

A FÖLD-TÍPUSÚ BOLYGÓK LÉGKÖRE

Illés Erzsébet: A Föld-típusú bolygók légköre

Csillagászati Évkönyv 1978, 150-172. old.

Online: Oktatási segédanyagként.

ELTE TTK Planetológiai Kör – <http://planetologia.elte.hu>

Digitalizálás: MTA Konkoly-Thege Miklós

Csillagászati Kutatóintézet



A kutatók a természettudomány fotolaboratóriumában évszázadok óta igyekeznek előhívni egy képet a körülöttünk levő világról, azonban ez a kép gyengén megvilágítottnak bizonyul. A különböző rész tudományoknak már sikerült több részletét láthatóvá „lehelni”, de a teljes kép csak ezekben az években válik láthatóvá, ritka esztétikai élvezetet okozva azoknak a szerencsés kutatóknak, akik éppen most nézhetik a gyenge fényben kibontakozó csodálatos panorámaképet.

Ennek a Földet mint egészet, a Naprendszert mint egészet és az Univerzumot mint egészet láttató panorámaképnek a Föld-típusú bolygók légkörét bemutató részét szeretnénk most ismertetni előre bocsátva, hogy a teljes kép nem mindenütt „hívódott” még elő. Lehet, hogy bizonyos részletek a „teljes előhívódás” után másnak mutatkoznak, mint amilyeneknek most sejtjük, nem csak az értelmezést, hanem a pontosság növekedésével a méréseket illetően is, de reméljük, hogy e bizonytalanságért kárpótlást nyújt az az izgalom, amivel a vérbeli fotós az előhíváskor kibontakozó képet várja.

A bolygólégkörök kialakulása és fejlődése

Elég egyértelműen elfogadott napjainkban az az elmélet, amely szerint az Univerzumban az ősrobbanást követő időkben a robbanás utáni, egyenletes sűrűségű és homogén anyageloszlású felhők összehúzódásából álltak elő az általunk most megfigyelhető égitestek. Héliummal, oxigénnel, szénnel, nitrogénnel és kevés fémmel szennyezett hidrogénfelhőből kezdett formálódni a Naprendszer körülbelül 6 milliárd évvel ezelőtt. A gravitációs összehúzódás közben kinnmaradt és legnagyobb perdületet hordozó anyagrétegekből formálódtak a bolygók: eredeti atomi összetételük megegyezett a Napéval. Az óriás bolygók (a Jupiter, a Szaturnusz, az Uránusz és a Neptunusz) ma is főleg hidrogénből és héliumból állnak. A többi bolygónál azonban nem maradt meg ez az eredeti atomi összetétel.

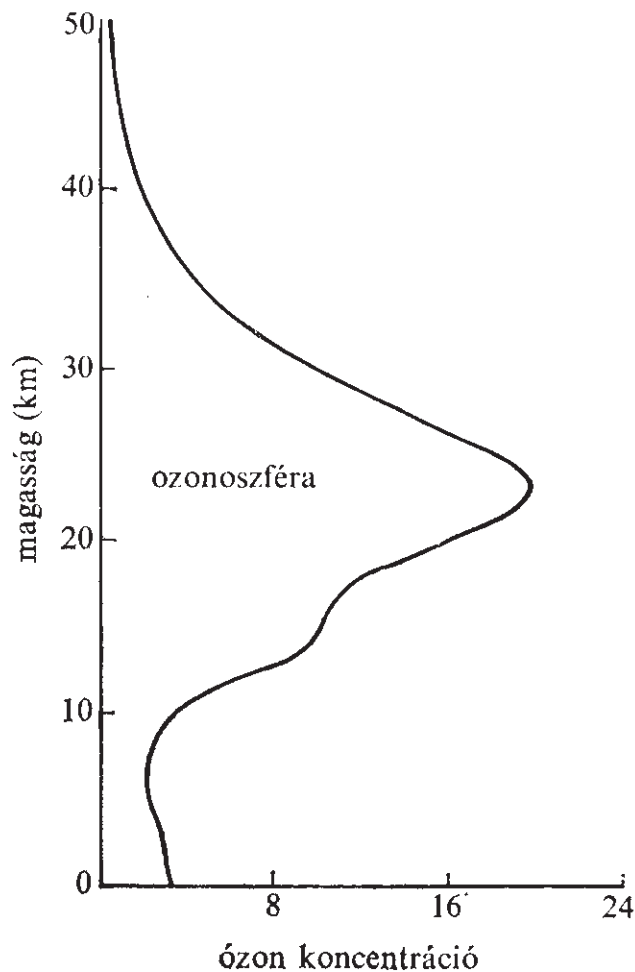
A belső bolygók a Nap közelsége miatt a rendkívül könnyű hidrogénből

csak keveset tudtak magukhoz szippantani, inkább a galaktikus porszemek, *kondritok*, *meteoritok* és egyéb törmelékek szolgáltak a belső bolygók anyagául. A mégis megszerzett hidrogén és hélium a Nap sugárzásának elnyelődése következtében szerzett energia eredményeként kiszabadult a bolygó nehézségi erőteréből. A Nap melegen kívül a bolygók belsejében a radioaktív bomlás következtében keletkező hő is hozzájárult ahhoz, hogy a szilárd részecskékből összeálló bolygó anyaga megolvadjon. A felszabadult illó vegyületek létrehozták a Föld-típusú bolygók primordiális légkörét, a nem illó fémek és vegyületeik — nyilván molekulasúlyuk szerint rétegeződve — a bolygók testét, amely a későbbi lehűlés következtében fokozatosan szilárd kérgűvé vált. A bolygók légköruk megtartásáért állandó harcot vívnak a Nappal; egy bolygó légköre e harc pillanatnyi állapotát tükrözi — mit sikerült visszatartani a múltból, és mi adódik hozzá abban a pillanatban a szilárd kéreg állandó, további gázvesztése révén. Ily módon minden bolygó légköre fejlődés eredménye, állandóan változó és megváltoztatható, nem eleve adott és statikus, mint eddig hittük.

A Merkurnál a Nap közelsége olyan magas hőmérsékletet hozott, és hoz létre, hogy a kis tömegű bolygó nyilván sokkal nagyobb mértékben elvesztette illó anyagát, gázvesztése sokkal nagyobb fokú, mint a többi bolygóé. A felszabaduló illó vegyületek legnagyobb része azonnal megszökik: a Merkurnak gyakorlatilag nincs légköre.

A nagyobb tömegű Vénusz a könnyű hélium és hidrogén kivételével vissza tudta tartani az illékony elemeket, légköre vastag, csaknem tiszta széndioxid tartalmú légkör. A közeli Nap sugárzása és a CO_2 légkör üvegházhatása miatt igen magas felszíni hőmérséklet és nyomás alakult ki.

Az ős-Föld légköre is nyilván nagy CO_2 tartalmú légkör volt. A szerencsés naptávolság miatt azonban a hőmérsékleti határok tartósan lehetővé tették a folyékony víz jelenlétét, és ezzel az élet kialakulását. A növényi élet egyik melléktermékeként felszabaduló oxigén fokozatosan olyan mértékben „beszennyezte” a légkört, hogy ózon-pajzs jöhetett létre, amely azóta is állandóan és folyamatosan újratermelődik (13. ábra). Ez az ózon-pajzs a továbbiakban a többi bolygótól lényegesen eltérő fejlődési irányt szabott a földi légkörnek. A vízgőz legnagyobb része ugyanis csak bizonyos magasságig jut fel a légkörbe, a magassággal csökkenő hőmérséklet miatt hamarosan kifagy és visszahull a Föld felszínére. Az oxigén, miközben O_3 -má alakul, elnyeli a Nap kemény ultraibolya sugarait, megakadályozva ezzel, hogy azok lejussanak a felszín közelébe, ahol a vízgőz túlnyomó része található. Ezért a légkörbe került H_2O legnagyobb része nem szenved fotodisszociációt, a szabaddá vált hidrogén a gravitációs szeparáció következtében nem kerül a felsőlégkörbe, és nem szökik meg. A Föld tehát H_2O formájában nagy mennyiségű hidrogént tud megtartani. Az ózon réteg tehát kétszeresen védi az életet: egyrészt a halálos ultraibolya sugarakat nem engedi lejutni, másrészt az élet számára elengedhetetlenül fontos vizet megtartja.



13. ábra. A földi atmoszférában az ózon koncentrációja a magasság függvényében.

A növényi élet másik mellékterméke az, hogy a CO_2 mészkő formájában kőzetekbe kötődött. Ezzel fokozatosan csökkent a kezdetben nyilván a Földnél is lényeges szerepet játszó, még ma is meglévő üvegházhatás. Az élet ily módon fokozatosan teljesen átalakította a Föld légkörét: széndioxidját eltüntette, ezzel felszíni hőmérsékletét fokozatosan csökkentette, és oxigénnel bedúsította.

A Mars messzebbre került a Naptól, ott nem játszódhatott le ugyanaz, ami a Földön. A felszíni hőmérséklet legtöbbször a fagypont alatt van, a víz vagy a talajba fagyva található, vagy ami felolvad, illetve szublimál, azt az ultraibolya sugárzás folyamatosan disszociálja: a H_2 nagyrésze megszökik, az O szennyezésként visszamarad a csaknem tiszta széndioxid tartalmú légkörben.

A Föld-típusú bolygók légkörének szerkezete és hőháztartása

Egy bolygó körül kialakuló légkör tömege elenyésző része a bolygó tömegének (a Föld esetében 0,010%). Szerkezetét a bolygó gravitációs és mágneses erőtere, a környező perturbáló tömegek gravitációs és mágneses erőtere, valamint a légkört alkotó részecskék fajtája és hőmérséklete határozza meg.

