűrűsége  $1190 \text{ kg/m}^3$ , Naptól mért átlagos távolsága 19,182 CSE.

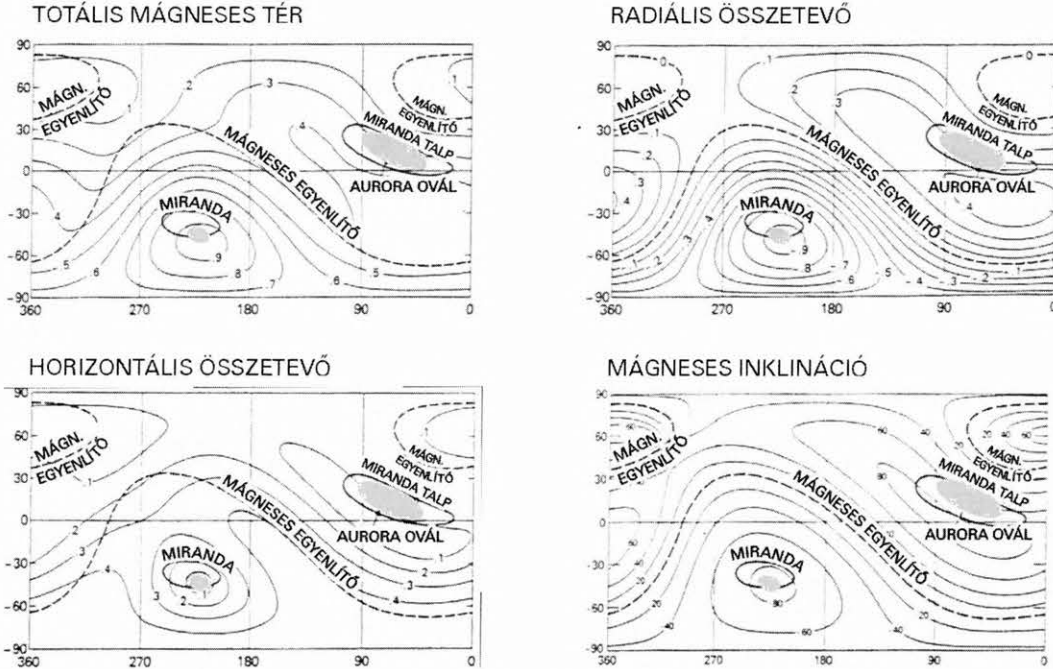
Az Uránusz mágneses terét a *Voyager-2* űrszonda mérései tárták fel. A mérések eredményeit CONNERNEY et al. [1987], CONNERNEY [1993] és HOLME, BLOXHAM [1996] tanulmányai ismertetik. A *Voyager-2* űrszonda 1986. január 24-én közelítette meg a bolygót. Az űrszonda 109 569 km-es legközelebbi távolságban 413 nT mágneses teret mért. A mágneses tér méréseit a 209 200 km-es közelítéstől a 209 200 km-es távolságig végezték el. A mérések alapján  $4,113 \cdot 10^{24} \text{ Am}^2$  értéket határoztak meg az Uránusz mágneses momentumára. Ez a Föld mágneses momentumának 52,5-szerese. Az Uránusz momentuma 60 fokot zár be a bolygó forgástengelyével,

7845 km-rel excentrikus a forgástengely mentén [CONNERNEY et al. 1987]. A 16. ábrán az Uránusz forgástengelyének és egyenlítőjének, továbbá excentrikus helyzetű dipólusának és az uránuszi mágneses egyenlítőnek elhelyezkedése látható. A dipólus-kvadrupólus összetevők aránya 1:0,7, azaz a mágneses tér a Földtől lényegesen különböző szerkezetű. A 17. ábrán az Uránusz felszínére vonatkozó totális mágneses tér, a tér radiális és horizontális összetevője és inklinációja látható. Az ábra feltünteti azoknak az erővonalaknak a talp-pontjait, amelyeket a bolygó Miranda nevű holdja keresztesz. Vonalkázott terület jelzi az aurora ovál lehetséges helyzetét.



