

A marsi űridőjárás

SZAKDOLGOZAT
FÖLDTUDOMÁNYI ALAPSZAK
METEOROLÓGUS SZAKIRÁNY



Készítette:

Szabó Klaudia

Témavezető:

Dr. Opitz Andrea

MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont

Belső konzulens:

Soósné Dr. Dezső Zsuzsanna

ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz- és Földtudományi Intézet
Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2016

Tartalomjegyzék

1	Bevezetés.....	3
2	A Nap	4
2.1	A Nap felépítése.....	5
2.2	Napfoltok	7
2.3	Flerek	8
2.4	CME – Korona anyagkidobódás	9
3	A helioszféra	10
3.1	A helioszféra mágneses terének szerkezete	10
3.1.1	A Parker spirál	10
3.1.2	Helioszférikus áramlepel	11
4	Napszél.....	13
4.1	A napszél mérése	17
4.1.1	STEREO napszonda	17
4.1.2	MAVEN marskutató szonda.....	19
5	A Mars.....	22
5.1	A Mars légköre	22
5.2	A légkör vertikális szerkezete.....	23
5.3	Felhők	24
5.4	Porvihar.....	25
5.5	Évszakok.....	26
5.6	Éghajlati övezetek.....	26
5.7	Éghajlati kilengések.....	27
5.8	Ionosféra.....	29
5.9	Mars mágneses tere.....	30
6	A Mars úridőjárása	30
6.1	A Mars plazmakörnyezete	30
6.2	Az úridőjárás hatása a Mars plazmakörnyezetére.....	31
7	Összefoglalás.....	32
8	Köszönetnyilvánítás	33
9	Irodalomjegyzék.....	34

1 Bevezetés

Napjainkban az űrtechnológia használata a mindennapi életünk részévé vált. Ezáltal az űridőjárás tanulmányozása és előrejelzése fontos lett, mivel a napkitörések zavarhatják a műholdak és űrszondák működését, valamint a rádiós kommunikációt.

Dolgozatomban egy olyan bolygót választottam, melynek nincs a Földhöz hasonló, kiterjedt mágneses tere. Célom, hogy megvizsgáljam, ebben az esetben mi történik a bolygó és a napszél kölcsönhatásakor. Ehhez először bemutatom röviden a Nap fontosabb tulajdonságait és felépítését, továbbá a naptevékenységhez kapcsolódó jelenségeket (napfolt, fler, napkitörés). Majd bevezetem az űridőjáráshoz kapcsolódó fontosabb fogalmakat. Dolgozatom második részében bemutatom a Mars légkörét és éghajlatát, valamint plazmakörnyezetének napszéllel való kölcsönhatását.

Az űridőjárás a Napból származó töltött részecskék áramlásával, és ezen áramlás égitestekkel való kölcsönhatásával foglalkozik. A napszél hatással lehet az űreszközök teljesítményére, az űrhajósok munkájára és a Földön telepített technikai eszközök működésére is. Az űridőjárás tárgykörébe tartozik a naptevékenység tanulmányozása is. Az elnevezés a földi időjárás analógiájára történt, mivel a cél itt is a környezet megfigyelése és a változások, extrém események előrejelzése (*Sánchez Díaz et al., 2013*).

Miért fontos számunkra a Nap vizsgálata?

- A Nap a földi élethez szükséges energia forrása. A Nap elektromágneses sugárzása melegíti a szárazföldeket, az óceánokat, illetve némileg az alsó légkört. Ez a sugárzási energia a hajtómotorja a légköri mozgásoknak, jelentős hatással van a földi időjárásra (*Sánchez Díaz et al., 2013*).
- Az extrém űridőjárási események hatással lehetnek a műholdakra és megrövidíthetik egy-egy űreszköz élettartamát. A nagy sugárzás fizikailag károsíthatja a műholdakat, veszélyt jelent az űrhajósokra. Ha eléri a Föld magnetoszféráját, azzal kölcsönhatásba lépve az elektromos hálózatokban áramingadozásokat okozhat, amely anyagilag káros következményekkel járhat, akár még nagy területeken is előidézhet áramszünetet. Ahogy egyre inkább függünk a műholdaktól, érezni fogjuk az űridőjárás hatását és előrejelzésének szükségét (*Sánchez Díaz et al., 2013*).

- A Nap a bolygónkhoz legközelebbi csillag, ennek következtében ezt a csillagot tanulmányozhatjuk a legrészletesebben. Számos fizikai folyamat, amely a Világegyetem más részén előfordul megvizsgálható a Napon. Ennek segítségével többet tudhatunk meg más csillagokról is, emellett bolygórendszerekről, galaxisokról és magáról a Világegyetemről [1 - solarscience.msfc.nasa.gov].
- A Nap energiáját magfúzióval termeli. A Földön hasonló energiatermelési módot akarnak kidolgozni (fúziós reaktort), mivel ez az eljárás környezetkímélőbb és biztonságosabb, mint a hagyományos atomerőműveknél alkalmazott [1 - solarscience.msfc.nasa.gov].

2 A Nap

A Nap főszorozatbeli csillag (G2V színképtípusú), a Naprendszer központi égiteste. A Naprendszer anyagának 99,8%-át a Nap tartalmazza. Plazma halmazállapotú, a Nap konvektív zónájában a mozgó anyagra ható Coriolis-erő (heliografikus szélességtől függ) miatt a konvektív zóna és a fotoszféra anyaga folyadék-jellegű mozgást mutat (Király, személyes kommunikáció). A folyadékszerű viselkedés következménye a differenciális rotáció, amely szerint csillagunk felszíne különböző heliografikus szélességeken eltérő sebességgel forog. Az egyenlítői területek forgási ideje kb. 26 nap, míg a sarki területek kb. 37 naponként fordulnak körbe (*Kereszturi és Tepliczky, 1996*). A Nap átlagos tengely körüli forgásának ideje 27,27 nap, ezt nevezik Carrington rotációnak. A Napon megfigyelhető jelenségek a differenciális rotációhoz kapcsolhatók, a szélesség szerinti eltérő forgási sebességek miatt erős mágneses zavarok léphetnek fel, melyek napfoltok kialakulásához, napkitörésekhez vezethetnek.

A Nap legfontosabb adatai: [2 - astro.u-szeged.hu]

Kor: $4,57 \cdot 10^9$ év

Tömeg: $1,98 \cdot 10^{30}$ kg

Sugár: $6,96 \cdot 10^5$ km

Felszíni hőmérséklet: 5770 K

Közepes Nap- Föld távolság: $150 \cdot 10^6$ km

Tömegvesztés: 10^9 kg/s

Kémiai összetétel: (tömeg % szerint)

- Felszíni:
Hidrogén: 70%
Hélium: 28%
Egyéb (nitrogén, oxigén, szén, vas): 2%
- Központi:
Hidrogén: 35%
Hélium: 63%
Egyéb: 2%

A Nap belsejében zajló magfúziós folyamatok során a hidrogén folyamatosan héliummá alakul át, ezért a központi régiókban a hélium nagyobb százalékban van jelen.

2.1 A Nap felépítése

A Földdel ellentétben a Nap plazma halmazállapotú, ezért nincs szilárd felszíne. A plazma hőmérséklete és sűrűsége a magtól a külsőbb régiók felé haladva drasztikusan változik.

- Mag: A rendkívül sűrű mag a Nap sugarának körülbelül egynegyedéig terjedő tartomány, ugyanakkor a Nap tömegének fele itt található. A mag hőmérséklete elég magas, több mint 15 millió K. A mag a Nap energiatermelésének forrása, ugyanis itt zajlik a termonukleáris reakció, melynek során négy hidrogénatom egyesül egy héliumatommá, miközben energia szabadul fel (*Kálmán, 2004*).
- Sugárzási zóna: Itt már nincs energiatermelés, hanem a magban termelődött energia sugárzással továbbítódik a külső régiók felé, az elnevezés is innen ered. A hőmérséklet és a sűrűség kifelé haladva folyamatosan csökken, az alsó határon 7 millió K, míg a felső határon 2 millió K. A sűrűség ennél drasztikusabban csökken [*3 - solarscience.msfc.nasa.gov*].
- Konvekciós zóna: Ebben a tartományban a hőmérséklet már nem elég magas ahhoz, hogy az energia sugárzás formájában terjedjen tovább. A

gázok csak részlegesen ionizáltak, melyek a sugárzás egy részét elnyelik. Itt az energiaátadás konvekció formájában történik. A melegebb anyag a sugárzási zóna tetején felemelkedik, és a hűvösebb anyag lesüllyed. Ahogy a forró anyag eléri a konvekciós zóna tetejét lehűl, a hő formájában szállított energiát szétsugározza a környezetnek, majd lesüllyed, közben újra átmelegszik és megint emelkedni fog. Az energiatranszport sokkal gyorsabb, mintha csak a Napban jellemző anyagsűrűség mellett fellépő sugárzással terjedne [4 - solar.physics.montana.edu]. A differenciális rotáció ebben a zónában jelenik meg, ugyanis itt az anyag már nem szilárd testként viselkedik a csökkenő sűrűség miatt. Emiatt a felső zónahatáron és a mélyebben levő anyag különböző sebességgel fordul körbe [5 - astro.u-szeged.hu].

