

A SEMLEGES FELSŐLÉGKÖRI MODELLEKRŐL:
A FÖLD, A VÉNUSZ ÉS A MARS

Illés E.

MTA Csillagászati Kutató Intézete, Budapest

Bevezetés

A légkörrel rendelkező földszerű bolygók közül a Föld atmoszférája összetétel szempontjából alapvetően különbözik a Vénuszétól és a Marsétól. Elképzelhető, hogy e három bolygólégkör a fejlődés három lehetséges útját, vagy az evolúció három különböző állomását képviseli. Összehasonlító vizsgálatuk ma még éppen csak megkezdődött. Az alábbiakban a legjobban ismert földi légkör termoszférájának főbb tulajdonságait mutatjuk be különös tekintettel a magyar eredményekre, de kitérünk a Vénusz és a Mars felsőlégkörére is.

Az összetétel

Egy bizonyos magasságig /homopauza; a Földnél 95-105, a Vénusznál 130, a Marsnál 120 km környékén van/ a légkör összetétele nagyjából azonos a felszín közelivel. Efelett a sűrűség -- és vele párhuzamosan az ütközések gyakorisága -- olymértékben lecsökken, hogy az összetevők atomjainak száma a többi összetevőtől függetlenül csökken exponenciálisan a magassággal. Feltételezve, hogy a légkör ideális gázként viselkedik, és érvényes a hidrosztatika alapegyenlete

$$\ln \varrho = \text{konstans} - \frac{g}{R} \frac{M}{T} h$$

összefüggés adódik a ϱ sűrűség és a T hőmérséklet között /ahol R a gázállandó, g a gravitációs gyorsulás, h a felszín feletti magasság/.

Miután a $\frac{RT}{gM}$ skálamagasság függ az illető összetevő M tömegétől, ez oda vezet, hogy a homopauza felett rétegezett lesz a légkör /heteroszféra/, mert a nehezebb összetevők atomjainak száma gyorsabban csökken a magassággal, mint a könnyebbeké. A csökkenés sebessége a hőmérséklettől is függ, így egy adott magasságban dinamikai hatásoktól függetlenül is változni fog az összetétel, ha hőmérsékletváltozás lép fel. A hőmérséklettel változik az a magasság is, ahol az egyik összetevő dominálni kezd a másikhoz képest.

A hőmérséklet magasságfüggése

A légkör hőmérsékletét elsősorban a Napból jövő elektromágneses és korpuzkuláris sugárzás által átadott energiamennyiség határozza meg. A fűtés az elnyelődés helyén realizálódik, és innen adódik át a szomszédos rétegeknek. A fűtés fő helyei az elektromágneses sugárzás esetében mindhárom bolygónál a Nap irányában a talaj és a termoszféra, továbbá a Föld esetében az ózonréteg, a Vénusz esetében a felhőréteg és a Mars esetében a légkörbe különösen porviharok idején néha az 50 km magasságig is felemelkedő porréteg. Ezek következtében helyenként növekedővé válik a magassággal az egyébként monoton csökkenő hőmérséklet.

Egy bizonyos magasságon felül a hőmérséklet már állandóvá válik; itt kezdődik az exoszféra, ahol a semleges atomok már alig ütköznek. Itt az exoszferikus hőmérséklet értéke bármely irányban a naptevékenységgel változik.

A korpuzkuláris sugárzás energiája mágneses térrel rendelkező bolygónál leglátványosabban a sarki övezetekben rakódik le geomágneses viharok idején. Az energiaátadás mechanizmusai azonban még messze nincsenek kellőképpen tisztázva. A Föld esetében az in situ mérések mutatták, hogy a hirtelen betáplált nagy mennyiségű energia erős szeleket gerjeszt, amelyek a pólusok környékéről órák alatt juttatják el az energiát az egyenlítőig megzavarva ezzel a nyugodt időszakra jellemző cirkulációs rendszert.

Ha egy hőmérsékletváltozás néhány napnál hosszabb idő alatt zajlik le, akkor van elég idő arra, hogy egyensúlyi állapotokon keresztül történjen ez a változás. Ilyenkor nem torzul a hőmérsékleti profil, vagyis bármely magasságban a hőmérsékletet ismertnek tekinthetjük, ha az exoszferikus hőmérséklet adott. Egy-két napnál gyorsabban lejátszódó változások esetében ez nem igaz, azonban a hőmérsékleti profil ilyen torzulásait még nem ismerjük kellőképpen.