16. ábra. Az Uránusz forgástengelyének és egyenlítőjének elhelyezkedése; excentrikus mágneses momentumának iránya és az uránuszi mágneses egyenlítő helyzete

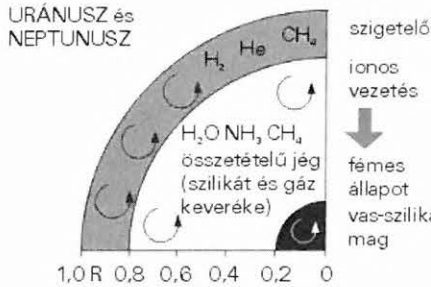
Fig. 16. Axis of rotation and equator of the Uranus; direction of the excentric magnetic moment of the planet and the Uranian magnetic equator



17. ábra. Az Uránusz totális mágneses tere, mágneses terének radiális és horizontális összetevője a felszínen; az izovonalak egyisége 105 nT. Az inklináció értékei a bolygó felszínén fok egységben. A vonalkázott terület a lehetséges aurora ovál helyzetét mutatja. Az ábra feltünteti azoknak az erővonalaknak a talp-pontját, amelyeket a bolygó Miranda nevű holdja keresztesz [CONNERNEY et al. 1987]

Fig. 17. Contours of the total magnetic field, the radial component, and the horizontal component on the surface of Uranus, isolines are given in 105 nT units. The dip angles on the Uranus surface isolines are given in degrees; the possible auroral oval is indicated by shading. The figures indicate the foot of the Miranda flux tube [CONNERNEY et al. 1987]

A 18. ábrán az Uránusz belső szerkezetének Stevenson-féle modellje látható [CONNERNEY 1993]. A bolygó legkülső héja hidrogén, hélium és metán keverékéből tevődik össze. Ez a tartomány elektromos szempontból szigetelőnek tekinthető. A bolygó köpenyében az ionos vezetés és a fémes vezetés a  $(0,8-0,2) R_{\text{Uránusz}}$  tartományban következik be. A mágneses tér forrása is valószínűleg ebben a tartományban található. Az Uránusz magja valószínűleg vas és szilíciumoxid keverékéből áll. Mindhárom tartományban áramlásokat tételeznek fel.



18. ábra. Az Uránusz és a Neptunusz belső szerkezetének Stevenson-féle modellje [CONNERNEY 1993]

Fig. 18. The schematic model of Uranus and Neptune by Stevenson [CONNERNEY 1993]

## 10. Neptunusz

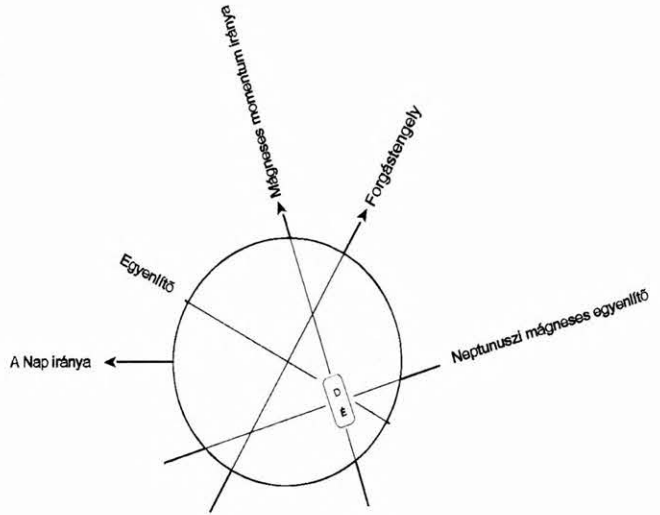
A Neptunusz bolygó egyenlítői sugara 24 747 km, tömege  $1,030 \cdot 10^{26}$  kg, átlagsűrűsége  $1660 \text{ kg/m}^3$ , Naptól mért átlagos távolsága 30 CSE [ZOMBECK 1990].

A *Voyager-2* méréseit és azok értelmezését CONNERNEY et al. [1991], CONNERNEY [1993] és HOLME, BLOXHAM [1996] tanulmányai foglalják össze. A *Voyager-2* űrszonda 4457 km-re közelítette meg a Neptunuszt 1989. augusztus 25-én. Az űrszonda magnetométerei a közelítés és távolodás során közel 24 órán keresztül végeztek méréseket. A bolygóhoz legközelebbi helyzetben 9940 nT értéket regisztráltak. A mérési adatok feldolgozásából meghatározták a mágneses momentum értékét, amely  $1,975 \cdot 10^{24} \text{ Am}^2$  értékűnek adódott. Ez a Föld momentumának kicsit több mint 25-szöröse. A Neptunusz mágneses momentumának iránya 47 fokos szöveget zár be a forgástengelyével, a 72 fokos nyugati hosszúság irányába (19. ábra). A bolygó mágneses momentuma szintén excentrikus helyzetű, a középponttól  $0,55 R_{\text{Neptunusz}}$  távolságban helyezkedik el. A Neptunusz mágneses terében a dipólus és kvadrupólus összetevők 1:1 arányúak [CONNERNEY et al. 1991].