- Fotoszféra: A konvekciós zóna feletti réteg a fotoszféra, a Nap látható, fényes felszíne. A hőmérséklet a fotoszférában még alacsonyabb, mint a konvekciós zónában, és a gáz sűrűsége meglehetősen kicsi. A fotoszféra alsó határán a hőmérséklet 6420 K, felső határán 4170 K. Az 5770 K felszíni hőmérséklet átlagérték. A fotoszféra szemcsés, márványos szerkezetét granulációnak nevezzük, amelyet a konvekciós zónában feláramló, majd lesüllyedő gáz hoz létre. Egy granula átlagosan 1000 km átmérőjű, belsejében 1-2 km/s-os sebességgel áramlik az anyag. A feláramló tartomány világosabb, mivel melegebb a környezeténél. A külső, sötétebb részen a hideg anyag visszaáramlik (Kálmán, 2004).
- Kromoszféra: A fotoszféra feletti kb. 10.000 km vastag réteg a kromoszféra. A kromoszférában az energia sugárzás formájában szállítódik. A hidrogénatomok elnyelik a fotoszféra energiáját, majd az energia legnagyobb részét vörös fényként sugározzák ki. Teljes napfogyatkozások alkalmával vékony vörös réteggént látható. A kromoszférában a hőmérséklet felfelé haladva ismét növekedni kezd, ennek a tartománynak az átlagos hőmérséklete 10.000 K. A sűrűség a hőmérséklettel ellentétben tovább csökken. A kromoszféra felett a kb. 100 km vastag átmeneti zónában a hőmérséklet ugrásszerűen 1 millió K fölé nő (Kálmán, 2004).

- Korona: A Nap külső rétege. A hőmérséklet 1-2 millió K. A korona magánál a Napnál sokkal kiterjedtebb, éles külső határa nem állapítható meg, mivel fokozatosan megy át a bolygóközi térbe. Magas hőmérsékletének következtében a koronában a részecskék eléri a szökési sebességet, ezért a napkorona anyaga gyorsan áramlik kifelé. Ezt az áramlást nevezzük napszélnek (*Kálmán, 2004*).

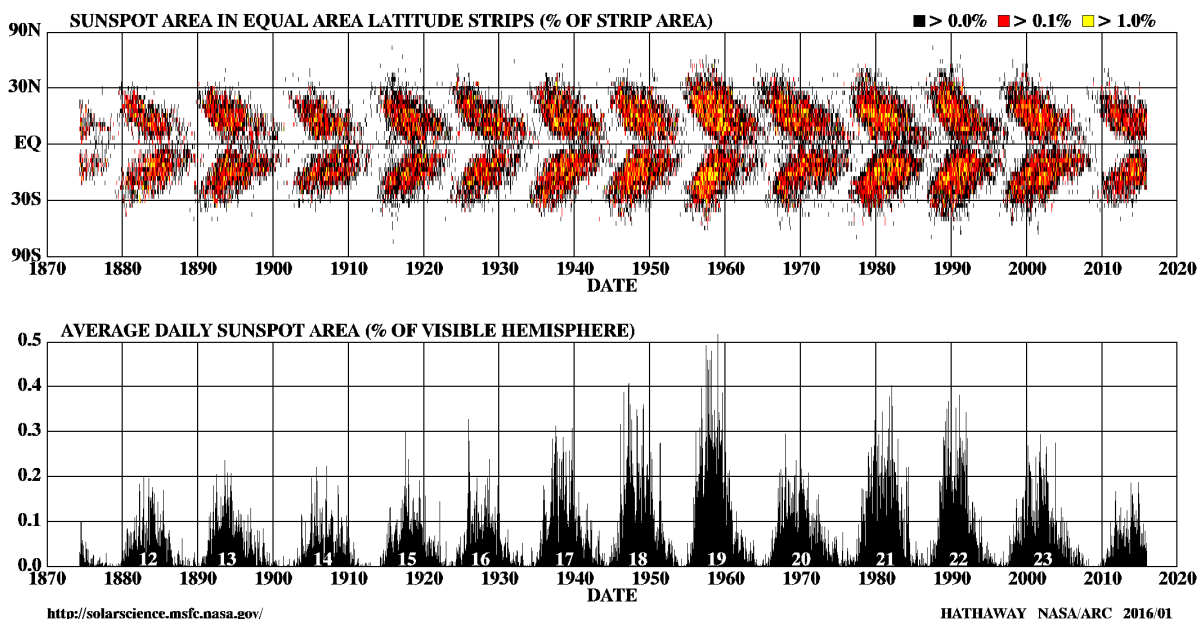
2.2 Napfoltok

A napfoltok a fotoszféra hűvösebb, sötétebb területei, amelyek néhány napig vagy hónapig láthatóak. Hőmérsékletük kb. 3800 K, ezért is látszanak sötétebbnek, mivel a körülötte lévő fotoszféra hőmérséklete sokkal magasabb náluk és ezért intenzívebben sugároz [6 - *space.com*]. Az erős mágneses tér meggátolja a konvekciót, a Napban termelődő energia szállítását, ezért hűvösebbek a napfoltok a fotoszférához képest.

A napfoltok általában párban jelennek meg, a pár tagjai ellentétes mágneses polaritásúak, és gyakran több kisebb foltból áll az egyik és másik polaritású vidék. A napfoltok száma és ezzel együtt a napaktivitás körülbelül 11 éves ciklus szerint változik. A napfoltok két részből állnak: a központi umbrából, ami a legsötétebb rész, és a központi részt körülvevő penumbrából, ami a világosabb, szálas szerkezetű rész. A két rész fényességének különbségeért a hőmérséklet változása a felelős, a napfolt hidegebb a fotoszféra többi részéhez képest, így a központi umbra a leghidegebb része a napfoltnak, ezért sötétebbnek látjuk [5 - *astro.u-szeged.hu*].

A napfolttevékenység ciklusa kb. 11 év. A napaktivitási maximumkor látható a legtöbb napfolt a fotoszférán, napaktivitási minimumkor pedig a legkevesebb. A ciklus elején a napfoltok először a magasabb szélességi körökön jelennek meg, majd a ciklus előrehaladtával a Nap egyenlítőjéhez közeledve fordulnak elő. A napfoltok térbeli eloszlását ábrázoló diagramot pillangódiagramnak nevezzük (1. ábra). Két szomszédos ciklus napfoltjai megkülönböztethetők mágneses mezejük iránya alapján is, mivel a Nap mágneses tere ciklusonként átfordul (*Kereszturi és Tepliczky, 1996*).

DAILY SUNSPOT AREA AVERAGED OVER INDIVIDUAL SOLAR ROTATIONS



1. ábra: felső ábrán a napfoltok szélesség szerinti eloszlása, az alsó ábrán az átlagos napi napfoltterület látható [7 - *solarscience.msfc.nasa.gov*].

2.3 Flerek

A fler rövid életű, heves kifényesedésként definiálható a fotoszférában. A flerek a napfoltok körüli aktív régiókban fordulnak elő, ahol az erős mágneses tér áthatol a fotoszférán, hogy összekapcsolja a koronát a Nap belsejével. A flereket a hirtelen mágneses energia felszabadulás hajtja, amely felhalmozódott a koronában. Ugyanez az energia felszabadulás okozhat korona anyagkidobódást (Coronal Mass Ejection - CME), bár a pontos kapcsolat a CME-k és a flerek között még nem tisztázott. Ahogyan az energia felszabadul a részecskék (köztük elektronok, protonok és nehezebb ionok) a Nap atmoszférájában felhevülnek és felgyorsulnak (Solar Energetic Particles – SEP). A kibocsátott sugárzás az elektromágneses spektrum minden hullámhosszán jelentkezik, a rádióhullámoktól a gamma sugarakig, bár az energia legnagyobb része a látható tartománynál nagyobb frekvenciákon terjed (röntgen és extrém ultraibolya), emiatt a legtöbb fler szabad szemmel nem látható, hanem speciális eszközökkel lehet csak megfigyelni.