Az exoszferikus hőmérséklet -- s vele bármely adott magasságban a hőmérséklet -- periodikus változásai a fő periódusok különbözősége miatt elég hamar ismertté váltak már az első mesterséges holdak fékeződései alapján. A Föld esetében ezek az effektusok a sűrűségváltozás nagy hányadát megmagyarázzák, előrejelzésük és a mért sűrűség eltérése geomágnesesen nyugodt időszakokban nem na-

gyobb 20%-nál. E változások három csoportba sorolhatók:

- 1./ reális, asztrofizikai változások miatt: a légkört fűtő Nap ki-sugárzása változik -- 11 éves effektus, geomágneses effektus és részben a 27 napos effektus, amennyiben a Nap aktiv területeiről kiinduló sugárzás mennyisége változik;
- 2./ látszólagos, a geometria változása miatt: a Nap helyzete változik az adott irányhoz képest -- napszakos, szezonális változás és a 27 napos effektus, amennyiben a Nap egy tartósan aktívabb területe a Nap rotációjával körbefordulva kb. 27 naponta a földi légkörnek nagyobb mennyiségű energiát juttat;
- 3./ ismeretlen eredetű változás: féléves effektus.

Modellek

A légkör fizikája, kémiája, az energiaátadás módjai és az energialánc nem eléggé ismert még ahhoz, hogy használható analitikus modelleket lehessen készíteni. Ahhoz pedig a probléma túl bonyolult, hogy azt numerikus módszerekkel négy dimenzióban kezelni lehessen. Az elméleti alapokon álló, egyszerűsített modellek jelentősége abban van, hogy a többitől elkülönítve végigkövethető egy-egy folyamat, és így megbecsülhető, hogy a reális légkör esetében ezek milyen sullyal szerepelhetnek.

Az eddig elkészített modellek két csoportba sorolhatók: vagy megpróbálják az időfüggést leírni, és akkor a feladat bonyolultsága miatt le kell mondani néhány helykoordinátáról /rendszerint kettőről/, vagy figyelembe vesznek több helykoordinátát, de akkor az időfüggésről mondanak le. E statikus modellek felteszik, hogy a változások lassúak, a hőmérsékleti profil nem torzul, és a fizikai jelentésétől megfosztott, csak segédparaméternek tekintett exoszferikus hőmérséklet meghatározásán keresztül próbálják tekintetbe venni az időfüggést.

Az exoszferikus hőmérséklet, mint kiinduló paraméter meghatározása

Minden eddigi modell lényegében azonos szerkezetű, amennyiben csak a már említett változások vannak beépítve. Egymástól főképp abban különböznek, hogy az együtthatók meghatározásához felhasznált észlelési anyag különböző, illetve az egyes változásokat különböző közelítő sorok formájában próbálják meg saját számítógépükön könnyebben kezelhető formába átírni. A "klasszikus" Jacchia modellek [CIRA-72; Jacchia, 1977] a mesterséges holdak mintegy

70 ezer fékeződési adatán alapulnak, és a céljuk az összsűrűség változásának minél jobb leírása. Az újabbak in situ sűrűségi és összetételbeli valamint radarhullámok inkohérens szóródásából levezetett hőmérsékleti adatokat is használnak, és az összsűrűség változásán kívül az összetételbeli változás leírását is célul tűzték ki /MSIS, DTM, stb; [Hedin, 1983; Barlier et al.; 1978]/.

A pillanatnyi exoszferikus hőmérséklet kiszámítására e modellek különböző közvetett napfizikai illetve geofizikai paramétereket használnak. Erre azért volt és van még mindig szükség, mert a termoszféra fűtéséért valóban felelős spektrumtartományokban a beérkező energia mérése még mindig nem történik folyamatosan.

A Nap elektromágneses sugárzásának pillanatnyi hatását a légkörre a modellek a 2800 MHz-es frekvencián Ottawaban rendszeresen, naponta mért szoláris rádiósugárzás intenzitásával jellemzik / $S_{10.7}$ vagy $F_{10.7}$ - el jelölik/. Több hónapra vett átlaga a 11 éves periódusu változást hivatott jellemezni, a pillanatnyi értékek az átlagtól vett eltérése pedig a Nap forgása miatti 27 napos változást. Ill francia munkatársaival közösen kimutatta, hogy a 27 napos effektus amplitudója a 11 éves ciklus folyamán nem állandó [Lespés et al., 1971]. Illés pedig azt, hogy a kisenergiájú galaktikus kozmikus kugárzás intenzitása /pl. a Deep Riverben mért beütésszám: C_{DR} / legalább olyan megfelelő, ha nem jobb index lenne a naptevékenység jellemzésére, mint az $S_{10.7}$ [Illés, 1983; Illés-Almár, 1984]. Eddig még egyik eredmény sem épült be a modellekbe.