A 20. ábrán a bolygó felszínére kiszámított totális mágneses tere, a tér vertikális és horizontális összetevője, továbbá az inklinációjának eloszlása látható. A mágneses tér eloszlása mutatja a bolygó mágneses terének jelentős aszimmetriáját. A Neptunusz mágneses tere is viszonylag nagy kvadrupólus tér összetevővel rendelkezik. A bolygó mágneses egyenlítője a déli félgömbön a pólus közelében helyezkedik el.

HOLME és BLOXHAM [1996] az Uránusz és Neptunusz mágneses terének jellegzetességeit vizsgálta. Megállapításuk szerint domináns dipólus összetevő nem szükséges a dinamó működéséhez. Energetikailag működőnek találtak

olyan dinamót, amely a kisebb vezetőképességű (a fémes állapotú réteg felett található) tartományra szorítkozik. Ez a dinamó eredményezheti az Uránusz és a Neptunusz esetében a többi bolygótól jelentősen különböző mágneses tereket.



19. ábra. A Neptunusz forgástengelyének és egyenlítőjének elhelyezkedése; excentrikus mágneses momentumának iránya és a neptunuszi mágneses egyenlítő helyzete

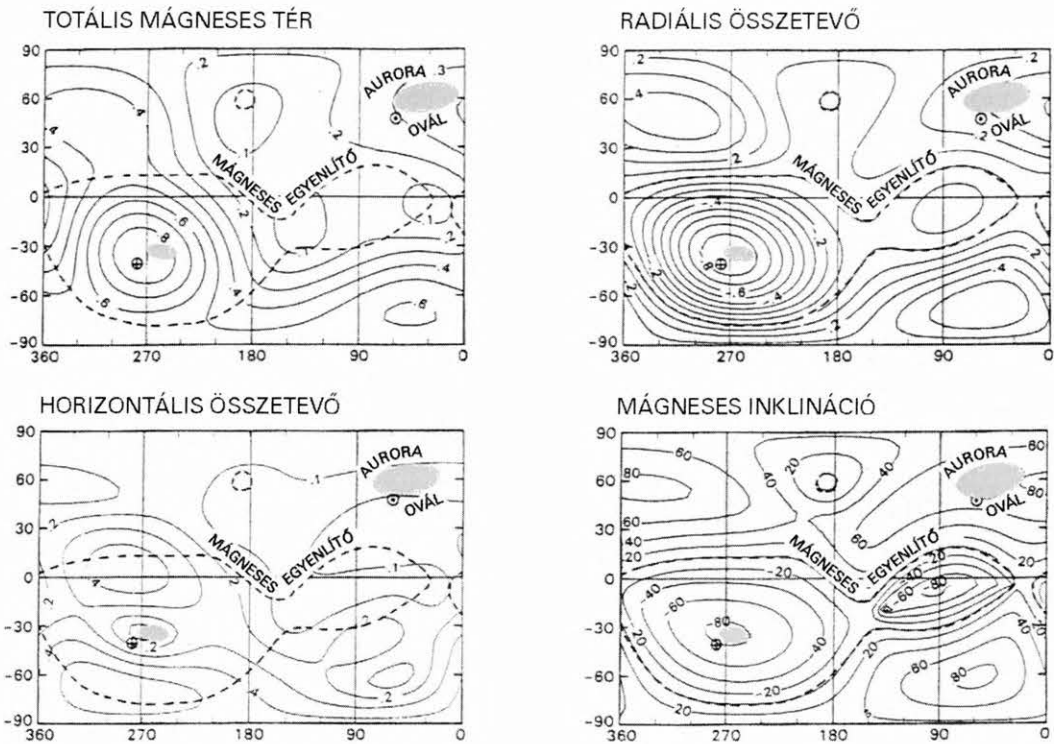
Fig. 19. Axis of rotation and equator of the Neptune; direction of the eccentric magnetic moment of the planet and the Neptunian magnetic equator