Egy-egy flernél az energia felszabadulás mértéke másodpercenként közelítőleg 10^{20} J. Egy fler belsejében a hőmérséklet általában eléri a 10-20 millió K-t, meghaladhatja a Nap belső hőmérsékletét.

A flerek gyakorisága egybeesik a Nap 11 éves ciklusával. A napciklus minimumánál, amikor az aktív régiók kicsik és ritkák, akkor kevés fler észlelhető. Számuk növekszik, ahogy a Nap eléri ciklusának maximumát [8 - hesperia.gsfc.nasa.gov].

Tanulmányozásuk fontossága:

- A flerek a Naprendszer legerőteljesebb robbanásai. Röntgensugárzásuk (fénysebességgel terjed, így pár percen belül a bolygókhoz ér) és a szoláris nagyenergiájú részecskék (pár óra alatt érnek oda) gerjesztik a bolygók ionoszféráját.
- A flerek nagyenergiájú, felgyorsult részecskéi a bolygóközi térbe jutva veszélyt jelentenek az űrhajósokra, illetve az elektronikus eszközökre. Ez a sugárzás okozta veszély komoly problémát jelent a Marsra tervezett emberes küldetés számára.
- Hasonló energiakibocsátási folyamatok zajlanak más kozmikus eseményeknél is. Viszont ezek az események túl messze vannak, ahhoz hogy tanulmányozhassuk őket, ezért a flerek megértése segíthet ezen események megfejtésében.

[9 - hesperia.gsfc.nasa.gov]

2.4 CME – Korona anyagkidobódás

A korona anyagkidobódás (Coronal Mass Ejection – CME) nagyméretű, ballonalakú kitörés, a napkorona egy darabjának kilökődése [10 - helios.gsfc.nasa.gov], amely a Nap mágneses mezejében bekövetkező óriási változásokkal és zavarokkal van kapcsolatban. A legtöbb korona anyagkidobódás a Nap felszínének aktív területeiről származik. Ezeknek a területeknek zártak a mágneses erővonalai, amelyben a mágneses térerősség elég nagy ahhoz, hogy visszatartsa a plazmát. A kidobódáshoz ezeknek az erővonalaknak kell felszakadniuk és átkötődniük. A CME nyugodt területről is indulhat, bár a legtöbb esetben ez a nyugodt régió nemrég aktív volt.

Egy-egy CME alkalmával nagy mennyiségű anyag és elektromágneses sugárzás távozik a Napból a bolygóközi térbe (bolygóközi CME / Interplanetary CME). A kilövellt anyag plazma, amely elsősorban elektronokból és protonokból áll. Míg a flerek részecskéi

nagyon gyorsak, addig a CME-k jelentős része lassabb, sebességük jellemzően 300 km/s. A lassabb korona anyagkidobódásoké 100 km/s, de egyes CME-k sebessége elérheti akár a 3000 km/s-ot is. Azon korona anyagkidobódások, amelyek gyorsabbak a napszél plazmájának terjedési sebességénél lökeshullámot keltenek, amelyek az előttük levő töltött részecskéket felgyorsítják, ezzel részecske záport keltve [11 - *swpc.noaa.gov*]. Amikor a kidobódás Föld irányú és el is éri azt, akkor a nagy energiájú részecskék lökeshulláma geomágneses vihart okoz, ami megzavarhatja a Föld magnetoszféráját.

A CME-k mérete, sebessége, iránya és sűrűsége fontos paraméterek ahhoz, hogy előre jelezzük, hatással lesznek-e a vizsgált bolygóra, és ha igen mikor. Ezeket a paramétereket koronagráffal végzett megfigyelések segítségével tudjuk közelítőleg megbecsülni, amely blokkolja a napkorong erős fényét, ezzel elősegítve a kromoszféra és a korona megfigyelését. A CME-k fényes plazma felhőkként jelennek meg, ahogy haladnak kifelé a bolygóközi térbe [11 - *swpc.noaa.gov*].

3 A helioszféra

A helioszféra az a térrész, amelyet a napszél anyaga tölt ki, a Plútó pályáján túl is messzebbre terjed. Mérete irányfüggő, de legkisebb kiterjedése is legalább 100 AU-ra (csillagászati egység, $1\text{AU} \approx 150$ millió km) tehető. Mind méretét, mind alakját a napszél nyomása és az áramló csillagközi anyag dinamikus nyomása közti egyensúly határozza meg. A csillagközi anyag és a Nap plazmája közti érintkezési felület a heliopauza (*Forsyth, 2002*).

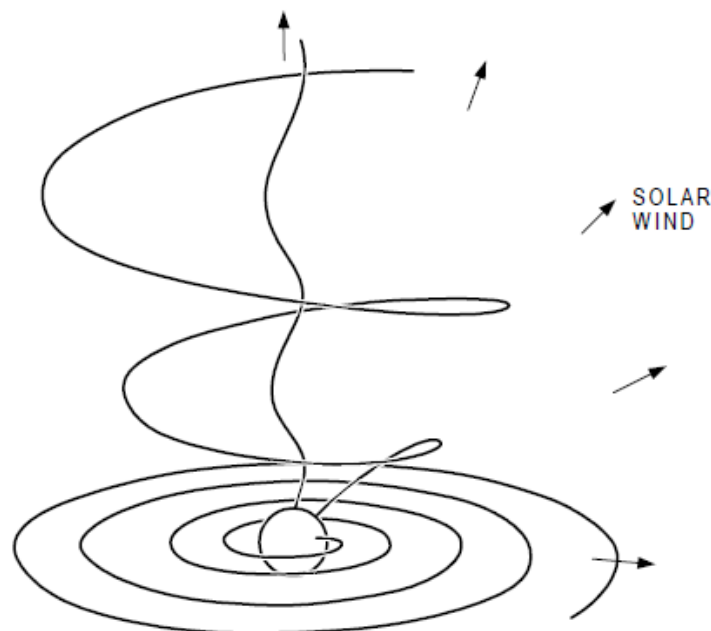
3.1 A helioszféra mágneses terének szerkezete

3.1.1 A Parker spirál

Parker 1958-ban dolgozta ki a legegyszerűbb modellt, amely leírja a mágneses teret, ugyancsak ekkor született a napszéllel kapcsolatos megoldása is. A napszél plazma radiálisan terjed kifelé és viszi magával a befagyott mágneses teret. A Nap forgásának következtében a bolygóközi mágneses tér (Interplanetary Magnetic Field – IMF) erővonalai spirál alakkal közelíthetők, mint ahogy azt a 2. ábra mutatja.

A Parker modell számos egyszerűsítő feltételezésen alapul. Figyelman kívül hagyja, hogy miként változik a mágneses tér a napkoronában, emellett csak a Naptól egy bizonyos távolságban érvényes a modell, ahol a mágneses erővonalak várhatóan sugárirányúak. Továbbá feltételezi a modell, hogy a napszél plazmájának sebessége nem változik a Naptól való távolsággal.

A spirál nyílásszöge függ a Naptól való távolságtól és a szélességi körtől, valamint a napszélesebbségtől. A 2. ábrán látható, hogy ahogy távolodunk az egyenlítőtől, a szélességi köröktől függően az erővonalak egyre lazábban vannak feltekeredve, míg pontosan a pólusból származó erővonal tisztán radiális marad. Műholdak mérései megerősítették, hogy ez a leegyszerűsített modell általában jó közelítéssel teljesül (Forsyth, 2002).