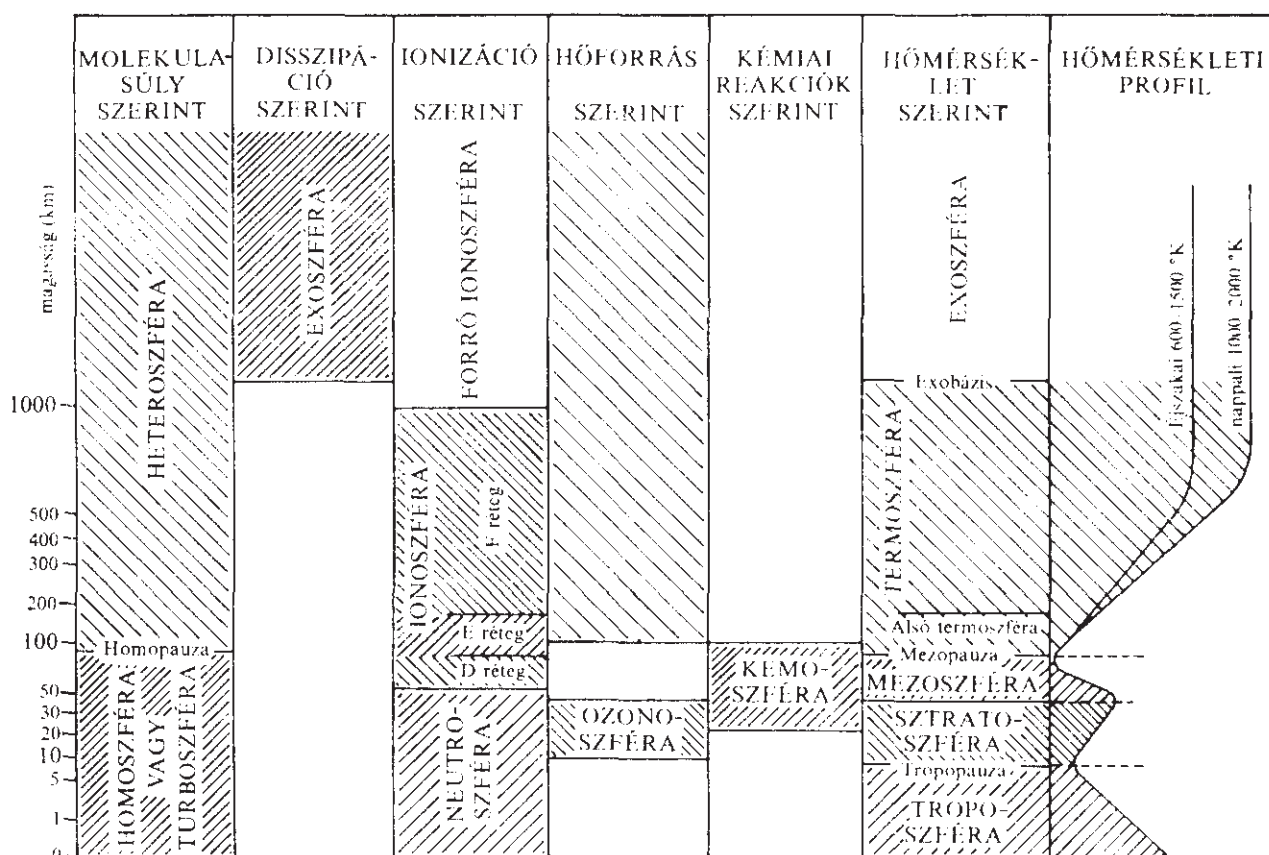
A részecskék eloszlása és mozgása

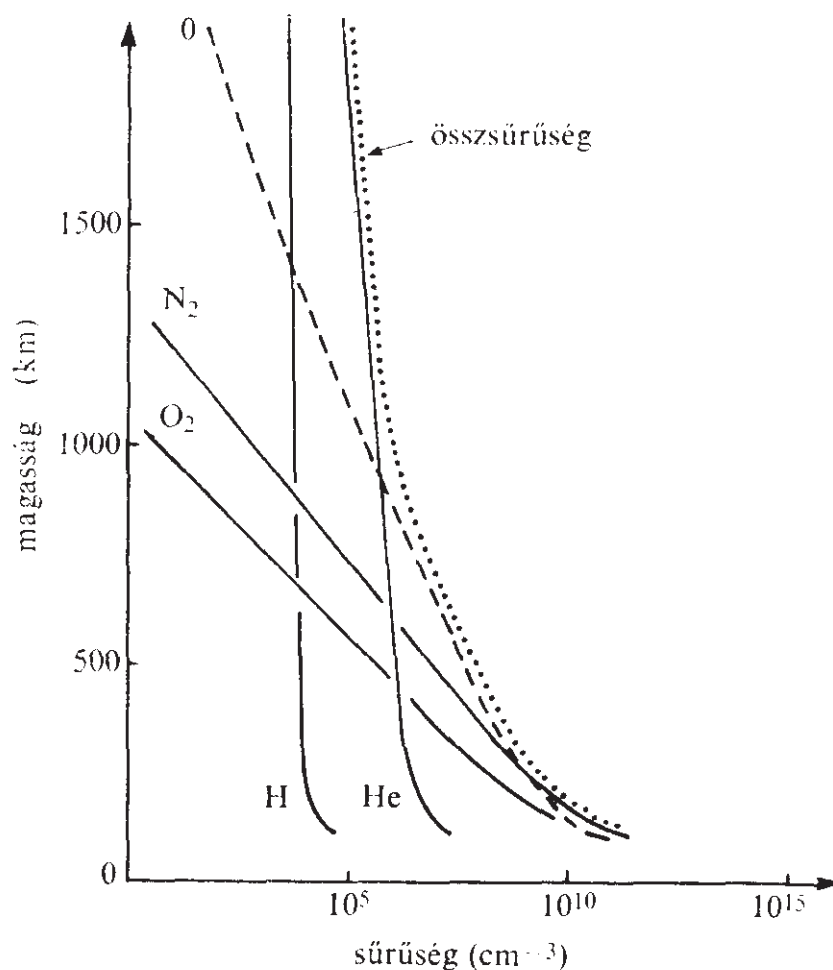
A bolygó gravitációs erőtere első közelítésben centrálisnak tekinthető. Ilyen erőterben a légkör részecskéinek eloszlását a magassággal a jól ismert *barometrikus magasságformula* adja meg, amely szerint, ha ρ_0 a sűrűség egy h_0 magasságban, akkor Δh -val feljebb a ρ sűrűség,

$$\rho = \rho_0 e^{-\frac{(h_0 + \Delta h)}{H}},$$

ahol H a skálamagasság, és azt a függőleges távolságot jelenti, amelyen a sűrűség e -ed részére csökken.

Amíg a sűrűség elég nagy, a részecskék gyakran ütköznek; a többféle összetevőt tartalmazó légkör jól keveredik, homogén, H a magasságtól független. A légkörnek ezt a rétegét *turboszféranak*, vagy *homoszféranak* nevezik.





14. ábra. A földi atmoszféra különböző összetevőinek koncentrációja a magasság függvényében.

Amikor a sűrűség annyira lecsökken, hogy a részecskék ütközése olyan ritka lesz, hogy szabad úthosszuk meghaladja a H -t, a gravitációs tér hatása alatt hosszú ballisztikus pályákon mozognak. Ezt a réteget a légkörnek *heteroszférának* nevezzük. Az átmeneti réteg neve *homopauza*. Ha a részecskék sebessége eléri a bolygó szökési sebességét, akkor elhagyják a légkört, és az interplanetáris tér anyagát gazdagítják. Ha sebességük nem elég a megszökéshez, visszaesnek az atmoszféra mélyebb rétegei felé mindaddig, míg egy újabb ütközés meg nem változtatja pályájukat.

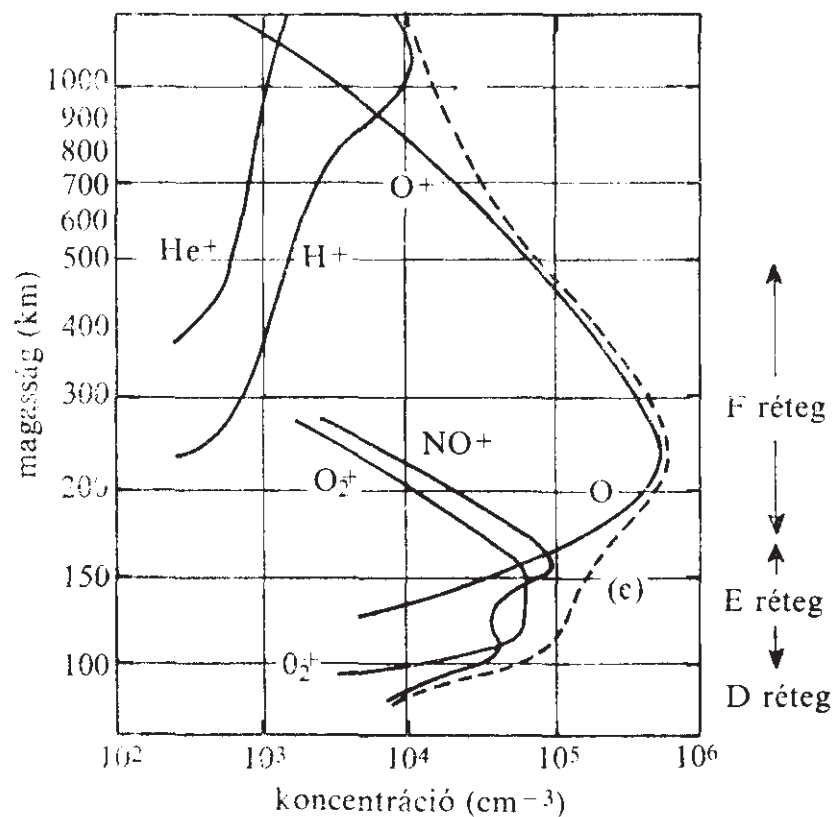
A heteroszférában **tehát** már a keveredés nem hat, a gravitációs tér a légkör összetevőit molekulasúlyuk szerint rendezi (innen az elnevezés is): a nehezebb molekulasúlyú elemek sűrűsége gyorsabban csökken a magassággal (14. ábra),

ugyanis $H = \frac{kT}{mg}$ (k a Boltzmann állandó, T a hőmérséklet, m a molekulasúly,

g a helyi gravitációs gyorsulás). Ilyen módon bizonyos magasságon olyan összetevők is dominálóvá válhatnak, amelyek a bolygó felszínén elhanyagolható mennyiségben találhatók, vagy teljesen hiányoznak, mint például a

hélium és a hidrogén. Gondoljuk meg, hogy például a nitrogén molekula durván kétszer akkora tömegű, mint az oxigén atom. Ezért N_2 fele akkora távolságon csökken ugyanannyi részére, mint az O . Tehát ha az N_2 70 km-en 10-ed részére csökken, akkor az atomi oxigén 140 km-en csökken 10-ed részére. De az N_2 140 km-en már csak 100-ad résznyi. Így az atomi oxigén hamar dominálóvá válik az N_2 -höz képest. Hasonló módon válik dominálóvá a hélium, majd a hidrogén. Ez utóbbi alkotja a Föld-típusú bolygók légkörének legkülső rétegét, az úgynevezett *hidrogén koronát*.

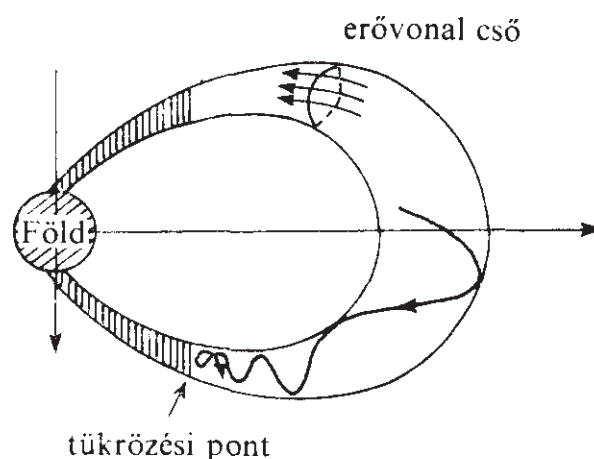
Amennyiben a bolygónak van mágneses tere is, akkor a légkör ionizált részecskéi nem ballisztikus pályán mozognak, hanem a mágneses tér által engedélyezett pályán: az erővonalakat nem metszhetik, sebességük és a mágneses tér erőssége által meghatározott spirális pályán körözhetnek a mágneses erővonal körül mindaddig, amíg erről a pályáról egy másik részecskével való ütközés ki nem löki őket. A homoszférában és a heteroszféra alsó részén még elég gyakran jön létre ütközés, ezért az ott keletkezett ionok és elektronok nem túl hosszú utakat futnak be keletkezésük helyétől. Ez az ún. *ionoszféra* addig marad fenn, amíg az ionizáló mechanizmus működik, és makroszkopikusan semleges, hiszen ugyanannyi ion és elektron keletkezik. Attól függően, hogy a légkör melyik összetevőjének ionjai hozzák létre, több különböző ionoszféra réteg létezhet, mint például a Föld esetében a *D*, *E*, *F*, rétegek (15. ábra).



15. ábra. A földi atmoszféra lényegesebb ionjainak koncentrációja a magasság függvényében. A szaggatott vonal az elektronsűrűség, amely azonos az össz-ionsűrűséggel.

A heteroszféra legfelső részén, ahol már nagyon ritkán ütköznek a részecskék, a mágneses tér az ionokat és elektronokat tartósan, a Föld esetében néhány napig is, fogva tarthatja létrehozva a *sugárzási övezeteket*. Az ilyen részecskemozgást dipól térben a 16. ábra szemlélteti, ahol a részecskék egy mágneses erővonal-csőben a két félgömb között cikáznak.

A környező égitestek, amennyiben a bolygóhoz képesti relatív helyzet változik, árapályhullámokat váltanak ki a bolygó légkörében is. A tovaftató árapályhullámot olyan szélként érzékeli a bolygón levő megfigyelő, melynek energiája lassan disszipálódva a légkör fűtéséhez járul hozzá.



16. ábra. Töltött részecskék mozgása a földi mágneses tér hatására.