A *Voyager* űrszondák pályaelemeiből meghatározhatóvá váltak az Uránusz és a Neptunusz nehézségi erőterét leíró sorfejtés  $J_2$  és  $J_4$  együtthatói [PODOLAK et al. 1990]. Az együtthatók értékéből a bolygók sűrűségeloszlását lehetett levezetni. A két bolygó hasonlóságot mutat, hiszen tömegük, és sugaruk is hasonló, sűrűségük eloszlása a 21. ábrán látható. A bolygók belső szerkezetében három tartományt különböztetnek meg. A legbelső tartomány a bolygók magja, amely valószínűleg  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Fe}$  és  $\text{Ni}$  összetételű. A középső tartomány  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$  és  $\text{CH}_4$  kondenzátumból épülhet fel. A legkülső vékony réteg döntő összetevői a  $\text{H}_2$  és  $\text{He}$ , továbbá jellegzetessége a jelentős  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$  és  $\text{CH}_4$  tartalom. A két bolygó közötti különbséget a belső eredetű hőáram különbözőségében látják.

A bolygó belső szerkezetének Stevenson-féle modellje a 18. ábrán látható [CONNERNEY 1993].

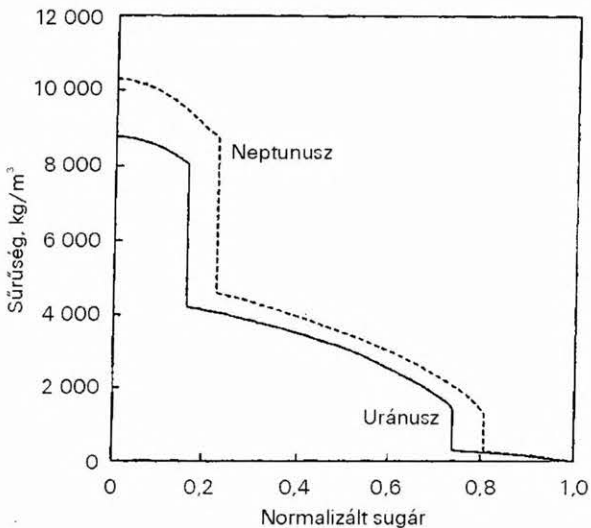
## 11. Plútó

A Plútó a Naprendszer legkevésbé ismert bolygója, mágneses teréről nem rendelkezünk adatokkal. A Plútóra vonatkozó ismeretek bővítése céljából több űrszonda terve született meg. A NASA azonban törölte kutatási programjából a Plútó–Kuiper Express nevű szondát. Az újabb tervek szerint a *POSSE* (Pluto Outer Solar System Explorer) és a *New Horizons Shedding Light on Frontier Worlds* programjavaslatok keretében küldenének űrszondát a Plútó és a Kuiper övezet objektumainak tanulmányozására. Amennyiben a tervezett űrszondák közül valamelyik megvalósításra kerül, akkor a 2004-es kedvező indítási időpont után a szonda 2020 körül éri el a Plútót.



20. ábra. A Neptunusz totális mágneses tere, mágneses terének radiális és horizontális összetevője a felszínen; az izovonalak egysége 105 nT; továbbá az inklináció értékei a bolygó felszínén (fok egységben). A vonalkázott terület a lehetséges aurora óvál helyét mutatja [CONNERNEY et al. 1991]

Fig. 20. Contours of the total magnetic field, the radial component, and the horizontal component on the surface of Neptune, isolines are given in 105 nT units; as well the dip angles on the surface of Neptune isolines are given in degrees. The possible auroral oval is indicated by shading [CONNERNEY et al. 1991]



21. ábra. Az Uránusz és a Neptunusz sűrűségének eloszlása a normalizált sugár függvényében [PODOLAK et al. 1990]

Fig. 21. Density as a function of the normalized radius for Uranus and Neptune [PODOLAK et al. 1990]

## 12. Hold

A Hold a Naprendszer legjobban megkutatott égitestje. Egyenlítői sugara 1738 km, tömege  $7,35 \cdot 10^{22}$  kg, átlagsűrűsége  $3340 \text{ kg/m}^3$ , a Földtől mért átlagos távolsága 384 400 km [ZOMBECK 1990].