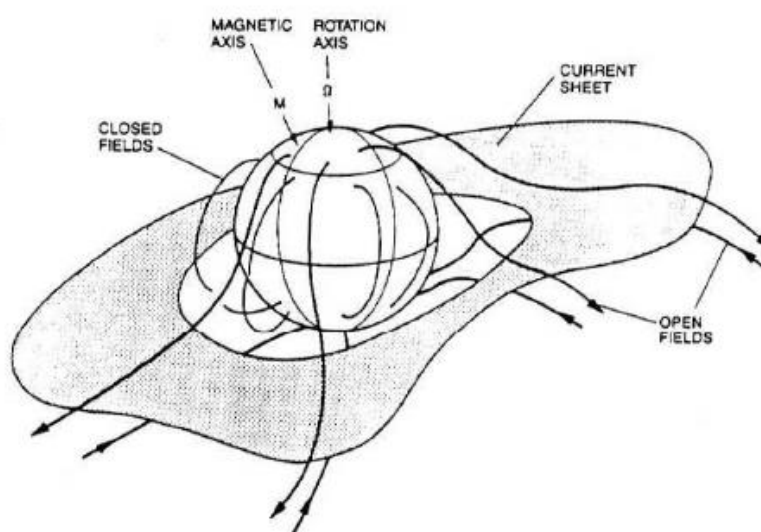
2. ábra: Parker spirál (Forsyth, 2002)

3.1.2 Helioszférikus áramlepel

A napkoronában a mágneses mezővel kapcsolatos erők eleinte dominálják a plazmamozgások által keltett erőket. Azok az erővonalak, amelyek elérnek egy bizonyos távolságot, anélkül, hogy visszazáródnának, a napszéllel szállítódnak tovább a bolygóközi térbe. Napaktivitási minimumkor a Nap mágneses terét egy egyszerű mágneses dipólussal

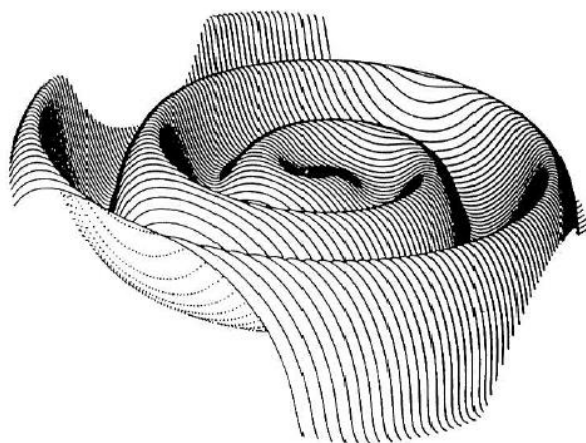
közelítjük. Ennek ellenére, a Zeeman spektroszkópiával megfigyelt fotoszféra egy nagyon bonyolult mágneses mintázatot mutat.

A 3. ábra mutatja, hogy a dipólus erővonalai az egyenlítő területén zártak. Azonban, azokat az erővonalakat, amelyek a felsőbb szélességekről származnak, a napszél magával viszi. Az egyenlítő közelében van egy sáv, ahol az északi és a déli féltekéről származó, ellenkező irányú erővonalak vannak. Ezen a helyen áramlepel keletkezik, ezt nevezik helioszférikus áramlepelnek. Ez a lepel egészen a helioszféra széléig terjed. Határt képez a helioszférában, ami elválasztja egymástól a két mágneses féltekét.



3. ábra: A Nap és erővonalai, valamint a helioszférikus áramlepel (Forsyth, 2002)

Az áramlepel a Nappal együtt forog, ahogy a mágneses tengely dőlése változik a forgástengelyhez képest, úgy az áramlepel is dől vele együtt (Forsyth, 2002). A 4. ábrán látható az áramlepel formája. Sokszor ezt nevezik a balerina szoknya modellnek. A valóságban azonban az áramlepel nem teljesen lapos, gyakran gyűrődések figyelhetők meg benne. Ez bonyolítja a mágneses mező polaritásának mintázatát. Az Ulysses űrszonda missziója során bebizonyította, hogy ha egy űrszonda magasabb heliografikus szélesség fölé emelkedik, mint ahogy az áramlepel dőlt, akkor csak egy polaritás figyelhető meg, tehát az űreszköz folyamatosan csak az egyik mágneses féltekén marad (Forsyth, 2002).



4. ábra: A helioszférikus áramlepel – avagy balerinaszoknya (*Forsyth, 2002*)

4 Napszél

A napszél nagyenergiájú töltött részecskék árama, melyek a Nap felső légköréből származnak. Főként protonokból (95%), alfa részecskékből (4%) és más ionokból (1%) áll, melyek közül a szén, nitrogén, oxigén, neon, magnézium, szilícium és vas fordul elő a legnagyobb mennyiségben (*Ogilvie and Coplan, 1995*). A napszél sűrűsége, hőmérséklete és sebessége időtől és a heliocentrikus távolságtól függően változik.

A napkorona vagy a kiterjedtebb külső réteg plazmája több millió K fokos. A termikus ütközések eredményeként a belső korona részecskéinek sebesség eloszlása maxwelli eloszlást követ.

A napszél részecskék energiája meghatározható a sebességük ismeretében az

$$E = \frac{1}{2}mv^2$$

egyenletből, ahol E a részecskék energiája (J), m a részecskék tömege (kg) és v a sebességük (m/s).

1. táblázat: Az elektron és proton energiája a sebesség függvényében

Sebesség (km/s)	Elektron energia (eV)	Proton energia (eV)
300	$2,5 \cdot 10^{-1}$	$4,7 \cdot 10^2$
400	$4,5 \cdot 10^{-1}$	$8,4 \cdot 10^2$
500	$7,0 \cdot 10^{-1}$	$1,3 \cdot 10^3$
600	$1,0 \cdot 10^0$	$1,9 \cdot 10^3$
700	$1,4 \cdot 10^0$	$2,6 \cdot 10^3$
800	$1,8 \cdot 10^0$	$3,3 \cdot 10^3$

Elektron tömege: $9,11 \cdot 10^{-31}$ kg

Proton tömege: $1,67 \cdot 10^{-27}$ kg

1 eV = $1,6 \cdot 10^{-19}$ J

A napszél Marshoz érkezésének becsült átlagos ideje:

Nap – Mars átlagos távolsága: $2,279 \cdot 10^8$ km

A napszél Marshoz érkezésének ideje megbecsülhető a

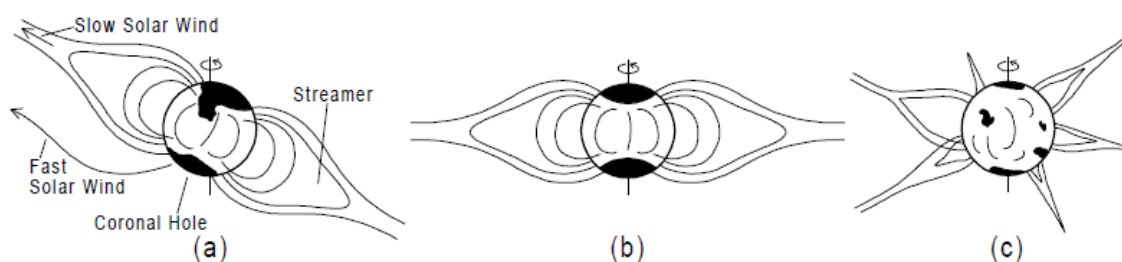
$$t = \frac{s}{v}$$

egyenletből, ahol t a napszél érkezési ideje (másodpercben), s az átlagos Nap – Mars távolság (km-ben) és v a napszél sebessége (km/s-ban).

2. táblázat: A napszél becsült érkezési ideje a Marshoz

Napszél sebesség (km/s)	Becsült érkezési idő (nap)
300	8,8
350	7,5
400	6,6
450	5,9
500	5,3
550	4,8
600	4,4
650	4,1
700	3,8
750	3,5
800	3,3

A napszél a napkorona szuperszonikus tágulásának következménye (*Parker, 1963*). A Nap mágneses mezeje és a kiáramló plazma közti kölcsönhatás szabályozza a tágulást és alakítja a térben változó napszél tulajdonságait. Napaktivitási minimum idején a Nap mágneses tere első közelítésben dipólusnak tekinthető (5. ábra). Mágneses tengelye nem esik egybe a forgási tengelyével, dőlése a 11 éves napaktivitási ciklus szerint változik. A napaktivitási minimumhoz közeledve, a csökkenő fázisban, a tengely dőlése a forgástengelyhez képest nagyobb, mint a napaktivitási minimumban, ahol közel egybeesik a két tengely. Napaktivitási maximumban a Nap mágneses mezeje eléggé összetett, így a dipólközelítés nem használható (*Gosling and Pizzo, 1999*).



5. ábra: A napkorona közelítő mágneses szerkezete (a) a napciklus köztes szakaszaiban, (b) napaktivitási minimumban, (c) napaktivitási maximumban (Forsyth, 2002).