A korpuszkuláris fűtést a mai modellek az A_p /vagy K_p / planetáris geomágneses index változásaival írják le. Némely modell csak az exoszferikus hőmérsékletet változtatja, mások azonban próbálják figyelembe venni, hogy ez a gyors, alig 1-2 napos karakterisztikus idejű változás a hőmérsékleti profilokat sem hagyja változatlanul. Erre elsőként Almár mutatott rá [Almár et al., 1973], és az eredményt később az in situ mérések megerősítették. Almárnak az ekvivalens tartam értékeit felhasználták a szovjet referencia modell javítására [Kugaenko, 1980]. A geomágneses effektust az MSIS modellbe hosszúságfüggő módon építették be.

A geometria változását a modellekben a Nap irányától mért szögtávolsággal jellemzik. Szimmetriát tételeznek fel, és a hatásnál

állandó késési időt. Az előbbi Ill és francia munkatársainak kutatásai szerint nem teljesül szigoruan [Ill, 1977], az utóbbit pedig nagyon sokan cáfolták, azonban a kutatások még nem tárták fel teljesen a törvényszerűségeket, ezért nehéz a modellekbe beépíteni. Nem szerepel a modellekben az éjszakai másodlagos maximum létrehozó eredmény sem [Ill, 1979].

A féléves effektust a modellek általában az idő függvényében szinuszos és évről évre azonos változásnak tekintik annak ellenére, hogy például Ill a tavaszi maximum "csipkés" szerkezetét már régen kimutatta [Ill, 1970].

Nem tartalmazzak a modellek semmiféle utalást arra sem, hogy az alsó határon a feltételek változóak /Bencze például kimutatta, hogy a homopauza magassága változik [Bencze, 1983] /, vagy, hogy az alsólégkörből is terjedhetnek felfelé hatások. Például a hőmérsékleti profil hullámszerű alakját radarmérések jelezték már, és a Vénusz és Mars légkörébe leereszkedő szondák mérései is felhívták a figyelmet hasonló jelenségekre. Ill a CACTUS akcelerométeres adatok alapján ilyen hullámok mozgását is kimutatta hol felfelé, hol lefelé a felsőlégkörben [Ill, 1978]. Azonban modellezésükhöz még nem eléggé ismert a jelenség törvényszerűsége.

A napszélből a felsőlégkörbe jutó energiák közül a modellekbe csak azok vannak beépítve, amelyek flertevékenység következtében létrejövő lökéshullámmal kapcsolatosak /az A_p geomágneses index csupán ezeket jelzi/. Pedig a napszélnek három komponense van, és ezek közül ez csupán az egyik. A "nyugalmi" napszéllel vagy más szóval a "korongkomponenssel" kapcsolatban egyedül Jacchiának volt próbálkozása, aki szétválasztotta a korongkomponenst és az aktív vidék komponenst. A harmadik komponens, vagyis a lökéshullámot létre nem hozó, de azért nagyobb sebességű napszélnyaláb hatását /ezek az A_p paraméter alapján nem mindig vehető észre/ tudomásom szerint még nem vizsgálták sem elméletileg, sem az empirikus modellek megalkotásánál. Megfigyelési evidenciákat Ill és adott arra [Illés-Almár, 1978], hogy a Napról, a koronalyukakból kiinduló, korotáló áramok is képviselhetnek energiaforrást a semleges légkör számára.

A Föld esetében az sem volt még vizsgálat tárgya, hogy a Nap földrajzi szélességének, és ezzel a maximálisan fűtött hely szélességének szezonális változását milyen késéssel követi a hő-

mérséklet. Pedig más égitesteknél vannak arra utaló megfigyelések, hogy egy légkörnek ebben a vonatkozásban is lehet tehetetlensége. Nem kizárt például, hogy az ekvinokciumkor talált aszimmetria a szélmezőben nemcsak az É-D aszimmetria miatt jelentkezik, hanem e késés miatt is. Ez is komplexebb kutatást igényel.

Ugyancsak nem adnak még számot a modellek arról sem, hogy a 11 éves effektus a 22 éves ciklus két felében ugyanugy játszódik-e le, vagy ott is különböző együtthatókra van szükség.

A Vénusz és a Mars felsőlégkörének modelljei

Láttuk, hogy tudásunk mennyire bizonytalan a földi légkört illetően is, ahol csaknem 30 éve sok mesterséges hold jóformán folyamatosan mér. Nyilvánvaló, hogy a Vénusz és a Mars felsőlégkörét illetően még bizonytalanabbak lehetünk, hiszen itt a mérések csupán sporadikusaknak tekinthetők mind időben, mind térben.