A Hold kutása térképezésre, kőzetminták különböző célú vizsgálatára, belső szerkezetének megismerésére, mágneses terének mérésére stb. terjedtek ki. A Hold felszínén mért mágneses tér eléri a 100–200 nT-t, mágneses momentumának értéke  $1,3 \cdot 10^{19} \text{ Am}^2$ , a Földének 0,016%-a.

A Hold mágneses szempontból a felszínéről származó kőzetminták (az Apollo-program során a Földre szállított) paleomágneses vizsgálata után vált érdekessé. A Hold mágneses terének vizsgálatát DAILY, DYAL [1979], LIN [1979] és RUSSEL [1993] tanulmányai foglalják össze. Korábban a Holdat mágneses tér nélküli égitestnek tekintették. Az Apollo-11, -12, -14, -15, -16, -17 holdraszállások során gyűjtött kőzetminták adatai azonban  $\sim 10^5$  nT-től  $\sim 5 \cdot 10^3$  nT-ig csökkenő átlagos paleointenzitást mutattak ki a Hold 4 milliárd évtől a 3 milliárd évre terjedő korára, miközben a mágneses dipólusmomentum  $10^{21} \text{ Am}^2$ -ről  $10^{19} \text{ Am}^2$ -re csökkent [MERRILL, McELHINNY 1983].

DAILY, DYAL [1979], MERRILL, McELHINNY [1983] és RUSSEL [1993] összefoglalták azokat a lehetséges folyamatokat, amelyek szóba jöhetnek a holdi kőzetek remanens mágnesezettségének kialakításában:

— A szenes kondritok és a Holdról származó minták mágneses paleointenzitásai hasonlóságot mutattak. Így merült fel az a gondolat, hogy a holdi kőzetek remanens mágnesezettsége a Naprendszer korai állapotában jelenlévő mágneses tér következtében jött létre. Az elgondolásnak az a hátrányos vonása, hogy ez a mágnesező hatás a holdi kéregben közelítőleg azonos irányú remanens mágnesezettséget okozna, ami viszont nincs összhangban a paleomágneses mérések eredményeivel.



- Az 1970-es években olyan elképzelés jelent meg, amely szerint a holdi kőzetek remanens mágnesezettsége a földi mágneses tér hatására alakult ki. Ez a magyarázat a jelenlegi földi mágneses tér intenzitásának 100-szorosát kívánja meg. A földi kőzetek paleomágneses vizsgálata azt mutatta, hogy a tér intenzitásának változása a földtörténet során nem volt nagyobb 50%-nál.
- Lehetséges okként vizsgálták a mágnesezett mag hatását is. Ezek szerint a Hold magja közvetlenül az égítést keletkezésekor jött létre, izotermikus remanens mágnesezettségét a bolygóközi mágneses tér hatására nyerte el. Ennek az elképzelésnek a hátránya, hogy nem tudja megmagyarázni a 105 nT nagyságrendű paleointenzitást.
- A szakirodalomban széleskörűen elfogadott elképzelés szerint a Hold magjában 3–4 milliárd évvel ezelőtti múltjában aktív dinamó működött. A dinamó működése azonban mintegy 3 milliárd évvel ezelőtt leállt. Meg kell jegyezni, hogy a Hold magjára vonatkozó ismeretek nem véglegesek. Az Apollo-program során szeizmográfokat is elhelyeztek a Hold felszínén. A szeizmológiai mérések kimutattak holdrengéseket is [TOKSÓZ et al. 1974]. A szeizmológiai mérések nem voltak elégségesek a Hold magjának, illetve szerkezetének pontos feltárására. A mérések alapján vagy egy vasból álló 470 km sugarú, vagy egy 720 km sugarú vasszulfidból álló mag létezése fogadható el.

A tanulmányok összefoglalnak lokális hatásokat is, amelyek szintén okozhatnak remanens mágnesezettséget: lokális Fe–FeS dinamó, termoelektromos dinamó, becsapódás következtében létrejövő termoremanens mágnesezettség.

### Köszönetnyilvánítás

A tanulmányba foglalt vizsgálatok a T 025799 számú OTKA kutatási szerződés keretében készültek.