A mágneses egyenlítő közelében, a fotoszféra felett, a mágneses mező nagyrészt transzverzális a radiális irányra és elég erős ahhoz, hogy megakadályozza a plazma kifelé terjedését. A mágneses erővonalak zártak. Nagyobb magasságokban a mágneses mező elég gyenge így ezek az erővonalak kinyílnak a plazma nyomása miatt, és a plazma szabadon tud kifelé tágulni. Ez az áramlás egy viszonylag lassú és sűrű napszelet hoz létre távol a Naptól.

Magasabb szélességeken a korona tágulása a mágneses mezőtől független. Az efféle tágulás alacsony sűrűségű régiókat hoz létre a Nap légkörében, az úgynevezett koronalyukakat, amelyeket nagy sebességű, alacsony sűrűségű áramlás jellemez (Gosling and Pizzo, 1999). Ez a gyors áramlás a korona mágnesesen nyílt területeiről származik (Krieger et al., 1973). A napszélnek létezik egy harmadik típusa is, a tranziens napszél, ilyen a CME (Forsyth, 2002).

A lassú és gyors napszél tulajdonságai (Forsyth, 2002)

Paraméterek 1 AU távolságban	Lassú napszél	Gyors napszél
Sebesség	~400 km/s	~750 km/s
Részecskeszám	~10 cm ⁻³	~3 cm ⁻³
Proton hőmérséklet	~4*10 ⁴ K	~2*10 ⁵ K
Elektron hőmérséklet	~1,3*10 ⁵ K	~10 ⁵ K
Összetétel (He/H arány)	~1-30%	~5%

Ahogy a Nap forog, a különböző sebességű áramlások sugárirányban haladnak kifelé (*Hundhausen, 1977*). A gyors napszél utoléri a lassú napszelet. Annak következtében, hogy a gyors és a lassú napszél különböző mágneses erővonalakat hordoznak, a két áramlás nem tud egymásba hatolni, tehát a gyorsabb áramlás nem tudja megelőzni az előtte levő lassabb áramlást. Ezért, bár az áramlások ütközésmentesek, egy kompressziós tartomány jön létre a gyors áramlás mögött. Ugyanakkor ez a gyors napszél egy másik, mögötte lévő lassú áramlástól viszont távolodik, így egy ritkább tartomány jön létre a gyors napszél végén. A kompresszió elején egy előre terjedő hullám keletkezik a nyomási gradiens miatt, ami a kompressziós terület előtti lassú napszelet gyorsítja. Hasonló okok miatt egy hátrafelé terjedő hullám, úgynevezett fordított hullám is keletkezik a kompressziós tartomány végén, ami lassítja a mögötte levő gyors napszelet. Azt a nagy nyomású területet, melyet ez a két hullám határol korrotációs kölcsönhatási tartománynak (CIR) nevezünk. A kialakuló nagy nyomás, mind a plazma nyomásának és a mágneses tér nyomásának kombinációja (*Forsyth, 2002*).

4.1 A napszél mérése

4.1.1 STEREO napszonda

A STEREO (Solar Terrestrial Relations Observatory) a Nap megfigyelésére 2006-ban indított műholdpár. Az egyik műholdat (A) a Földdel megegyező pályára, bolygónk keringési irányát tekintve a Föld elé, míg a másikat (B) mögé helyezték el, amely lehetővé teszi, hogy két pontból figyeljük meg a Napot és környezetét. Ennek előnye, hogy így három dimenzióban tanulmányozhatjuk a helioszféra térszerkezetét. A látómező egészen a Földig terjed, így a korona anyagkidobódásokat nyomon követhetjük a Nap felszínétől a Földig való megérkezésig.

Műszerei:

- SECCHI (Sun Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation):
Öt kamerát tartalmazó műszer, egy extrém ultraibolya, két koronagráf és két helioszférikus képalkotó. Az első három teleszkóp a napkorongot, a belső és külső nap koronát figyeli, míg az utolsó kettő a Nap és a Föld közötti területet nézi.
- SWAVES (STEREO/WAVES):
A műszer célja a CME-k előrejelzése, hogy hatással lesznek-e a Földre, és ha igen mikor. Ez rádió antennák segítségével történik.
- IMPACT (In-situ Measurements of Particles and CME Transients):
A napszél és a bolygóközi mágneses tér nagy energiájú részecskéinek három dimenziós eloszlását tanulmányozza.
- PLASTIC (PLAsma and SupraThermal Ion Composition):
Elsődleges in-situ napszélmérő műszer. Protonok, alfa részecskék és nehéz ionok vizsgálatát végzi három dimenzióban.

A PLASTIC műszer egy beléptető rendszerből (Entrance System – ES) és egy repülési idő (TOF) tömeg spektrométerből áll.

Az ES egy elektrosztatikus analízátor, amely szétválasztja az ionokat energia/töltés alapján. A beeső elektromágneses sugárzást el kell nyomnia, amelyet a detektor észlelne, és tévesen figyelembe venne. Ezért a belső felülete fekete és kis fűrészfogak borítják. Az ES három szektorra osztható. A Solar Wind Sector (SWS) S alakú csatornája (S csatorna) lehetővé teszi a napszél protonjainak és alfa részecskéinek három dimenziós eloszlás függvényének meghatározását, ezzel sűrűség, sebesség és termikus sebesség (hőmérséklet) adatokat szolgáltatva minden percben. Az SWS fő csatornája a napszél nehéz ionjainak (pl. C,N,O,Fe) elemi összetételét, kinetikus hőmérsékletét és sebességét méri öt perces felbontással.

Az ES-hez kapcsolódik egy tömeg spektrométer, ezzel pontosan jellemezni lehet a mért ionokat. Az ES beállításából az ion energia/töltés aránya meghatározható. Az ion tömegét az SSD (Solid-State Detectors) által mért energia és a repülési idő alapján határozhatjuk meg, az SSD hatékonysága és a repülési távolság ismeretében. Ezek alapján meghatározható a részecske töltése, illetve sebessége (*Opitz, 2007*).

4.1.2 MAVEN marskutató szonda

A Mars Atmosphere and Volatile Evolution Mission (MAVEN) a NASA által indított misszió, amelynek célja a Mars felső légkörének tanulmányozása. A küldetés vizsgálja a felső légkör természetét, azt hogy a napaktivitás miként járul hozzá a légkörvesztéshez és segít megbecsülni a légköri illó gázok távozásának szerepét az idők folyamán [12 - *nasa.gov*].

A Mars légköre az idők folyamán lassan fogyatkozott, feltételezik, hogy a napszél következtében (*Brecht et al., 2006*). A bolygó több milliárd évvel ezelőtt elvesztette globális mágneses terét. Amint a mágneses mező eltűnt, a légkör ki volt téve a napszél hatásának, ami fokozatosan erodálta azt. A fosszilis mágneses mező, amely az ősi felszínbe fagyott, nem nyújt elegendő védelmet a napszél ellen. A napszél mellett más folyamatok is szerepet játszanak a légkörvesztésben.

A Nap ultraibolya sugárzása a Mars felső légkörét ionizálja. Miután elektromosan töltöttek a részecskék, a napszél által generált elektromos mezők elsodorják őket. Az elektromos mezőt a töltött, elektromosan vezető napszél mozgása kelti a bolygóközi mágneses térben. Kivétel ez alól, amikor az atomok és molekulák a Nap fűtésének segítségével elérik a szökési sebességet, továbbra is elektromosan semlegesek maradnak, de annyira felforrósodnak, hogy megszöknek a Mars gravitációs teréből. Továbbá, a Nap extrém ultraibolya sugárzását a molekulák elnyelhetik, ezáltal az őket alkotó atomjaikra bomlanak és így minden atomnak elegendő energia jut, hogy elérhesse a szökési sebességet.

A nagy bombázási időszak során hatalmas aszteroida becsapódások is elfújhatták a marsi légkör nagy részét, illetve a légköri gázok jelentős része a felszín alatti repedésekbe fagyva (krioszféra) is tárolódhat. Emellett az exoszferikus veszteség bizonyára fontos volt a bolygó életében.

A becsapódások és a napszél együttes hatása járult hozzá a légkörvesztéshez. A mágneses tér védelme nélkül, bármilyen eredetű (például vulkáni kitörések során) a légkörbe kerülő gázt a napszél végül magával ragadhatja.