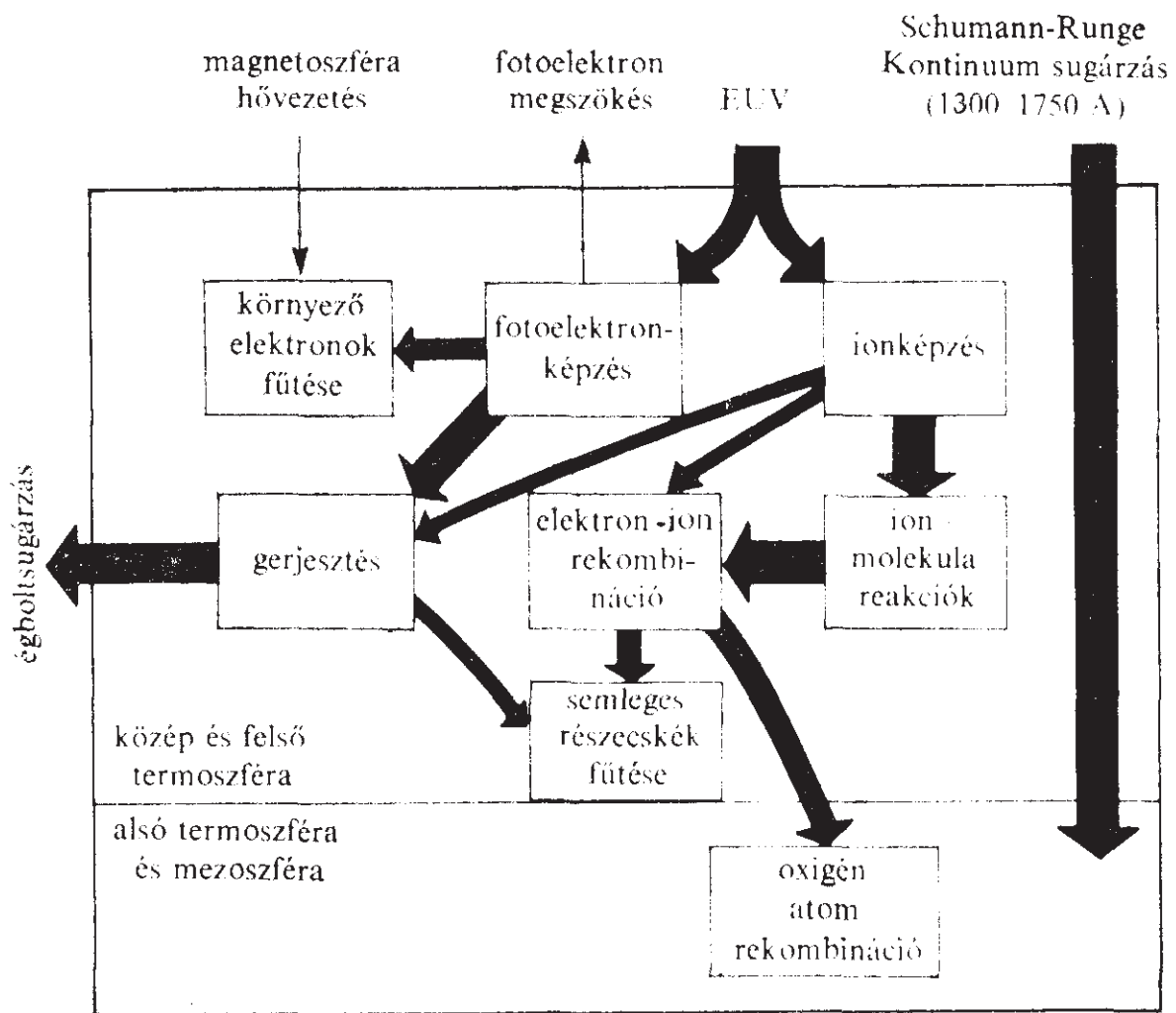
A légkör hőháztartása

A bolygók atmoszférájában a részecskék a hőmozgáshoz szükséges energiát legfőképp a Nap sugárzásából nyerik. A Nap elektromágneses és korpuszkuláris sugárzása által szállított energia a légkörbe különböző módon és különböző mélységeig jut be. A beérkező elektromágneses sugárzás egy része visszaverődik, egy része elnyelődik a légkörben, egy része eléri a felszínt. A Földnél például kb. 37% verődik vissza, 20%-ot nyel el a légkör, és 43% éri el a talajt.

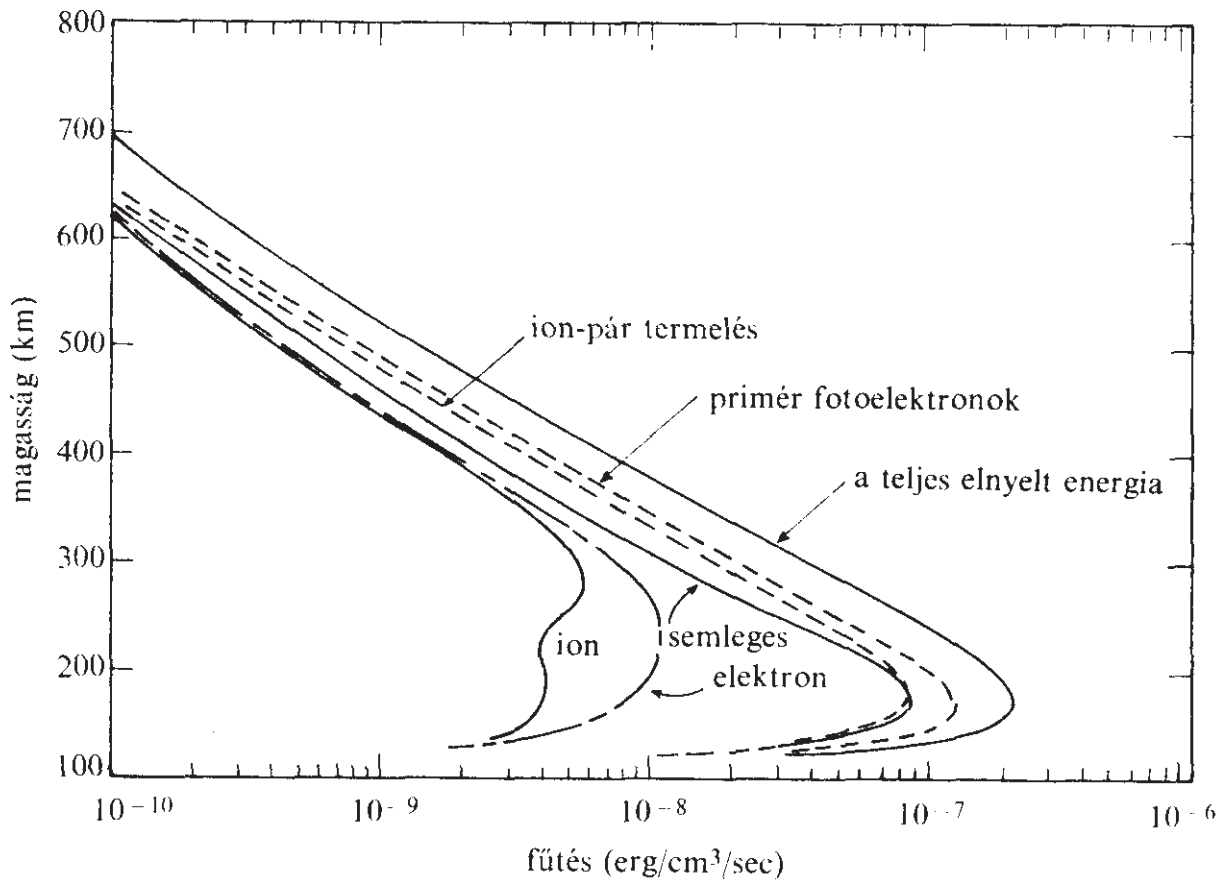
A felszínig lejutó elektromágneses sugárzás felmelegíti a talajt, amely a hő egyik részét a szomszédos légrétegeknek konvekcióval adja át, egy, a magassággal csökkenő hőmérsékleti profilt alakítva ki. Az energia másik részét a talaj az infravörös színtartományban sugározza vissza. Ha ebből a visszavert sugárzásból a légkör valamely összetevője valamilyen hullámhosszú sugárzást elnyel (mint például a CO_2 a $15 \mu\text{-t}$), *üvegházhatás* jön létre. Az ilyen bolygó felszíni hőmérséklete sokkal magasabb lehet, mint az egyensúlyi hőmérséklet.

A légkör az infravörös, a távoli ultraibolya és a röntgensugárzást elnyeli. A 17. a) b) c) ábrán szemléltetjük, hogy az elnyelt energia hány százaléka

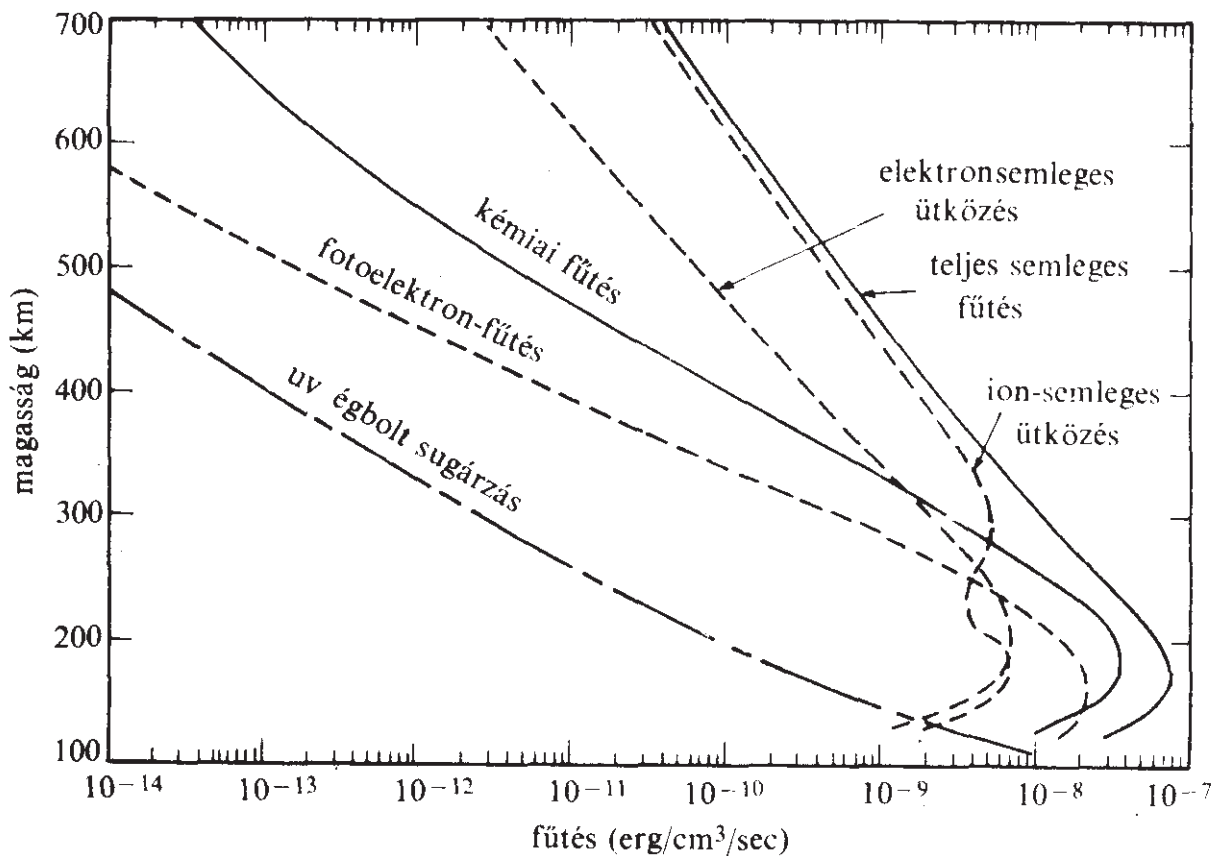
milyen fotokémiai folyamatokon keresztül adódik át a légkörnek. A bejövő $h\nu$ energiájú foton a molekulákat disszociálja, az atomokat gerjeszti vagy ionizálja új semleges és ionizált komponenst hozva létre. Ezek az új részecskék azután további nagyszámú fotokémiai folyamatban vesznek részt, energiát cserélve a többi atommal, molekulával, ionnal, elektronnal és fotonnal, vagy új gerjesztést, új ionizációt, vagy egyszerűen rugalmas ütközést, vagy elektron-ion rekombinációt eredményezve. A fotoelektronok fölös energiája a környező elektronoknak, illetve a rekombinációnál a légkör semleges komponensének adódik át. A gerjesztett atomok alapállapotba jutva sugárzást bocsátanak ki. Ezen sugárzás egy része közvetlenül visszajut az interplanetáris térbe (a Földnél például a bejövő energia 40–50%-a), más része további, az előbb leírt fotokémiai folyamatokban vesz részt.