### HIVATKOZÁSOK

- ACUÑA M. H., NESS N. F. 1976: The Main Magnetic Field of Jupiter. *Journal of Geophysical Research* **81**, 2917–2922
- ACUÑA M. H., NESS N. F. 1980: The Magnetic Field of Saturn: Pioneer 11 Observations. *Science* **207**, 444–446
- ACUÑA M. H., CONNERNEY J. E. P., NESS N. F. 1983: The Z3 Zonal Harmonic Model of Saturn's Magnetic Field: Analysis and Implications. *Journal of Geophysical Research* **88**, A11, 8771–8778
- ACUÑA M. H., CONNERNEY J. E. P., WASILEWSKI P., LIN R. P., ANDERSON K. A., CARLSON C. W., MCFADDEN J., CURTIS D. W., RÉME H., CROS A., MÉDALE J. L., SAUVAUD J. A., D'USTON C., BAUER S. J., CLOUTIER P., MAYHEW M., NESS N. F. 1992: Mars Observer Magnetic Field Investigations. *Journal of Geophysical Research* **97**, E5, 7799–7814
- ACUÑA M. H., CONNERNEY J. E. P., NESS N. F., LIN R. P., MITCHELL D., CARLSON C. W., MCFADDEN J., ANDERSON K. A., RÉME H., MAZELLE C., VIGNES D., WASILEWSKI P., CLUTIER P. 1999: Global Distribution of Crustal Magnetization Discovered by the Mars Global Surveyor MAG/ER Experiment. *Science* **284**, 790–793
- ACUÑA M. H., CONNERNEY J. E. P., WASILEWSKI P., LIN R. P., MITCHELL D., ANDERSON K. A., CARLSON C. W., MCFADDEN J., RÉME H., MAZELLE C., VIGNES D., BAUER S. J., CLOUTIER P., NESS N. F. 2001: Magnetic Field of Mars: Summary of Results from the Aerobraking and Mapping Orbits. *Journal of Geophysical Research* **106**, E10, 23403–23417
- BUSSE F. 1978: Magnetohydrodynamics of the Earth's Dynamo. *Annu. Rev. Fluid. Mech.* **10**, 435–462
- CHAPMAN S., BARTELS J. 1951: *Geomagnetism*. Oxford Clarendon Press
- CONNERNEY J. E. P. 1981: The Magnetic Field of Jupiter: A Generalized Inverse Approach. *Journal of Geophysical Research* **86**, A9, 7679–7693
- CONNERNEY J. E. P. 1993: Magnetic Fields of the Outer Planets. *Journal of Geophysical Research* **98**, E10, 18659–18679
- CONNERNEY J. E. P., ACUÑA M. H., NESS N. F. 1982: Voyager-1 Assessment of Jupiter's Planetary Magnetic Field. *Journal of Geophysical Research* **86**, A5, 3623–3627
- CONNERNEY J. E. P., ACUÑA M. H., NESS N. F. 1987: The Magnetic Field of Uranus. *Journal of Geophysical Research* **92**, A13, 15329–15336
- CONNERNEY J. E. P., ACUÑA M. H., NESS N. F. 1991: The Magnetic Field of Neptune. *Journal of Geophysical Research* **96**, 19023–19042
- CONNERNEY J. E. P., ACUÑA M. H., WASILEWSKI P. J., NESS N. F., RÉME H., MAZELLE C., VIGNES D., LIN R. P., MITCHELL D. L., CLOUTIER P. A. 1999: Magnetic Lineations in the Ancient Crust of Mars. *Science* **284**, 794–798
- CONNERNEY J. E. P., ACUÑA M. H., WASILEWSKI P. J., KLETETSCHKA G., NESS N. F., RÉME H., LIN R. P., MITCHELL D. L. 2001: The Global Magnetic Field of Mars and Implications for Crustal Evolution. *Geophysical Research Letters* **28**, 4015–4018
- CURTIS S. A., NESS N. F. 1986: Magnetostrophic Balance in Planetary Dynamos: Predictions for Neptune's Magnetosphere. *Journal of Geophysical Research* **91**, A10, 11003–11008
- CURTIS S. A., NESS N. F. 1988: Remanent Magnetism at Mars. *Geophysical Research Letters* **15**, 737–739
- DAILY W. D., DYAL P. 1979: Theories for the Origin of Lunar Magnetism. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* **20**, 255–270
- DOLGINOV Sh. Sh. 1978a: On the Magnetic Field of Mars: Mars 2 and 3 Evidence. *Geophysical Research Letters* **5**, 89–92
- DOLGINOV Sh. Sh. 1978b: On the Magnetic Field of Mars: Mars 5 Evidence. *Geophysical Research Letters* **5**, 93–95
- DOLGINOV Sh. Sh., YEROSHENKO Y. G., ZHUZGOV L. N. 1976: The Magnetic Field of Mars According to the Data from Mars 3 and Mars 5. *Journal of Geophysical Research* **81**, 3353–3362
- FARKAS M. 1964: Speciális függvények műszaki–fizikai alkalmazásokkal. Műszaki Könyvkiadó, Budapest
- HARGRAVES R. B., KNUDSEN J. M., BERTELSEN P., GOETZ W., GUNNLAUGSSON H. P., HVIID S. F., MADSEN M. B., OLSEN M. 2000: Magnetic Enhancement on the Surface of Mars? *Journal of Geophysical Research* **105**, E1, 1819–1827
- HOLME R., BLOXHAM J. 1996: The Magnetic Fields of Uranus and Neptune. *Journal of Geophysical Research* **101**, E1, 2177–2200
- JOHNSON T. V. 2000: The Galileo Mission to Jupiter and its Moons. *Scientific American* February, 24–33
- LIN P. P. 1979: Constraints on the Origins of Lunar Magnetism from Electron Reflection Measurements of Surface Magnetic Fields. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* **20**, 271–280
- MANDEA M., MACMILLAN S. 2000: International Geomagnetic Reference Field — the eight generation. *Earth Planets Space* **52**, 1119–1124
- MERRILL R. T., MCELHINNY M. W. 1983: *The Earth's Magnetic Field*. Academic Press, Inc. London