A MAVEN űrszonda vizsgálja a légkörvesztés ismert módjait, illetve a veszteség változását a napciklus során. Ahogy a légkör csökkent, a bolygó egyre hidegebbé és szárazabbá vált, mivel a légköri vízgőz elillant, a maradék H₂O pedig a hőmérséklet és a nyomás csökkenés miatt megfagyott. A MAVEN segítségével tanulmányozhatjuk, hogy

mennyi víz illant el, hidrogén izotóp arányok mérésével. A Mars légköréből a hidrogén gyorsabban szökik el, mint a deutérium, mivel könnyebb. Ezért a légkör deutériumban egyre gazdagabbá válik. Az űrszonda a mai hidrogén deutérium (H/D) arányt méri, és ezt hasonlítja össze az eredeti H/D aránnyal. Az eredeti arányt üstökösök és aszteroidák H/D arányaival becslik. Összehasonlítva a jelenlegi és az eredeti H/D arányt durván lehet közelíteni, hogy mennyi hidrogén, és ezáltal mennyi víz illant el az idők folyamán. A MAVEN segít meghatározni a légkörvesztés mértékét különböző légköri elemek izotóp arányainak mérésével, mint amilyen például a nitrogén, az oxigén és a szén [13 - *nasa.gov*].

Az űrszondát 2013-ban indították, a Marsot 2014 szeptemberében érte el. Pályáját úgy tervezték, hogy áthaladjon a bolygó felső légkörén, így közvetlenül tud mintát venni, pályája legtávolabbi részén, a felszín felett kb. 6000 km-re, pedig ultraibolya képeket készít a bolygóról. A pálya magasságát a küldetés során csökkentik, így információt tudnak gyűjteni a jól kevert alacsonyabb felső légkörről, ezzel teljes profilt kapunk a felső légkörről [12 - *nasa.gov*].

Műszerek: [14 - *lasp.colorado.edu*]

Az űrszondát három műszer családdal szerelték fel. A PFP (Particles and Fields Package) 6 detektort tartalmaz, melyekkel a napszelet és a bolygó ionoszféráját jellemzik.

A PFP részei:

- Solar Energetic Particle (SEP): A napszél hatását méri a felső légkörben. A mérés céljai: a légkörben jelen lévő Napból származó nagy energiájú részecskék magasság szerinti eloszlásának mérése, a pickup ionok érzékelése, és a nagy energiájú részecskék ionizációjának és szóródásának meghatározása. Megfigyeléseinek segítségével jellemezhetjük a részecskéket azzal az energia tartománnyal, amely hatással van a felső légkör és az ionosféra folyamataira.
- Solar Wind Electron Analyzer (SWEA): A napszélben és az ionoszférában levő elektronokat méri. Továbbá méri a légkörben az elektronok ütközésének ionizációs hatását, az elektronok energia és szög szerinti eloszlását, és a mágneses topológia (pitch angle) szerinti eloszlásának meghatározása is feladata.
- Solar Wind Ion Analyzer (SWIA): Méri a napszél és a mágneses burok (magnetosheath) protonjainak áramlását a Mars körül és vizsgálja a napszél

kölcsönhatásának jellegét a felső légkörrel. A műszer célja továbbá, hogy mérje a napszél energiájának áramlását a marsi magnetoszférán át, illetve, hogy meghatározza a magnetoszféra szerkezetét és változását.

A napszél tulajdonságait és a mágneses burok ionjait, beleértve a sűrűséget, a hőmérsékletet és a sebességet annak érdekében mérik, hogy meghatározzák a marsi felső légkör energia bevitelét, és a bulk plazmaáramlást a napszél sebességekből és a mágneses burok sebességeiből.

- Suprathermal and Thermal Ion Composition (STATIC): A műszer az ionok összetételét és sebességét méri, amely lehetővé teszi számunkra, hogy meghatározzuk a jelenlegi szökési rátát.
- Langmuir Probe and Waves (LPW): A termikus elektron sűrűséget és hőmérsékletet méri, az ionoszféra tulajdonságait és a felső légkör fűtését határozza meg.

Extreme Ultraviolet Monitor (EUV): Az LPW része, méri a Napból érkező extrém ultraibolya sugárzást és változását, és a Mars felső légkörének fűtését.

- Magnetometer (MAG): A bolygóközi napszelet és a Mars mágneses mezejét méri.

A műszer család másik része a Remote Sensing Package, amely a felső légkör és ionoszféra globális jellemzőit határozza meg. Ez a műszer méri a D/H arányt. A Neutral Gas and Ion Mass Spectrometer (NGIMS) a termikus semleges részecskék és az ionok összetételét és izotópjait méri, leírja a felső légkör és az ionoszféra vertikális szerkezetét, illetve változásait a homopauzától az exoszféráig. Feltárja az alacsonyabb légkör hatásait a felső légkör összetételére.

5 A Mars

A Mars a Naptól számított negyedik bolygó a Naprendszerben, nevét Marsról a római hadistenről kapta. Két holdja van, a Deimosz és a Phobosz, mindkettő szabálytalan alakú hold.

A bolygó fontosabb jellemzői: (Kereszturi, 2007)

- Sziderikus keringési idő: 687 nap
- Egyenlítői sugár: 3393 km
- Átlagos naptávolság: ~ 228 millió km
- Forgási idő: 24,62 óra
- Átlagos felszíni légnyomás: 6,1 hPa
- Pálya excentricitása: 0,093
- Tengelyferdeség: 25,19°
- Átlagos albedó: 0,25
- Napállandó a bolygó átlagos naptávolságában: 593 W/m²

5.1 A Mars légköre

Összetevők: (Haberle, 2014)

95,32% szén-dioxid
2,7% nitrogén
1,6% argon
0,13% oxigén
0,07% szén-monoxid
0,03% víz (változó)
0,04-0,2 ppm ózon (változó)

A Mars légköre nagyon ritka, a felszíni légnyomás a földinek csak 1% -a. Ez az érték a pólussapkák évszakos változása miatt 700-900 Pa között változik (Homolya, 2010).

Mivel a Mars messzebb van a Naptól, mint a Föld, ezért kevesebb besugárzás éri, és mivel a pálya excentricitása is nagyobb (0,0934), emiatt a maximális és a minimális besugárzás között az átlaghoz képest nagyobb az eltérés. Az excentricitás miatt a Marson a felszíni

hőmérséklet $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ -kal alacsonyabb naptávol pont környékén, mint napközel pont környékén (Homolya, 2010). A Mars átlagos felszíni hőmérséklete megközelítőleg 215 K . A legalacsonyabb felszíni hőmérséklet télen, a sarkvidékeken fordul elő ($\sim 150\text{ K}$), a legmagasabb hőmérséklet ($\sim 300\text{ K}$) pedig a déli, szubtrópusi területeken jellemző, amikor a Mars napközelben van. A napi hőingás meghaladhatja a 100 K -t. A felszíni sugárzás körülbelül 10-20%-a abszorbeálódik a légkörben. Az elnyelt sugárzás egy része visszasugárzódik a felszínre, így egy gyenge üvegházhatás jön létre (Haberle, 2014).

5.2 A légkör vertikális szerkezete

A légkör vertikális szerkezetét a felszínre leszálló űrszondák ereszkedés közben végzett méréseiből (hőmérséklet, nyomás) ismerjük.

Ahogy azt a 6. ábra mutatja, a hőmérséklet magasság szerinti változása miatt a légkörben három réteg különíthető el: a troposzféra, a mezoszféra és a termoszféra. A Marsnál a sztratoszféra hiányzik, mivel nem rendelkezik ózonréteggel.

A Viking és Pathfinder űrszondák mérései alapján a troposzféra 60 km -es magasságig terjed, a hőmérséklet átlagosan körülbelül $2,5\text{ K}$ -nel csökken kilométerenként.