17/a. ábra. A nyilak vastagsága sematikusán illusztrálja, hogy a Nap extrém ultraibolya sugárzása a különböző fotokémiai folyamatokon keresztül mennyi energiát ad át a légkörnek.



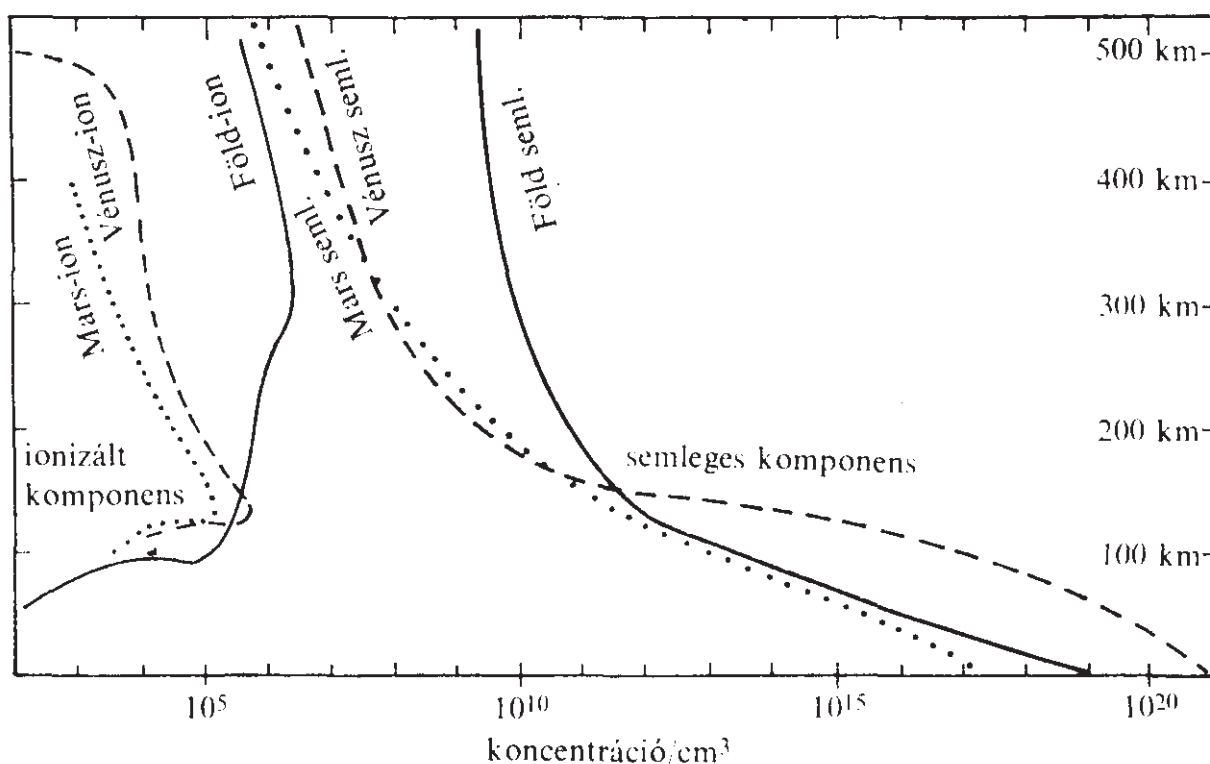
17/b. ábra. A földi atmoszféra semleges összetevőjének, ion- és elektronkomponensének fűtése a magasság függvényében.



17/c. ábra. A földi atmoszférában a semleges gáz fűtéséhez a különböző hőátadási módok mennyivel járulnak hozzá a magasság függvényében.

Az ionizált komponens aránya a semlegeshez képest elhanyagolhatóan kicsi. A Földnél a D rétegben például $1 : 10^{10}$, az F rétegben $1 : 1000$. A 18. ábra a három bolygó esetét mutatja be egyetlen ábrára, közös skálához felrajzolva a semleges és ionizált részecskék koncentrációját.

Az ionoszféra energiáját a napszél energiájával összehasonlítva érdekes megjegyezni, hogy míg az ionoszféra sokkal sűrűbb, addig a napszél részecskéinek az energiája sokkal nagyobb. A napszélben néhány ion van cm^3 -ként, a Földön 1000 km magasságban 10^4 – 10^5 ion van. A napszélben a részecskék energiája KeV körül van, a földi ionoszférában pedig csak eV nagyságrend körül. Tehát az ionoszféra a napszélhez képest igen *nagy sűrűségű hideg plazma*.



18. ábra. A Vénusz (---), a Föld (—) és a Mars (....) légkörében az ionizált (vékony vonal) és semleges (vastag vonal) összetevők koncentrációja a magasság függvényében.

Ha a légkörben a gravitációs szeparáció vagy a fotokémiai folyamatok következtében olyan rétegek jönnek létre, amelyek diszkrét hullámhosszú sugárzás elnyelésével a környezetnél több energiát vesznek fel (mint például a földi ózonréteg), e rétegek a talajhoz hasonlóan konvektív és radiatív hőforrásnak bizonyulnak, és a légkör hőmérsékleti profilját torzíthatják. A felszíntől folyamatosan csökkenő hőmérsékletmenet ilyen rétegek közelében megfordul, és növekvővé válik. Ezt láthatjuk a földi sztratoszférában az ózonréteg miatt, és 100 km felett az extrém ultraibolya sugárzás elnyelődése miatt, a Mars és Vénusz esetében pedig 100 km felett a CO_2 disszociáció mi-

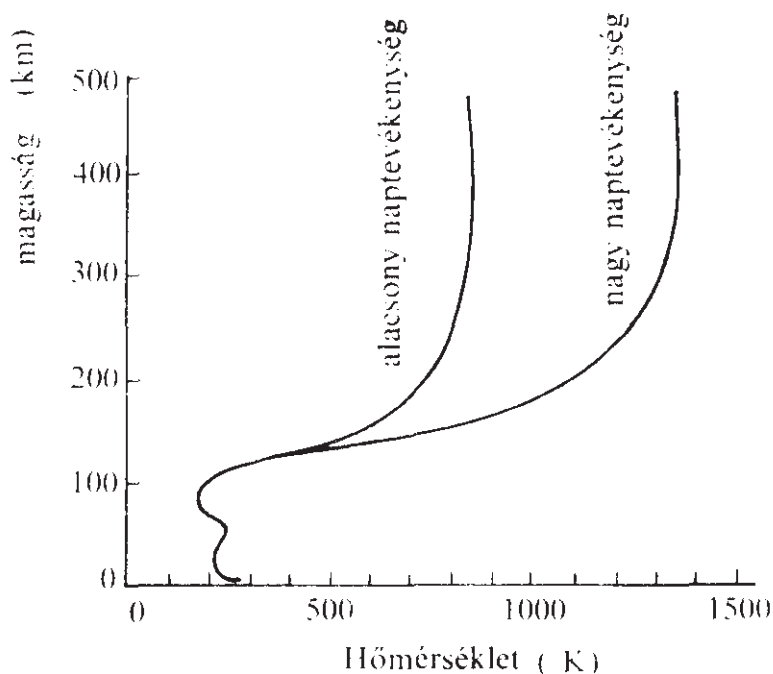
att. Olyan összetevők viszont, amelyek szelektív emissziót produkálnak, (mint például a CO_2 a 15μ -on), hőelvonó szerepet játszanak a légkör hőháztartásában.

Bizonyos magasságnál, ahol a sűrűség már elég kicsi, és az infravörös fotonok szabad úthossza elég nagy, vagyis a sugárzó gáz (főleg CO_2) fotonjai már kijuthatnak a bolygó légköréből, a hőmérséklet közel van az egyensúlyihoz (*mezopauza*). Efölött az infravörös energialeadás egyre kevésbé intenzív, mivel a molekula ütközések egyre ritkábbak, és a molekulák vibrációs szintjei nem gerjesztődnek. A mezopauza 120–130 km magasan van a Vénusznál, 105 km-en a Földnél és 120 km-en a Marsnál.

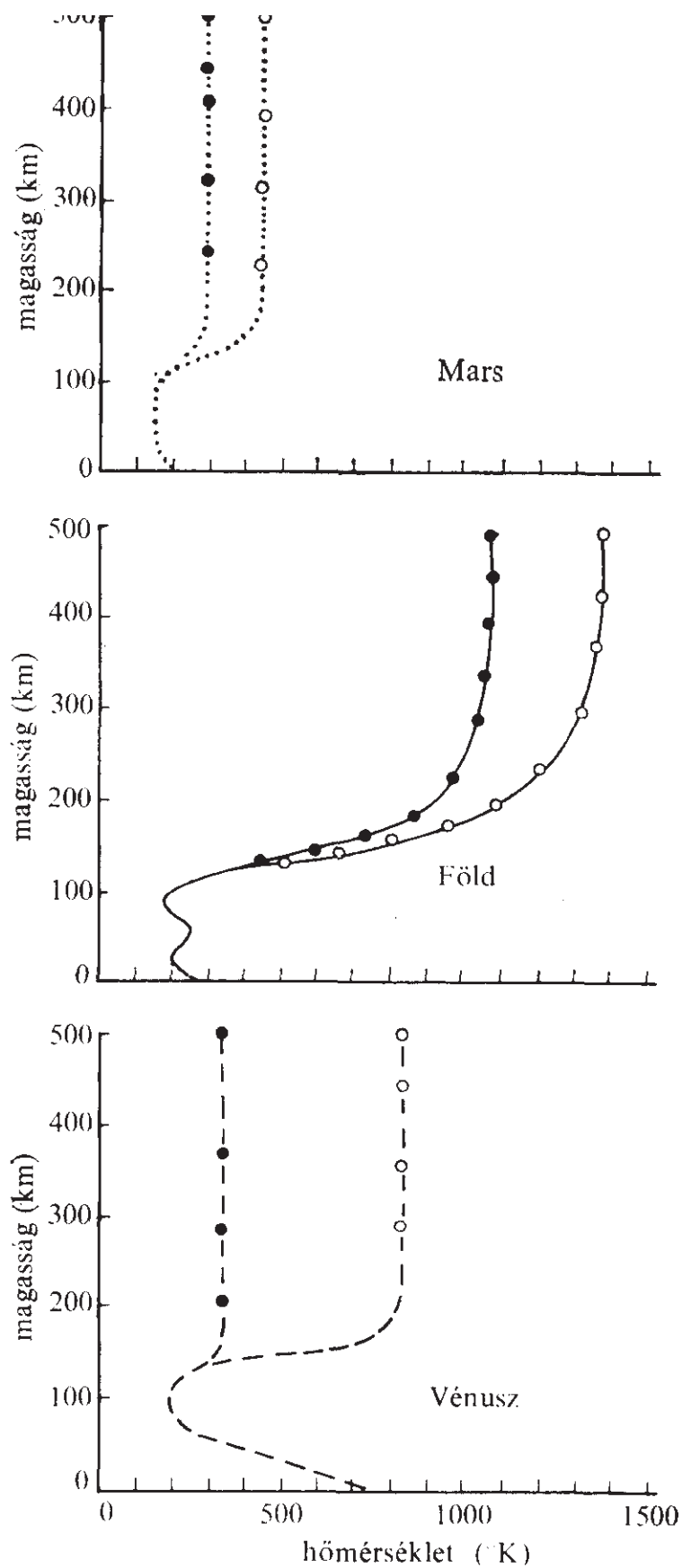
A mezopauza felett a termoszférában a hőmérséklet egy ideig növekszik a magassággal, majd állandóvá válik, vagyis ez az ú. n. *exoszférikus hőmérséklet* a magasságtól független lesz. Az ilyen hőmérséklet-profilú légkör a vertikális turbulenciákkal szemben stabilis. Az exoszférikus hőmérsékletet az szabja meg, hogy a Napból érkező ultraibolya és lágy röntgensugárzásból a légkör mennyit abszorbeál, illetőleg az alsóbb rétegek felé mennyi energia adódik át hő formájában. Mágneses térrel rendelkező bolygók esetén az exoszférikus hőmérsékletet a mágneses erővonalakkal párhuzamosan fellépő jó hővezetőképesség következtében a magnetoszférából a felső légkör alacsonyabban fekvő rétegeibe jutó hőfluxus is befolyásolja.