A hőmérsékletváltozások közül egyedül a napszakos effektust sikerült mindkét bolygón kimutatni, bár mindegyik effektus fellépése várható lenne. Érdekes, hogy a Vénusz esetében, ahol a 11 éves ciklus hosszával lassan összemérhető az az időintervallum, amióta megfigyelések állnak rendelkezésre, a nappali oldal exoszferikus hőmérsékletében nem találtak lényeges változást. Ugy tűnik, hogy nagyon kicsi a 11 éves effektus amplitudója. A nagyobb energiabetáplálásra ugyan nagyobb fűtés jön létre, de mint ha nagyobb lenne a hűtés is; a Vénusz légköre -- mintegy -- termosztátként viselkedik. De az még nem ismeretes, hogy mi játsza a termosztát szerepét.

A Mars esetében az exoszferikus hőmérsékletben talált 320 foknyi ingadozások semmiféle eddig ismert törvényszerűséggel nem voltak magyarázhatóak a földi légkörrel kapcsolatban szerzett tapasztalatokkal.

A mérések alapján mindkét bolygó esetében legalább az extrémumokat előrejelző modellt, egy minimális illetve egy maximális /"hideg" illetve "meleg"/ modellt konstruáltak.

A Vénusz és a Mars felsőlégköre lényegesen hidegebb a földinél /1000-1500 K-el szemben csak 300 K körül van a hőmérséklet/. Ennek oka elsősorban a kémiai összetételbeli különbség. A földi termoszférában az extrém ultraibolya sugárzás hatására az O_2 disszociál atomi oxigénre, és ennek a reakciónak a hatáskereszt-

metszete sokkal nagyobb, mint a CO_2 disszociációé, amely a Vénusz és a Mars felsőlégkörének fűtéséért felelős.

Szelek

Mesterséges holdak pályahajlásának változását több hónapon keresztül figyelve meghatározható a hold földközeli pontja környéki szél zonális komponensének a megfigyelési időszakra vonatkozó átlagos értéke. Ez a King Hele és csoportja által kifejlesztett és a mesterséges holdak repülési magasságában -- tehát 180 és 1000 km között -- használható módszer az egyetlen, amely olcsó, és a zonális szél közepes sebességét szolgáltatja. A többi módszer drága műszerezettséget kíván, és mindhárom koordinátában lokális és pillanatnyi eredményt ad; nehéz belőlük globális képet kapni.

A King Hele csoport eredménye szerint a földi légkör 300 km magasság körül 1,4-szeres korotációs sebességgel mozog Ny-K-i irányban. Ezen magasság felett és alatt csökken a zonális szél sebessége. A Vénusz és a Mars esetében ilyen magasságokban végrehajtott szélmérésekről nincs tudomásom. A Marsnál 30 km alatt, a Vénusznál 60 km alatt mértek a szondák szélprofilokat. A Marsnál 30 km környékén, a Vénusznál 60-70 km-en mértek 100 m/s sebességű zonális szeleket. Ilyen vagy egy kissé nagyobb magasságokban a Földön is vannak ilyen erős zonális szelek, azonban azáltal, hogy a Föld légköre több cirkulációs cellára szakadt, csak kis szélességtartományokban érvényesek /a szomszédos cellák sebessége kisebb vagy éppen ellentétes irányú/, és nem egy teljes hemiszférára, mint a Vénusz esetében. Ott ugyanis egyetlen cirkulációs cella egy egész hemiszféra. Ezek a közepes szélességeken lévő jet-ek a Föld gyorsabb rotációja következtében csak 1.2-szeres korotációs sebességnek felel meg /hasonló nagyságrendűek a Marsnál is/, ellentétben a Vénusszal, ahol a bolygótest lassu rotációja miatt ugyanakkora lineáris sebesség 60-szoros korotációs sebességnek, tehát óriási szuperrotációnak felel meg.

A VEGA szondák 1985-ben a Vénusz légkörébe ballonokat bocsátottak a szuperrotáció szempontjából érdekes magasságok vizsgálatára. A ballonok az 50 km magasság környékén sodródtak az éjszakai oldaltól a nappaliig mintegy 10000 km távolságra. A horizontális sebesség 60-70 m/s körüli volt, jó egyezésben azzal a hipotézissel, hogy a felhőalakzatok mozgásai a Vénusz légkörében

az anyagáramlást vagyis a szuperrotációt mutatták. Ami váratlan volt, az ennek a szélnek a függőleges komponense; ugyanis a ballonokat 100-200 m-t dobálta a szél fel-le kb 1 m/s-os sebességgel.