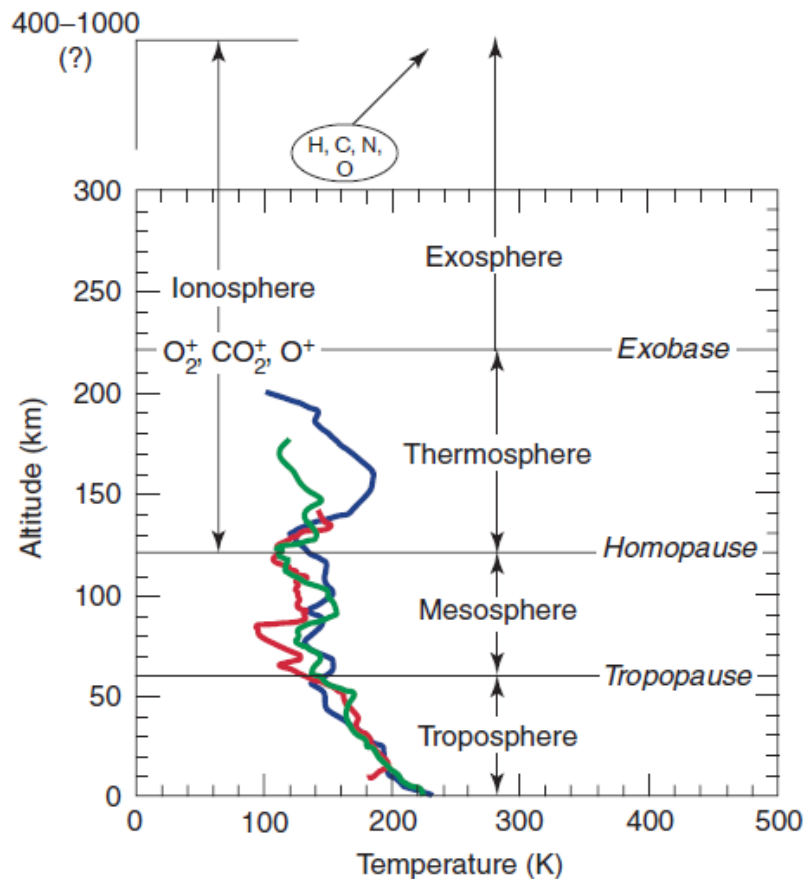
Az alsó légkört melegítő folyamatok:

- A napsugárzás felmelegíti a Mars felszínét, majd a felszín az elnyelt hő egy részét kisugározza, így fokozatosan alulról melegszik fel a légkör.
- A légkör főként szén-dioxidból áll, ami üvegházhatású gáz, ezért akadályozza az infravörös sugarak távozását a világűr felé.
- Másrészt a légkörben levő porszemek a napsugárzást elnyelik, ezáltal melegítik az atmoszférát.

A bolygón megfigyelt hőmérsékleti gradiens kisebb, mint a száraz adiabatikus hőmérsékleti gradiens, az utóbbi a Marson $4,3\text{ K/km}$. Elméleti tanulmányok azt mutatják, hogy a nappali határréteg a Marson nagyon nagy magasságig terjedhet ($\sim 15\text{ km}$). Ezeken a területeken a hőmérsékleti gradiens értéke közel van a száraz adiabatikus értékhez.

A mezoszférában a hőmérsékleti értékek közel állandósulnak.

A termoszférában a hőmérséklet a magassággal emelkedik, ezt a tartományt a Nap extrém ultraibolya sugárzása gerjeszti. A termoszféra határa körülbelül 100 km-es magasságban kezdődik (Haberle, 2014).



6. ábra: A Mars légkörének vertikális szerkezete. A színezett görbék a Viking 1 (kék), a Viking 2 (zöld) és a Pathfinder (piros) hőmérséklet méréseinek eredményét mutatja (Haberle, 2014).

5.3 Felhők

A Mars légkörének összetételét ismerve megkülönböztetünk vízgég és szén-dioxid felhőket, műszeres vizsgálatok szerint a felhők többsége vízgégből áll. A vízgég felhők a földi cirruszokra hasonlítanak, 10-50 km-es magasság között találhatók, kékes- fehéres

színűek (*Bérczi et al., 2002*). A Tharsis- hátság felett egész évben jellemző az erős felhő borítottság. Egyes alacsonyan fekvő területeken, völgyek, kráterek alján, mint például a Hellas- medencében és a Valles Marineris árokrendszerében felszín közeli köd figyelhető meg.

Szén-dioxid kristályokból álló felhőket, ködöket főleg a sarki területeken tapasztaltak. Ilyen köd főként éjszaka és télen keletkezik és körülbelül 15 km magasságig emelkedhet. Ezen kívül 100 km-es magasságban is azonosítottak szén-dioxid felhőket, amelyek napfelkelte előtt és naplemente után válhatnak láthatóvá (*Kereszturi, 2007*).

Különleges típus a hullámfront felhő, amely domborzati akadályok mögött alakul ki. Az akadály miatt felszálló levegő lehűl, páratartalmából felhő képződik, majd túljutva az akadályon leereszkedik, és a felhő szétoszlik. Ez egymás után sok hullámban zajlik, ezzel párhuzamos felhősávokat kialakítva (*Bérczi et al., 2002*). Ilyenek a Földön például a rotorfelhők.

5.4 Porvihar

A Marson állva az égbolt halvány narancsvörösnek vagy rózsaszínűnek látszik. A jelenség azzal magyarázható, hogy az időnként feltámadó heves porviharok során nagy mennyiségű felszíni por kerül a bolygó légkörébe, és csak hónapok múltán ülepedik le. A legkisebb méretű részecskék azonban még akkor is a légkörben lebegve maradnak, és a lebegő poranyagon történő szóródás vörösre festi a színét [*15 - vilaglex.hu*].

A marsi porviharokat a napsugárzás hajtja. A Napból érkező energia felmelegíti a Mars atmoszféráját és a levegőt mozgásra készíti, ezzel port felemelve a talajról. A viharok kialakulásának esélye nő a nagy hőmérséklet-ingadozásnál. A viharok egy része egy becsapódási medencéből származik, a Hellas-medencéből. Ez a Naprendszer legmélyebb becsapódási krátere, több mint 3 milliárd évvel ezelőtt keletkezett a nagy bombázási időszak alatt. A hőmérséklet a kráter alján 10 fokkal melegebb lehet, mint a felszínen és a kráter tele van porral. A hőmérséklet különbség szelet idéz elő, ami magával viszi a port [*16 - universetoday.com*]. A jég és a csupasz felszín határvidékénél hasonló hőmérséklet különbség alakul ki, amely szintén porvihart okozhat (*Kereszturi, személyes kommunikáció*).

A globális porviharok az egész bolygóra kiterjednek, mivel a Marson a légköri cirkuláció egy cellás. Egy-egy vihar akár több hónapra keresztül is eltarthat, a por 60 km-

es magasságig is feljuthat. Porviharok során a légköri portartalom leárnyékolja a felszínt, így a légköri porréteget fűtik fel a napsugarak, ezért ekkor az atmoszféra nem alulról melegszik fel. A porviharok területén több tíz fokkal is megnőhet a hőmérséklet (*Bérczi et al., 2002*).

5.5 Évszakok

Egy bolygó éves hőmérséklet változásaiért két tényező a felelős: az egyik a tengelyferdeség, a másik pedig a Naptól való távolság. A Földön a tengelyferdeség a meghatározó tényező, mivel a Föld pályája közel kör alakú. A Merkúr és a Plútó mellett a Marsnak a legnagyobb az excentricitása a nagybolygók közül. A Nap-Mars távolság egy marsi év alatt 1,64 AU és 1,36 AU között változik [21 – *msss.com*].

A tengelyferdeség és a nagy excentricitás miatt az évszakok nem azonos hosszúságúak, és még a két félteke évszakjai sem egyeznek meg. A Marson, az északi féltekén a tavasz a leghosszabb évszak. Egy marsi év majdnem kétszer olyan hosszú, mint a földi, ezért az évszakok is tovább tartanak. Az északi féltekén a tavasz 7 hónapig, a nyár 6 hónapig, az ős 5,3 hónapig és a tél közel 4 hónapig tart [17 – *universetoday.com*].

5.6 Éghajlati övezetek

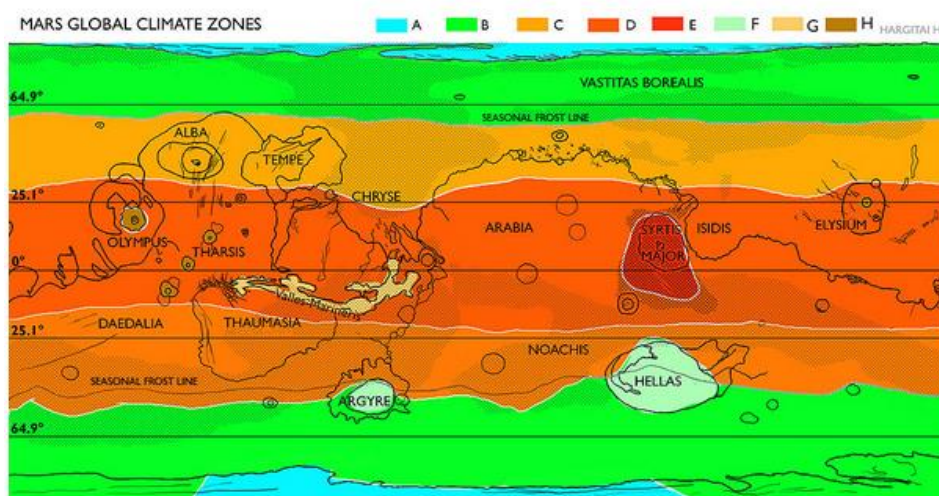
A Köppen éghajlat osztályozási rendszer alapja a növényzet eloszlása. Továbbá az átlagos éves és havi hőmérsékletek, valamint a csapadékösszegek idényszerűségét is figyelembe veszi. A Marson nincs növényzet, sem eső, így bármelyik éghajlati besorolás csak a hőmérséklet alapján lehetséges. A rendszer finomításának alapja lehet a por eloszlása, a vízgőztartalom és hó előfordulása [18 - *planetologia.elte.hu*].