A fenti statikus képet nagyon elbonyolíthatja néhány dolog.

1. Ha a sugárforrásból nem állandó intenzitású sugárzás érkezik a légkörbe, mint ez a Nap esetében is fennáll, akkor a naptevékenységgel változik a kibocsátott energia (11 éves periódussal, lásd 19. ábrát, és szabálytalanul), továbbá az energiakibocsátás anizotrópiája miatt az adott bolygólégkör



19. ábra. A földi atmoszféra hőmérsékleti profiljának változása a naptevékenység 11 éves ciklusával párhuzamosan ($^{\circ}K$)



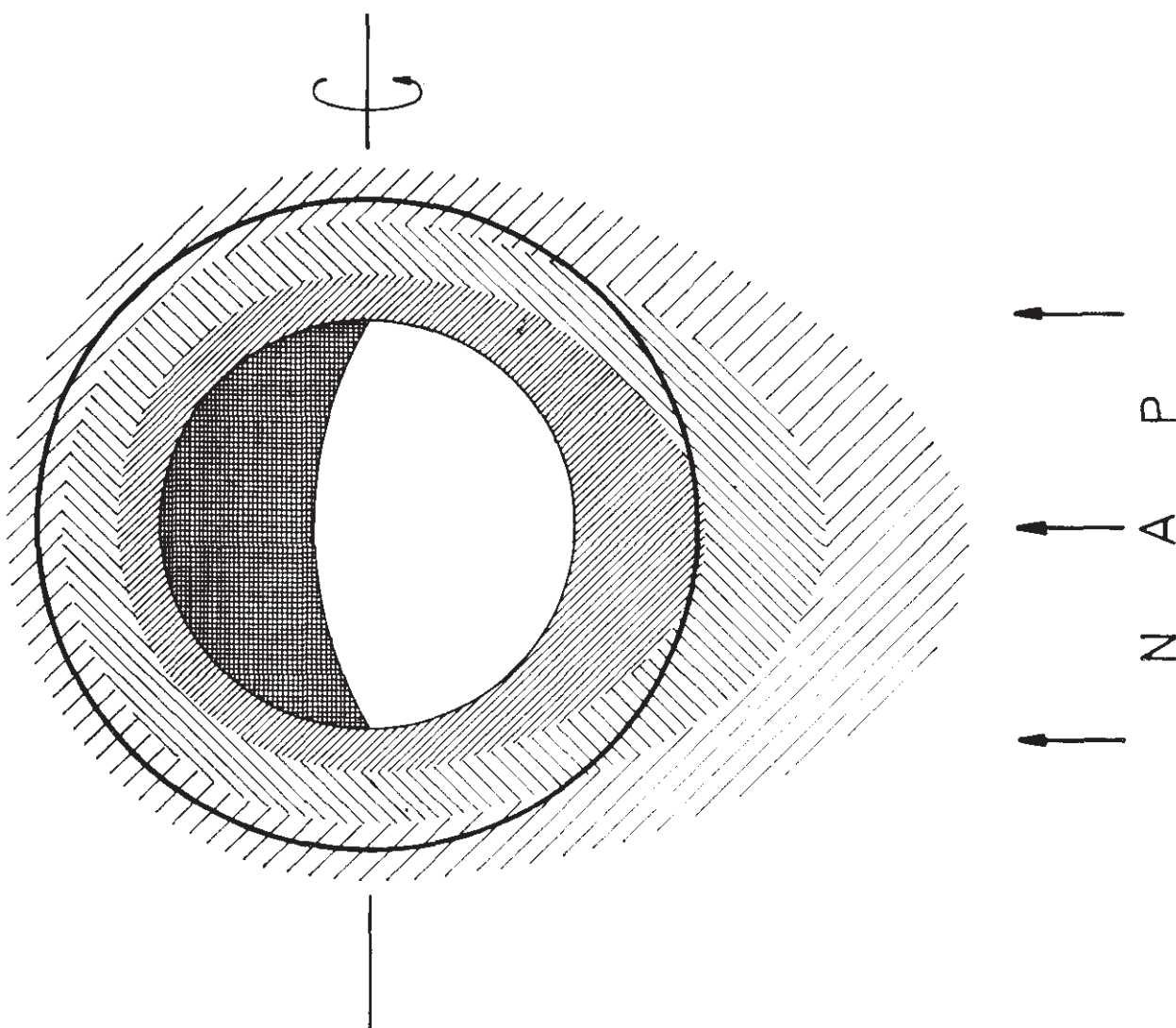
Mars, Föld és Vénusz

nappali ○ és éjszakai ● hőmérsékleti profilja

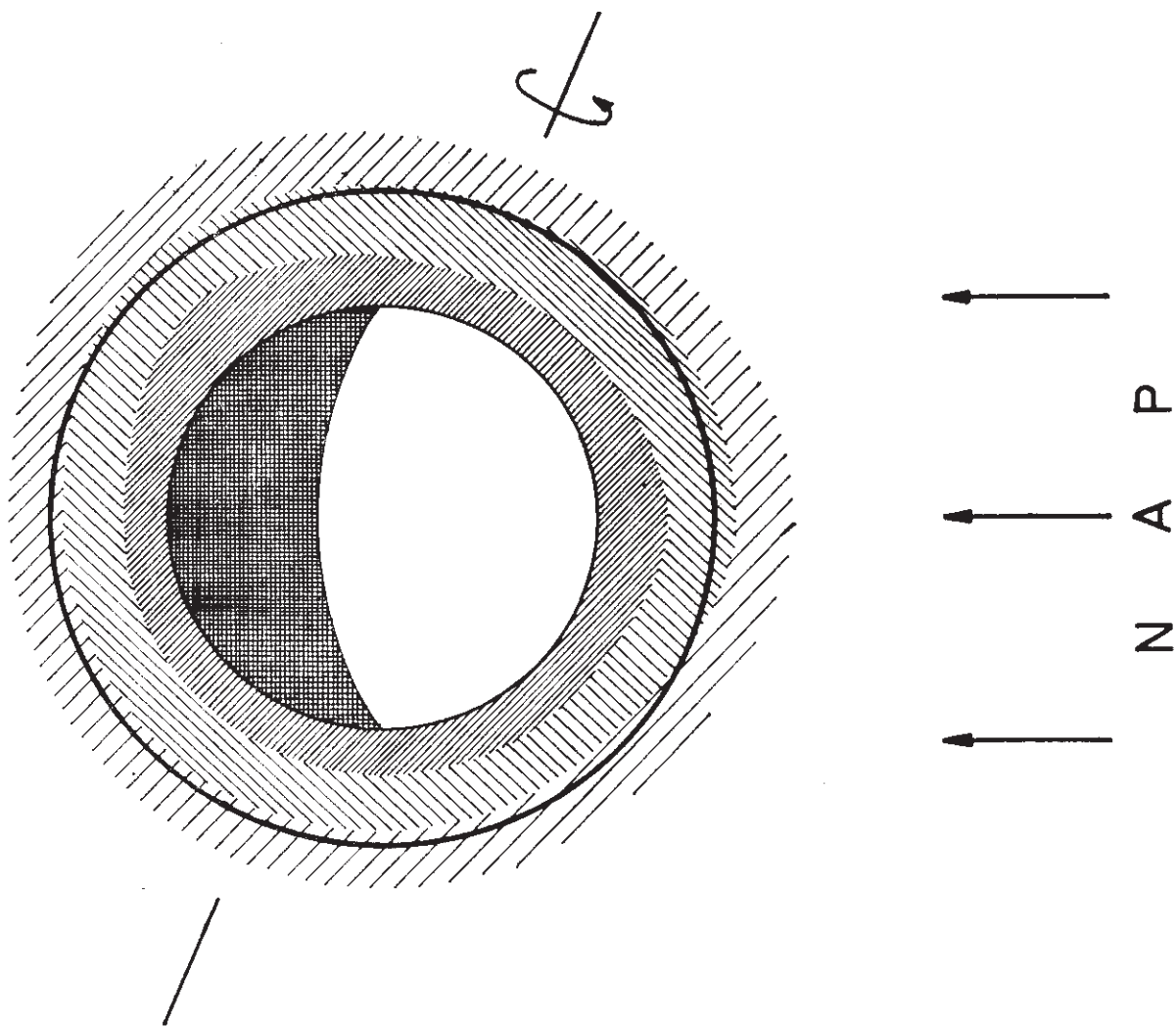
20. ábra. A Vénusz (----), a Föld (—) és a Mars (.....) hőmérsékleti profilja nappal (○) és éjszaka (●).

irányába kibocsátott energia nem egyenletes (Nap-aktivitási területek körülbelül 27 napos periódusú visszatérése a Nap tengelyforgása következtében).

2. Ha a bolygó tengelyforgása nem kötött a Naphoz képest, mint ez a Föld-típusú bolygók mindegyikénél fennáll, akkor a maximális besugárzás helye a bolygó tengelyforgási periódusával haladó hőmérsékleti maximumot és „kidudorodást” okoz a légkörben (napszakos effektus, 20. ábra), melyhez még a fél periódus idejű árapály hullám is hozzáadódik. Ez a „kidudorodás” a légkörben úgy jön létre, hogy a maximálisan fűtött hely környezetében a nagyobb felmelegedés nagyobb nyomást eredményez. A hőelnyelő közegek környezetében a legnagyobb a nyomás, tehát pl. a talaj közeli légrétegektől radiálisan minden irányba megindul a légáramlás. Vízszintesen, amerre nem kell a gravitáció ellen dolgozni, nagyobb erősségű radiális szél indul meg, de felfele is megemelődnek a légrétegek. Ez a „megemelődés” vagy „kidudo-



21. ábra. Sematikus rajz a Föld légkörében keringő OGO-6 mesterséges hold méréseinek illusztrálására: a különböző összetevők maximális koncentrációja a nap folyamán különböző időpontban jelentkezett.



22. ábra. Sematikus rajz a Föld légkörében keringő OGO-6 mesterséges hold mérésének illusztrálására: a különböző összetevők koncentrációja évszakos változást mutat; a téli félgömb felett a hélium koncentrációja, míg a nyári félgömb felett az oxigén és a nitrogén koncentrációja nagyobb.

rodás” az éjjel alacsonyabban elhelyezkedő légrétegeket nappalra magasabbra emeli, feljebb emelve természetesen a koncentráció eloszlást is (21. ábra). Ha mármint pl. egy mesterséges hold adott magasságban jár, akkor nappal egy alacsonyabb szintről hozzá felemelkedett réteg kémiai összetételét méri az éjszakaihoz képest. Ebben a „felemelkedett” rétegben több lesz a nehezebb molekulasúlyú elem a gravitációs szeparáció miatt. Tehát a legnehezebb molekulasúlyú elem maximális koncentrációt mutat akkor, amikor a legmagasabb a hőmérséklet. Ha véletlenül olyan magasságtartományok légrétegei „emelkednek” és „süllyednek” a mérő holdunk körül a nap folyamán, ahol a különböző összetevők koncentráció-görbéi metszik egymást, lehet, hogy éjjel az egyik, nappal a másiknak van nagyobb koncentrációja. Vagyis a különböző összetevők maximumainak időpontjai különböző időpontra tolódnak. (A Föld esetében az OGO-6 500–1000 km magasságtartományban

mért, a hőmérsékleti maximummal egyidőben mért N_2 koncentráció maximumot, az oxigénét korábban, 15 óra körül, a héliumét 10 óra körül.)