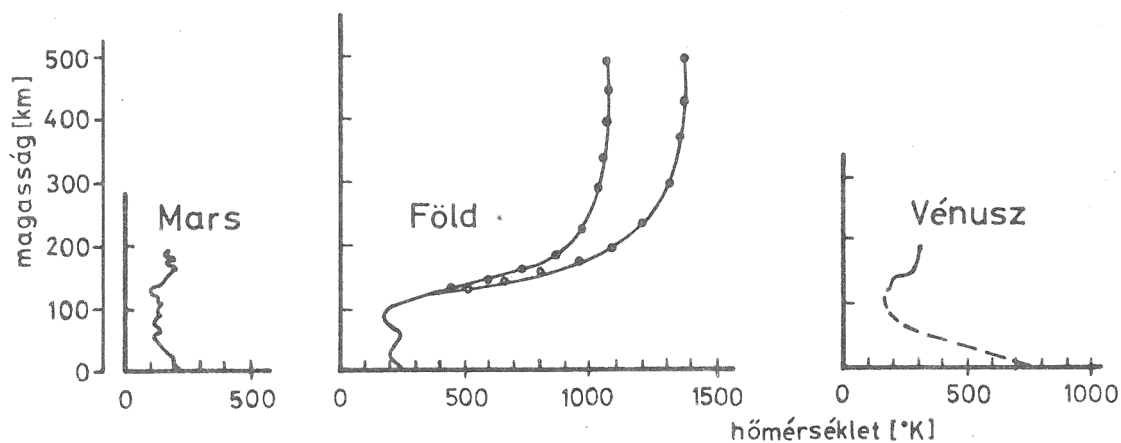
Az a tény, hogy hasonlóságok és különbségek egyaránt megtalálhatók a földszerű bolygók egymástól eltérő összetételű légkörében, a kérdés tanulmányozását még fontosabbá teszi.

Irodalom

- Almár-~~let~~ al., 1973, in: Space Research XIII, pp. 363-368.
- Barlier, F. et al., 1978, Ann. Geophys. 34, pp. 9-24.
- Bencze, P., 1983, Nabl. ISZ 20, pp. 115-128.
- Byford, S., 1986, Spaceflight 28, p. 61.
- CIRA-72, 1972, Akademie Verlag, Berlin.
- Hedin, A.E., 1983, JGR 88, pp. 10170-10188.
- Hollenbach, D. et al., 1985, Icarus 64, pp. 205-220.
- Hunten, D.M. et al. ed-s, 1983, Venus, The University of Arizona Press, Tucson, Arizona.
- Ill, M. et al., 1970, in: Space Research X, pp. 485-492.
- Ill, M., 1977, in: 3rd Int Symp: Geodesy and Physics of the Earth, Adw d DDR, pp. 695-717.
- Ill, M., 1978, in: Space Research XIX, pp. 235-238.
- Illés, E., 1983, Nabl. ISZ 20, pp. 19-28.
- Illés-~~Almár~~, E., 1978, in: Space Research XIX, pp. 207-210.
- Illés-~~Almár~~, E., 1982, Nabl. ISZ 21, pp. 308-312.
- Illés-~~Almár~~, E. et al., 1984, Nabl. ISZ 23, pp. 333-337.
- Jacchia, L.G., 1977, SAO Spec. Rep. No 375.
- Kliore, A. ed., 1978, The Mars Reference Atmosphere, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California.
- Kugaenko, B.V., 1980, Nabl. ISZ 17, pp. 113-132.
- Lespés, J.P. et al., 1971, in: Space Research XI, pp. 959-963.
- Marov, M.Ya. et al., 1974, On the Reference Model of the Venus Atmosphere, Moscow.
- Marov, M.Ya., 1978, Ann. Rev. Astron. Astrophys. 16, pp. 141-169.
- Marov, M.Ya., 1979, Astron. Vest. XIII, No 1, pp. 3-23.

A főbb változások amplitudója a Föld felsőlégrében

az effektus megnevezése	paramétere	600 km-nél hányszoros sűrűség növekedés	az exo-szferikus hőmérséklet növekedése
11 éves	$\overline{S_{10.7}}$	20-70	200-300 K
féléves	az év hányadik napja	3	
27 napos	$S_{10.7} - \overline{S_{10.7}}$	4	150-200 K
napszakos	Naptól mért szögtávolság	6	300-400 K
geomágneses	A_p	8-100	500-800 K



Hőmérsékleti profilok a magasság függvényében /a Mars esetében egyszeri mérés, a Föld és a Vénusz esetében modellgörbe; a Földnél a pontok az éjszakai, a körök a nappali profilt jelzik/