- NESS N. F. 1979: The Magnetic Field of Mercury. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* **20**, 209–217
- NESS N. F., BEHANNON K. W., LEPPING R. P., WHANG Y. C. 1975: The Magnetic Field of Mercury 1. *Journal of Geophysical Research* **80**, 2708–2716
- NIMMO F., STEVENSON D. J. 2000: Influence of Early Plate Tectonics on the Thermal Evolution and Magnetic Field of Mars. *Journal of Geophysical Research* **105**, E5, 11969–11979
- PHILLIPS J. L., RUSSEL C. T. 1987: Upper Limit on the Intrinsic Magnetic Field of Venus. *Journal of Geophysical Research* **92**, A3, 2253–2263
- PODOLAK M., REYNOLDS R. T., YOUNG R. 1990: Post Voyager Comparisons of the Interiors of Uranus and Neptune. *Geophysical Research Letters* **17**, 1737–1740
- RUSSEL C. T. 1978: The Magnetic Field of Mars: Mars 5 Evidence Re-examined. *Geophysical Research Letters* **5**, 85–88
- RUSSEL C. T. 1979: The Martian Magnetic Field. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* **20**, 237–246
- RUSSEL C. T. 1993: Magnetic Fields of the Terrestrial Planets. *Journal of Geophysical Research* **98**, E10, 18681–18695
- RUSSEL C. T., ELPHIC R. C., SLAVIN J. A. 1980: Limits on the Possible Intrinsic Magnetic Field of Venus. *Journal of Geophysical Research* **85**, A13, 8319–8332
- RUSSEL C. T., LUHMANN J. C., SPREITER J. R., STAHARA S. S. 1984: The Magnetic Field of Mars: Implications from Gas Dynamic Modeling. *Journal of Geophysical Research* **89**, 2997–3004
- SCHMIDT A. 1934: Der magnetische Mittelpunkt der Erde und seine Bedeutung. *Gerlands Beiträge für Geophysik* **41**, 346–358
- SMOLUCHOWSKI R. 1979: Origin of the Magnetic Field in the Giant Planets. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* **20**, 247–254
- STEVENSON D. J. 1980: Saturn's Luminosity and Magnetism. *Science* **208**, 746–747
- TOKSÖZ M. N., DAINY A. M., SOLOMON S. C., ANDERSON K. R. 1974: Structure of the Moon. *Reviews of Geophysics and Space Physics* **12**, 539–567
- WHANG Y. C. 1977: Magnetospheric Magnetic Field of Mercury. *Journal of Geophysical Research* **82**, 1024–1030
- WHANG Y. C. 1979: Model Magnetosphere of Mercury. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* **20**, 218–230
- ZOMBECK M. V. 1990: *Handbook of Space Astronomy and Astrophysics*. Cambridge University Press, Cambridge, New York, Port Chester, Melbourne, Sydney