3. Ha a bolygó tengelye nem merőleges a pályasíkra, a maximális besugárzás helye a pályamozgás periódusával vándorol az egyenlítőhöz képest, évszakok váltakozását okozva a felszínen, és évszacos szélességi változásnak nevezett effektust a felsőlégkörben. Ez az évszacos szélességi koncentráció változás szintén szemléletesen magyarázható a gravitációs szeparációval. A nyári félgömb jobban fűtődik mint a téli. Pl. a Földnél a mérsékelt övben 20° — 30° körül van a hőmérsékletkülönbség. Ennek következtében a szimmetrikus képhez képest a nyári félgömb felett mindenütt jobban megemelkednek a légtömegek (22. ábra). Így a nyári félgömb felett ugyanabban a magasságban járó mesterséges hold egy alacsonyabbról felemelkedett légréteg összetételét méri, melyben nagyobb lehet a nehezebb molekulasúlyú összetevő koncentrációja és a téli felett a könnyebb molekulasúlyú összetevők koncentrációja, ha éppen a koncentráció görbék metszése környékén jár a mesterséges hold (a Föld esetében a téli félgömbnél az *OGO—6* több héliumot, a nyári félgömbnél több O_2 -t, N_2 -t talált).

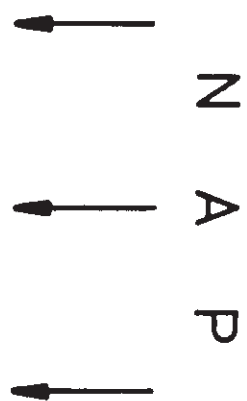
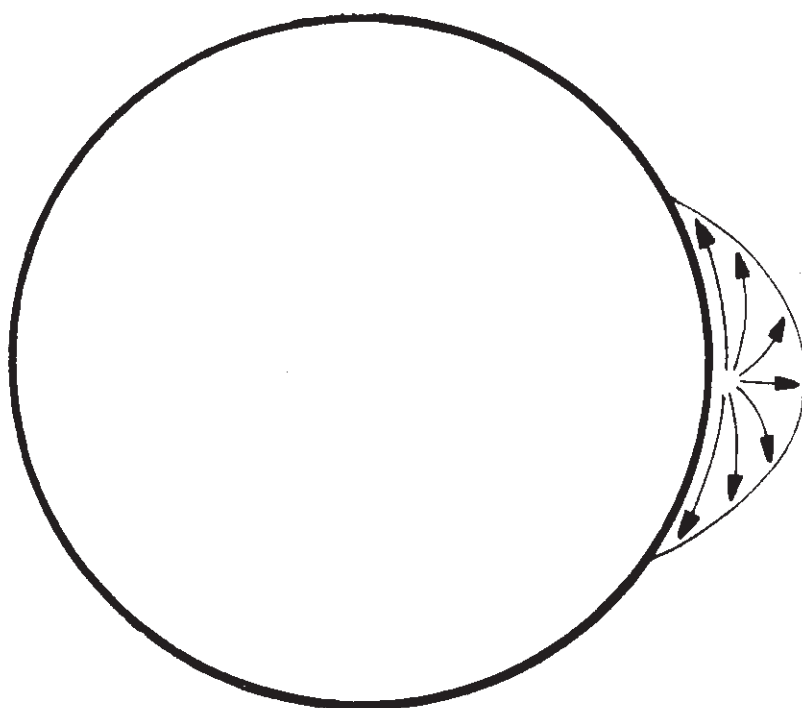
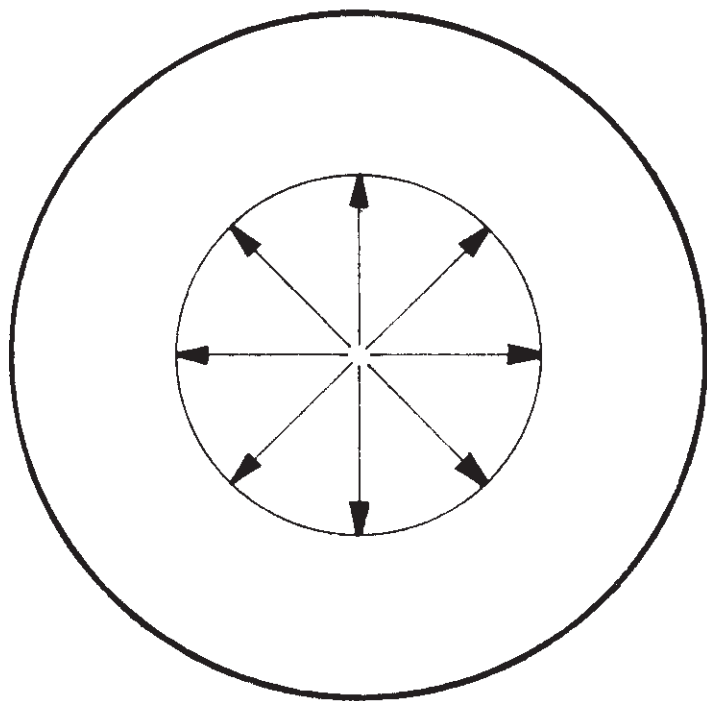
A beérkező korpuszkuális sugárzás, amely, mint a Nap felületéről állandóan fújó „napszél” éri el a bolygókat, jelentős, de változó mennyiségű energiát hoz. Az energiaátadás módjaival ezen cikk keretein belül nem foglalkozunk, csupán megemlítjük, hogy a mágneses térrel rendelkező bolygók (pl. a Föld) esetében a statikus képet jelentősen megzavarja a korpuszkuális sugárzás, különösen magnetosféra zavarok idején. Miután a Nap egyes területeinek aktivitása nem periodikus, és így az általa kiváltott magnetosféra viharok jelentkezése sem az, továbbá ezeket előre jelezni még nem tudjuk, ezért az okozott zavarok modellezése nagy nehézségekbe ütközik.

Szélrendszerek kialakulása

Az a tény, hogy a bolygók légkörét egy külső sugárforrás differenciálisan fűti, oda vezet, hogy nagy globális radiális szélrendszerek fejlődnek ki a maximálisan fűtött helyről a minimálisan fűtött hely irányába (23. ábra). Maximális a szélerősség a terminátor környékén. A szubszoláris pont felől eláramló légtömegek helyére azután más magasságokon visszaáramlás alakul ki. Az ilyen vízszintes hőelvezetés jelentősen csökkenti a hőmérséklet napszacos változásainak az amplitúdóját.

Ha nem kötött tengelyforgást végez a bolygó a Naphoz képest, akkor a bolygón levő megfigyelő — mint már említettük — az árapályhullámot is rendszeres szélként érzékeli.

Miután a szubszoláris pontból radiálisan kiinduló szélrendszer mind fázisban, mind erősségekben a hőforrás helyével és erősségével együtt változik, és a két szélrendszer szuperpozíciójához még hozzájárul a légkör rotációja, esetleg szuperrotációja, a kép elég aszimmetrikussá torzulhat.



23. ábra. Sematikus rajz a maximálisan fűtött helyről radiálisan kiinduló szélrendszer illusztrálására.

A Vénusz, Föld és Mars légkörének összehasonlítása

A három bolygó csillagászati paramétereiben nincs túl nagy különbség, mivel a Vénusz 0,7, a Föld 1,0, a Mars 1,5 csillagászati egységnyi távolságra van a Naptól. A beeső napsugárzás a Vénuszra 1,91, a Marsra 0,43-szorosa a földinek. Viszont a Vénusz albedója sokkal nagyobb (0,77), a Marsé kisebb (0,26), mint a Földé (0,29—0,35), ezért az egyensúlyi hőmérsékletük közel azonos (228 °K, 251 °K, 218 °K).

Kémiai összetétel szempontjából nagy különbség van a Föld és két szomszédja között: a Földön a felszín közeli légkör fő komponensei a nitrogén és oxigén, míg a Vénusznál és a Marsnál a *széndioxid* dominál. Üvegházhatás mindhárom bolygónál fellép, de különösen erőteljesen a Vénuszon, így annak felszíni hőmérséklete nagyon magas (750 °K). A felszíni nyomás 100-szor nagyobb a Vénuszon, és 170-szer kisebb a Marson, mint a Földön. Mivel a Vénusz tengelye csaknem merőleges a pályasíkjára, nincsenek évszakváltások. A Marson viszont a földihez teljesen hasonló a tengelyhajlás, és így évszagos változás is van. A Mars pályaeccentricitása durván 6-szor nagyobb a földinél, ez lényeges különbséget okoz naptávolságban a perihélium és afélium között (1,38 illetve 1,67 csillagászati egység). A perihéliumban beérkező nagyobb mennyiségű napsugárzás magasabb hőmérsékletet és erősebb szeleket hoz létre. A szél által felkevert por közvetlen szoláris fűtése még magasabb felszíni hőmérsékletet eredményez. A felkevert por hőelnyelése és a szél, egymást erősítve, olyan pokoli porvihart kavar amely néha hónapokon keresztül fennmarad. A szélsébség eléri a 160 km/órát (44 m/sec-ot), a hőmérséklet 20 fokkal is meghaladja az átlagot, és a finom porrészecskéket a szél 50 km magasságig is felemeli. A nappalok és éjszakák közötti nagy hőmérsékletkülönbségek által előidézett erős, örvénylő légmozgások következtében a por sohasem ül le teljesen, mintegy 30 km magasságig mindig megtalálható. A finoman szuszpendált anyag rózsaszínre festi a Mars eget (I. kép).

A Mars ritka légkörének sokkal kisebb a hőtároló képessége, ezért a változások relatíve sokkal nagyobbak, mint a Földnél vagy a Vénusznál. A felszíni 6 mbar körüli légnyomás például 0,1 mbar napi ingadozást mutat. Ennek megfelelő napi változás a Földön 10 mbar lenne a megfigyelt 1,5 mbar-ral szemben.

A CO_2 disszociációs hatáskeresztmetszete sokkal kisebb, mint az O_2 -é, ezért egyrészt az exoszféra sokkal hidegebb a Marsnál és a Vénusznál, másrészt a Schuman—Runge sugárzás (1500—1700 Å) is, és az ózon hiánya miatt a 2000—3000 Å hullámhosszúságú sugárzás is sokkal mélyebbre hatol le a Mars és a Vénusz légkörébe. A Nap EUV sugárzásának differenciális fűtőhatása következtében fellépő erősebb szél hatásosabban hűti a Mars és a Vénusz exoszféráját, mint a Földét.

Egyáltalán a turburencia hatásosabban dolgozik a Marson és a Vénuszon, mint a Földön: a mezopauza alatt mindkét bolygónál jól kevert az atmoszféra.

Ionoszférája mindhárom bolygónak van (18. ábra első három görbéje) bár a Marsé és a Vénuszé kevésbé komplex mint a Földé. A Földdel ellentétben viszont a másik két bolygónak nincs túl jelentékeny mágneses tere, tehát nincs lényeges sugárzási övezete sem.

1. táblázat

Összehasonlító táblázat a Vénusz, a Föld és a Mars adataira

	Vénusz	Föld	Mars
Naptól mért távolság	0,723	1	1,524
Keringési periódus (földi napokban)	224,7	365,26	687,0
Pályaexcentricitás	0,0068	0,016	0,0934
Közepes sugár (km)	6050	6371	3385
Tömeg (földtömegben)	0,814	1	0,107
Sűrűség (g/cm ³)	5,25	5,52	3,97
Gravitációs gyorsulás (cm/sec ²)	878	973	372
Ekvátor hajlása a pályasíkhhoz	2°	23°27'	23°57'
Nap hossza (földi napokban)	243	1	1,03
Beeső napsugárzás fluxusa 10 ⁶ erg/cm ² /sec Földhöz viszonyítva	2,66 1,91	1,39 1	0,60 0,428
Albédó	0,77	0,29 0,35	0,26
A felszínen a közepes nyomás (atm)	100	1	0,006
A felszínen a közepes hőmérséklet	750 °K	290 °K	210 °K
Egyensúlyi hőmérséklet	228 °K	251 °K	218 °K
Exoszférikus hőmérséklet S _{10.7} = 75 S _{10.7} = 150	250 800	600 1500	200 400
Napszakos effektus amplitúdója	500	300	200
Homopauza magassága (km)	122	105	120
Exoszféra alsó határa (km)	230	500	200
Plazmapauza magassága (km)	500	25 000	350
A légkör fő komponensei (%)	CO ₂ (95)	N ₂ (78) O ₂ (21)	(CO ₂ 95)

A Vénusz légköre a bolygó tengelyforgásánál 60-szor gyorsabban rotál a bolygóval azonos irányban; a Vénusz 243 nap alatt fordul meg tengelye körül, a légkör viszont már 4 nap alatt „körülfutja” a bolygót, és az egyenlítővel párhuzamos sávok szerkezetű felhőképet hoz létre. Ez a felfedezés annyira meglepte a kutatókat, hogy először nem is akarták elhinni, hogy a 4 nap a légkör rotációs periódusa, hanem feltették, hogy vagy több azonos alakzat van a Vénusz légkörében (mint például a Jupiteren a Nagy Vörös Folt), vagy hullám fut végig a légkörön ilyen periódussal. A Venyera űrszondák leszállás közbeni elsodródásai, a CO_2 abszorpciós vonalainak Doppler-eltolódásai, valamint a Mariner-10 ultraibolya felvételei alapján azonban úgy tűnik, hogy valóban vannak erős, globális szelek, amelyek nagy mélységekig léteznek, tehát nemcsak felsőlégköri jelenségek. Az 50 mbar-os szinten, a felhőréteg tetejénél ez a 4 napos szuperrotáció 100 m/sec (360 km/óra) erősségű, a 20 000 mbar nyomású szinten 40 m/sec (144 km/óra) erősségű szélnek felel meg.

A Föld légköre is sávok képet mutat, ha az interplanetáris térből nézzük, és vannak mérési adatok a mesterséges holdak fékeződése alapján, amelyek szintén szuperrotációra utalnak, azonban ez a Vénuszhoz képest nagyon kicsi mértékű.

Felhő kialakulása mindhárom bolygó légkörében bekövetkezik. A Vénusz felhői vízben oldott kénsav és sósav cseppecskékből állnak. A Venyera-8, -9, -10 leszállása óta tudjuk, hogy az átlátszatlan hitted felhőréteg átengedi a fény egy jelentős részét, így a Vénusz felszíne nem sötét. A Föld felhőinek anyaga H_2O , a Mars-felhők szintén vízgőz, de CO_2 felhők is létezhetnek (III, IV, V kép).

Mérési eredmények és a hozzájuk illesztett modellek

Vénusz

A bolygó rendkívül sűrű, átlátszatlan felhőrendszere miatt a Földről nehezen volt tanulmányozható. A Venyera szondák és a Mariner-5, -10 mérései alapján ismertünk meg többet róla. A felszínén váratlanul nagy nyomást találtak (100 atmoszféra), és igen magas hőmérsékletet (750 °K). A Venyera szondák sodródásából igen erős, viharos szelekre lehetett következtetni. Ionoszférát találtak, de csak egy vékony réteget, 140 km magasság körül — 10^5 elektron/cm³ maximális sűrűséggel a nappali oldalon. Fő összetevő ebben a magasságban a CO_2^+ és O_2^+ , míg 200 km felett főleg O^+ , He^+ és H^+ . A nappali oldalon nagy naptevékenységnél az elektronsűrűség hirtelen lecsökkent 500 km-nél, amit a plazmapauzával lehetett azonosítani. Alacsony naptevékenységnél ez a lecsökkenés sokkal diffúzabb és 350 km környékén volt mérhető.

Kémiai összetétele: 95% CO_2 , 135–140 km-en néhány % CO és O , nyomokban H , Ar , He és C . A Venyera űrszondák méréseihez illesztett légkörmodell

(Marov, 1973) szerint a homopauza 122 km-en van és $T = 180^\circ K$ a hőmérséklet. A naptevékenységgel az exoszférikus hőmérséklet $550^\circ K$ — $900^\circ K$ között, míg a napszakos effektussal $200^\circ K$ — $700^\circ K$ között változik. Ezen utóbbi szélhatás nélkül $150^\circ K$ — $920^\circ K$ lenne. A modell megalkotásánál legnagyobb problémát annak a megmagyarázása jelentette, hogy miért van nagy magasságban is jelentős mennyiségű széndioxid, hiszen a CO_2 gyors fotodisszociációja, és a szénmonoxid és az oxigén lassú rekombinációja miatt ez nem volt várható. Magyarázatként egyelőre azt lehet mondani, hogy az erős turbulencia juttatja a magasba a CO_2 -t, míg a CO és O -t az alsó rétegek felé szállítja.

Föld

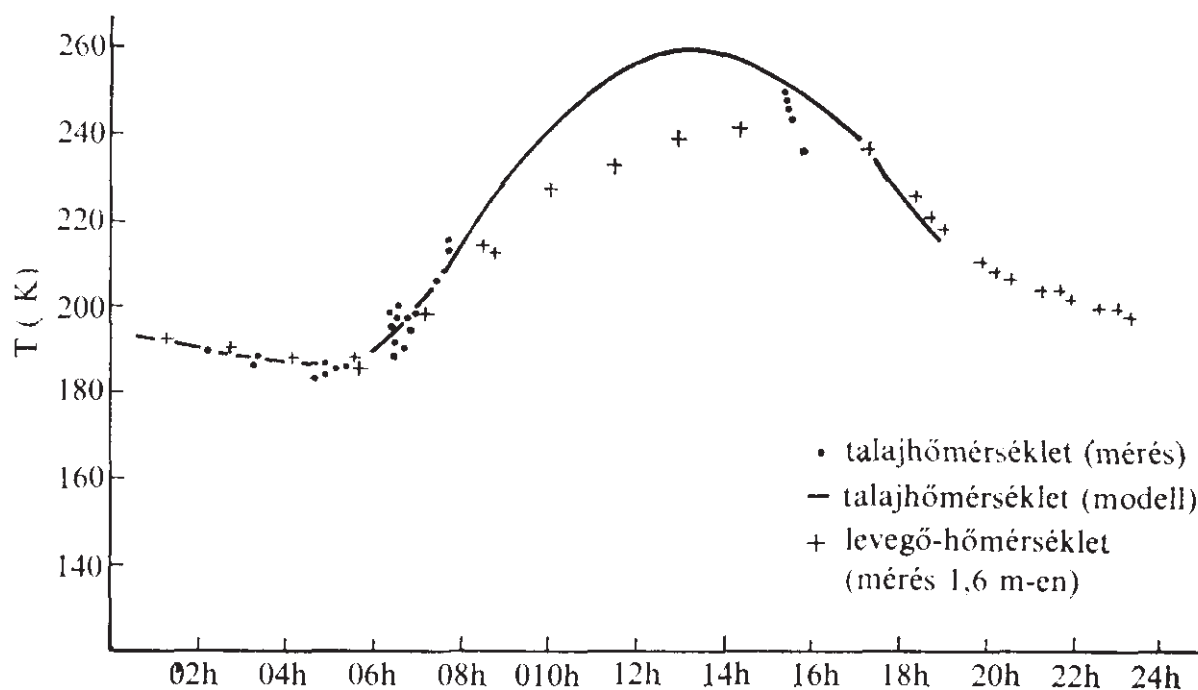
Az alsó légrétegekről összegyűjtött sok mérési adat, és a belőlük konstruált légkörmodellek után nagy meglepetésként hatottak az űrkorszak mérési eredményei. A Vénusz felé eddig 12, a Mars felé 16 űrszondát indítottak, a Föld körül *több ezer* mesterséges hold mér, vagy csak kering, de fékeződésével fontos információt ad a légkörről. A sok mérési adat felsorolásával meg sem próbálkozunk, hanem csak a belőlük *Jacchia* által konstruált légkörmodellt ismertetjük nagy vonalakban (Jacchia, 1971), és a mesterséges holdak fedélzetén végrehajtott *in situ* mérésekre utalunk.

A földi felszíni légkör összetétele: 78.09% N_2 , 20.95% O_2 , 0.93% Ar , nyomokban Kr , Ne , Xe , He , H , O_3 , Ra , 0.4% vízgőz és 0.03—0.07% CO_2 . A homopauza 105 km-en van. Az exoszférikus hőmérséklet változásában a Nap által okozott 11 éves, 27 napos, napszakos és geomágneses effektuson kívül még fél éves periódusú változást is találtak. A 11 éves effektus amplitudója az exoszférikus hőmérsékletben 700° körül van, a napszakosé 200 — 300° , a geomágneses szintén több száz fokot is elérheti, míg a 27 napos is, és a fél éves is körülbelül 100° . Ezen kívül, ha ugyanabban a magasságban nézzük a légkört, a kémiai összetételben mértek évszakos és szélességi változást is: míg a hélium a téli félgömb felett sűrűbb, addig az oxigén és a nitrogén koncentrációja a nyári félgömb felett nagyobb. A napszakos effektussal kapcsolatban az *OGO-6* mesterséges hold *in situ* mérési adatai mutatták ki, hogy a légkör különböző összetevőinek különböző időkből van a maximuma: a nitrogéné 16^h -kor, az oxigéné 15^h -kor, a héliumé 10^h -kor, vagyis minél könnyebb molekulasúlyú összetevőről van szó, annál korábban tolódik a maximális sűrűség időpontja. Ugyancsak a kémiai összetétel változásának rováására írható az ionoszférikus F réteg ionizáltságának évszakos változása, hiszen az atomi és molekuláris oxigén is alá van vetve a heteroszférában a gravitációs szeparációnak.

Az alsó termoszférában 100—120 km magasságban félnapos periódusú hőmérséklet- és szélereősség-változást figyeltek meg, mely a mezo- és sztratoszférából elinduló árapály hullámmal azonosítható.

A Mars felszínközeli légkörénekkémiai összetételére a következőket mondhatjuk: 95% CO_2 , 0.1—0.4% oxigén, 2—3% nitrogén, 1—2% argon, 0.16% CO , nyomokban ózon, kripton, xenon. Felsőlégtörében az NO koncentráció lényegesen nagyobb, mint a Földön.

A Mars légköre rendkívül ritka, felszínén a légnyomás átlag 6 *mbar* körül van, 0.1 *mbar* napi változással. Felszíni hőmérséklete ritkán emelkedik fagypont fölé; a víz fagyott állapotban van. Afelszín feletti légrétegek nappal 20—25°-kal is hidegebbek a talajnál (24. ábra), emiatt erős konvektív áramlások keletkeznek a magasba emelve a Mars finom porát. A szélesség csúcértéke nyáron 17 m/sec volt a Viking-1 és -2 1976-ban mért adatai szerint. A nappali viharos feltételek napnyugtára szűnnek meg, mire a talajközeli néhány m vastagságú légréteg hőmérséklete azonos lesz a talajével. A Viking-1 és -2 leszálló egységek meteorológiai adatai szerint maximális a nappali hőmérséklet (241 °K) 15 óra helyi időben, minimális 5 órakor (187 °K—191 °K). Az extrémumok időpontjai azt mutatják, hogy a levegő fűtését a talajról sugárzással és konvekcióval átadott hő, és a levegőbe emelt porrészecskék hőelnyelése biztosítja. A szél erős- és irányváltozása mindkét helyen mutatta az árapályra jellemző félnapos oszcillációt, és a fűtésre jellemző szélvektor-körbejárást. Érdekes, hogy a mért szélirányok nem magyarázzák a környező felszíni formák aeolikus alakzatait, azok talán más évszakban, vagy egészen más epochában alakultak olyanra.



24. ábra. A Viking-2 leszálló egység hőmérsékletmérései a Marson: a talaj mért hőmérséklete (●), a hozzá illesztett modell (—) és az 1,6 m magasságban mért levegőhőmérséklet (+). A levegő 10—16^h között 15—20°-kal hidegebb, mint a talaj.

A légkör kevés vízgőz tartalma ismétlődő napi ciklikusságot mutat, nyilván telítettségi egyensúly van. Az északi poláris régiókban nyáron nagy vízgőz koncentrációt találtak. A déli poláris sapka felett 20 km magasságban $148\text{ }^{\circ}\text{K}$ -t mért tavasszal, illetve nyáron a Mariner-7, -9. A szilárd CO_2 6 mbar nyomáson szublimál, telítettségi hőmérséklete ezen a nyomáson $147.7\text{ }^{\circ}\text{K}$, tehát CO_2 felhők létezhetnek a pólusok felett. További reggeli megfigyelések dönthetnek ebben a kérdésben (az extinkciós koefficiens kb. kétszeresére változik aszerint, hogy H_2O , vagy CO_2 felhőről van-e szó).

A homopauza 120 km környékén van. Az exoszferikus hőmérséklet rendkívül alacsony, és erősen változó ($200\text{ }^{\circ}\text{K}$ alacsony, illetve $400\text{ }^{\circ}\text{K}$ nagy naptevékenységre). A két Viking leszálló-egység leszállás közben mérte a hőmérsékleti profilokat, és 90 km alatt lefelé haladva csökkenő amplitudójú hőmérsékleti hullámokat talált. Az amplitudó 90 km-nél elérte a 25° -ot. Ezek a hullámok réteges vertikális oszcilláció következményei lehetnek, melyet a felszín napi termális ciklusa gerjeszt kompressziót (felmelegedést) illetve expanziót (lehülést) okozva. Új, meglepő eredménye a Viking szondák méréseinek, hogy a Mars ionoszférájának fő komponense O_2^+ . Éjszaka ionizációt nem találtak (mérési határ 10^4 elektron/cm³ volt).

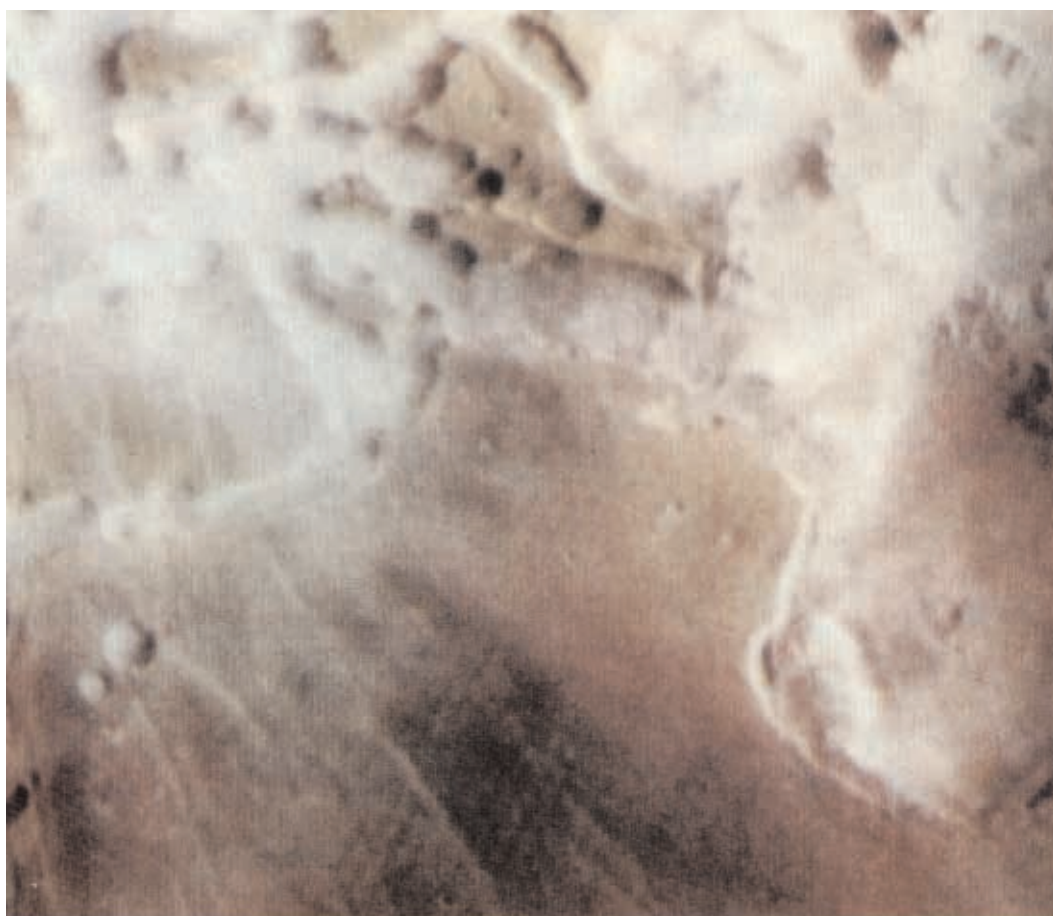
A légkörben található elemek izotóp aránya fontos következtetéseket enged levonni a bolygó keletkezésére és fejlődésére vonatkozóan. A Viking-1, -2 mérési eredményei a járulékos összetevőkre vonatkozóan a Mars légkörében ezért különös jelentőséggel bírnak. A mérések azt mutatják, hogy a Mars légkörében az oxigén és a szén izotóp aránya hasonló a földihez, de a nitrogénnél a ^{15}N a ^{14}N -hez képest a földi értéknek 1.75-szöröse: a ^{15}N bedúsult a Marson a ^{14}N -hez képest. Az ^{36}Ar a ^{40}Ar -hoz képest kevesebb, mint a Földön, az abszolút gyakorisága (vagyis a teljes légkör össztömegéhez képesti aránya) 100-szor kisebb, mint a Földön. A ^{129}Xe 2,5-ször gyakoribb a Marson mint a ^{131}Xe és a ^{132}Xe (a Földön mindhárom gyakorisága közel azonos). És végül több kriptont találtak, mint xenont.

Mire lehet ezekből az arányokból következtetni? Ha a Mars eredeti légköre ugyanolyan összetételű volt, mint a Földé, akkor abból, hogy a ^{14}N és ^{36}Ar kevesebb, mint a megfelelő nehezebb izotópjuk, arra gondolhatunk, hogy a könnyebb izotópok a gravitációs szeparáció következtében nagyobb magasságba kerülve könnyebben megszökhetnek a Mars atmoszférájából. Tehát a Mars eddigi élete folyamán jelentős mennyiségű nitrogént és argont veszített, vagyis sokkal masszívabb légkörrel rendelkezett. A különböző modellek szerint a nitrogén eredeti parciális nyomása a 2—9 mbar-t érte el, és a jelenleginek legfeljebb a 10-szerese lehetett az eredeti légkör tömege. Ez 100 mbar maximális felszíni nyomást adhatott, lehetővé téve folyékony víz jelenlétét a Marson, és megmagyarázva a teljesen egyértelműen folyékony erózióra utaló felszíni formák keletkezését. Ha a Mars jelenlegi légköre 1/10-e az összes felszabadult illó anyagnak, akkor, ha a H_2O a felszínen folya, néhány méternyi vízréteg boríta-

ná a Mars felszínét. Hol van hát a hiányzó víz? Valószínűleg a sarki sapkába és a talajba fagyott, és itt befedte a finom por.

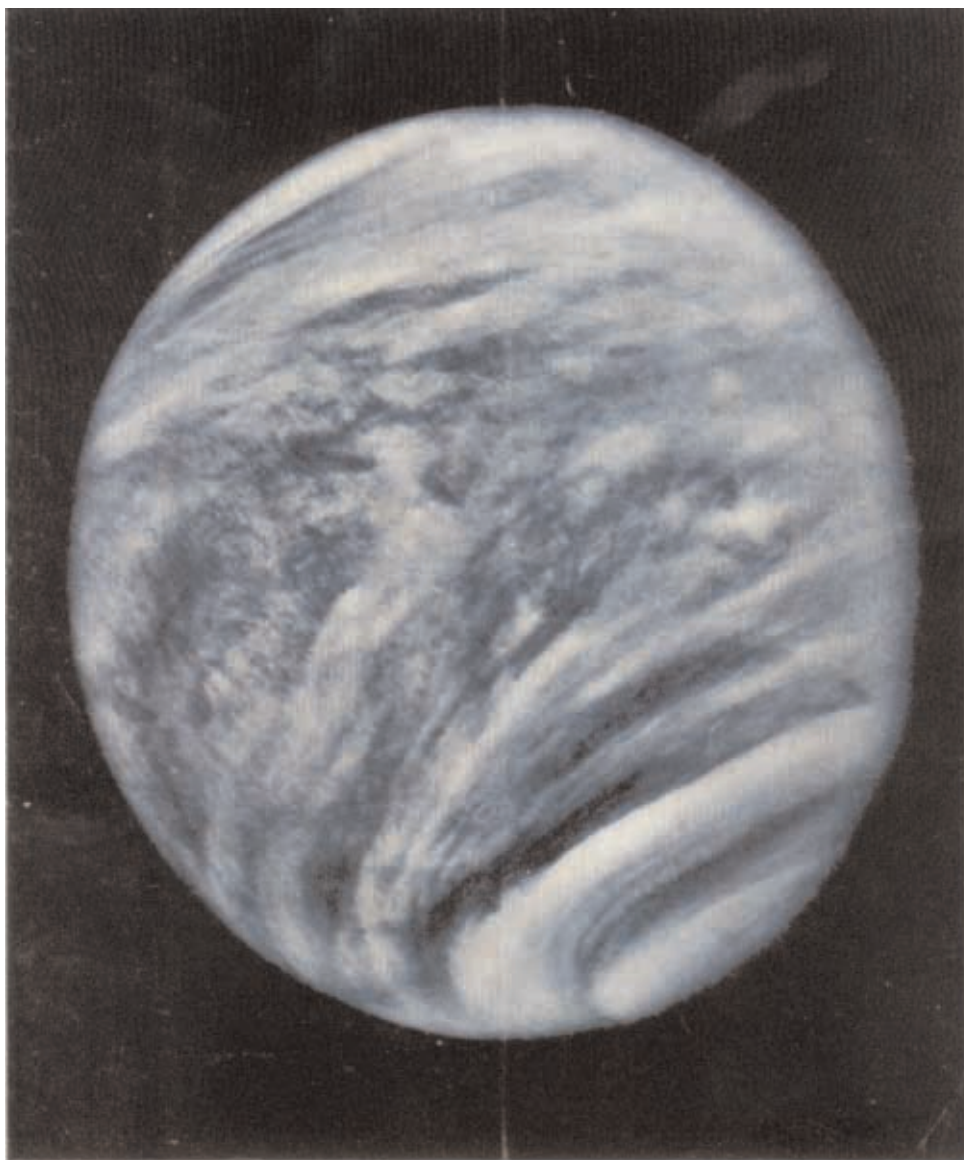
Ha azonban a fenti elmélet igaz lenne, akkor a ^{129}Xe -nak is kevesebbnek kellene lennie a nehezebb izotópokhoz viszonyítva, mint a Földön, ugyanazon mechanizmus alapján, és több xenont kellett volna találni, mint kriptont, de ennek a fordítottját mérték. Más magyarázat kell tehát. A Mars eredeti légköre *nem a földivel volt azonos!* A szén tartalmú kondritokban a $^{129}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$ arány 4.5—9.6 között van a földi 0.97-el ellentétben (A Marsé 2.5). A Mars a kisbolygó övezet és a Föld között kering; primordiális légköre lehet, hogy a kondritokéhoz állt közelebb, és akkor a $^{129}\text{Xe}/^{132}\text{Xe} = 2.5$ a primordiálishoz képest ismét a szelektív megszökés mellett szól. A földi Xe kevesebb, mint a kripton, a Marson is kevesebb. A Földön a xenont a *regolit* és az *agyagpala* megkötötte. A kondritokban több a Xe. Lehet, hogy a Marson is az agyagpala és a regolit kötötte meg a xenont a bolygó folyékony eróziója idején?

Rengeteg kérdés maradt még megválaszolatlanul, de reméljük, hogy a közeljövő űrszondáinak mérései még jobban „előhívják” a homályos képrészeket.



IV. kép. Hajnali pára a Noctis Labyrinthus felett a Marson.





III. kép. A Vénusz felhői erős szuperrotációra utaló képet mutatnak.

- ← I. kép. Porvihar a Marson. A Vikíng-2 Orbírer felvétele.
- ← II. kép. A déli pólus hóval fedett környéke a Marson. A vörös elszíneződést a levegőben levő por okozza. Fehérnek csak a sűrűbb rétegek fölé emelkedő hegycsúcsok látszanak.



V. kép. A Föld felhői
nyelvi szuperrotációja
utaló képet mutatnak.

Illés Erzsébet: A Föld-típusú bolygók légköre

Csillagászati Évkönyv 1978, 150-172. old.

Online: Oktatási segédanyagként.

ELTE TTK Planetológiai Kör – <http://planetologia.elte.hu>

Digitalizálás: MTA Konkoly-Thege Miklós

Csillagászati Kutatóintézet