Szoláris éghajlati övek: A hőmérséklet alapú éghajlati övezeteket alapvetően az aktuális tengelyferdeség és a napsugárzás határozza meg, ezért a legegyszerűbb térképek nem veszik figyelembe a domborzatot, az albedót és a légkört. A szoláris éghajlati övezetek északra vagy délre tolódnak, ahogy a termikus egyenlítő vándorol. Az észak–déli évszakai eltéréseket a pálya excentricitása okozza, ami miatt a két féltekén a nyár és a tél eltérő tulajdonságú. Ezért a féltekék éghajlati övei eltérőek. A déli félteke extrémebb, nyáron

melegebb van a napközelség miatt, míg télen hidegebb van a nagyobb naptávolság miatt [18 - planetologia.elte.hu].

A Mars éghajlati övezetei:

A térképen (7. ábra) látható éghajlati övek meghatározása a hőmérséklet, az albedó és a domborzati adatok figyelembe vételével történt, melynél döntő fontosságú az állandó jégsapkák kiterjedése és a maximális szezonális fagyborítás mérete.

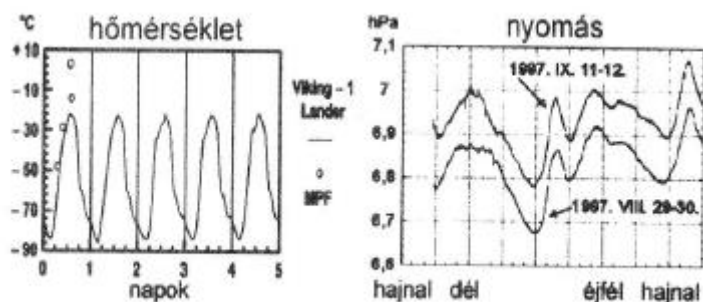


7. ábra: Marsi éghajlati övek [18 - planetologia.elte.hu]

A= Glaciális (állandó jégsapka); B= Poláris (télen fagyborítás, amely nyáron elszublimál); C= Északi átmeneti - enyhe (Ca), Déli átmeneti – extrém (Cb); D= Trópusi; E= Trópusi (alacsony albedó); F= Sarkvidéki alföld (medencék); G= Trópusi alföld; H= Szubtrópusi felvidék (hegységek)

5.7 Éghajlati kilengések

A Marson a hőmérséklet és a légnyomás napi ciklusa szabályosan ismétlődik. A nyomásváltozás egy marsi nap során 10-15% is lehet, viszont a nyomásgörbék lefutása különböző évszakok során is hasonló marad. A globális éghajlat viszont változékonnyabb a ritka légkör, a bolygó forgástengelye és a pálya excentricitása miatt (Bérczi et al., 2002).



8. ábra: A hőmérséklet és légnyomás napi ciklusa a Marson (Bérczi et al., 2002).

A bolygó csak két kisméretű holddal rendelkezik, emellett a Mars tömege közel tizede a Földének, ezért forgástengelye viszonylag labilis helyzetű. Tengelyferdesége periodikusan változik, jelenleg 25,2 fok, viszont modellszámítások alapján időnként a 40 fokot is elérheti, vagy meg is haladhatja. A forgástengely ferdeségének változása a beeső napsugárzás változására is hatással van. Kis tengelyferdeségnél az illók a sarkvidékekre vándorolnak, az alacsony szélességű területek melegednek és szárazodnak. Nagy tengelyferdeség esetén viszont a pólussapkáktól a jég az alacsonyabb szélességekre vándorol. Amikor ismét meredekebb helyzetbe áll a forgástengely, a jég visszavonul a pólusok felé. 40 fok felett nincs stabil állandó pólussapka, 54 fok felett pedig a pólusok több besugárzást kapnak, mint az egyenlítő.

A pólussapkák mérete, térfogata időben változik. Amikor a pólusoknál csökken az éves középhőmérséklet, először a vízjég fagy ki, mivel magasabb az olvadáspontja. A vízjég alkotja a jégsapkák tömegének nagy részét. A szén-dioxid jég csak akkor fagy ki, amikor a hőmérséklet még jobban csökken. Jelenleg az északi póluson csak évszakos szén-dioxid jégfedő van, délen körülbelül 2 m vastag az állandó szén-dioxid jégfedő.

Kis tengelyferdeségnél állandó, kétrétegű pólussapka, nagy tengelyferdeségnél csak vízjég sapka van, viszont még nagyobb tengelyferdeségnél eltűnhet a jég sapka. A bolygó felszínét borító finom porrétegnek fontos szerepe van a hideg időszakokban felhalmozódó jég megőrzésében.

A vulkánok is fontos szerepet játszottak a Mars felszínfejlődésében és éghajlati változásaiban. Nagyobb kitörésekkor a légkörbe került üvegházhatású gázok és por szerepet játszhattak az évi középhőmérséklet kismértékű emelkedésében, illetve a napi és az évszakos hőingás csökkenésében (Kereszturi, 2006).

5.8 Ionosféra

Az ionosféra a felsőléggkör azon része, amelyet a Nap ultraibolya sugárzása ionizál. A marsi ionoszférát befolyásolja a napszél, a Nap extrém ultraibolya és röntgen sugárzása, a töltött részecskék zápora és a mágneses környezet. Az ionosféra térbeli és időbeli változásainak fő oka a napszél kölcsönhatása az inhomogén, lokális kéreg mágneses terekkel. (*Withers et al., 2012*)

A napszél ionoszférával való kölcsönhatása létrehoz egy felső elválasztó határt, amely elválasztja egymástól a marsi eredetű, illetve a Naptól származó elektronokat. Ez a határ általában 400 km-en található, de időtől függően jelentősen változhat (*Withers et al., 2012*). A Mars ionoszférájának réteges szerkezete van, két fő réteggel. A legmagasabb elektron sűrűség körülbelül 140 km-es magasságban található, ahol a Nap extrém ultraibolya sugárzása ionizálja a légkört, ez az M2 réteg. Az elektronsűrűség az M2 réteg felett általában exponenciálisan csökken a magassággal (*Withers et al., 2012*). A második réteg körülbelül 120 km-en helyezkedik el, ezt a Nap röntgen sugárzása (alacsony energiájú) gerjeszti, ez az M1 réteg [*20 - sci.esa.int*].

Az ionosféra tetejének magassága nem állandó. A Mars Express űrszonda mérései azt mutatják, hogy a mérések 25%-nál ez a határ 250 km alatt van, míg a mérések 1%-nál 650 km-nél. A szokatlanul alacsony ionopauza intenzív naptevékenység eredménye. Amíg a szokatlanul magas ionopauzát pedig az erős, közel vízszintes lokális kéreg mágneses terek okozzák, amelyek visszatartják a napszelet. (*Withers et al., 2012*)

Az ionosféra összetétele földrajzi elhelyezkedés szerint változhat. Az atomos oxigén a magasabb szinteken a leggyakoribb, míg a molekuláris oxigén gyökök az alacsonyabb magasságokban jellemzőek.

Az ionosféra feltérképezésére a Mars Express űrszondánál a rádió okkultációs módszert alkalmazták. Eszerint - amikor a Földről nézve az űrszonda eltűnik a bolygó mögött - a rádió jelek, melyeket az űrszonda küld a Földre, áthaladnak a Mars ionoszféráján, ezzel információt szolgáltatnak az elektronsűrűség magasság szerinti változásáról [*20 - sci.esa.int*].

A napsugárzás ionizációja nélkül az ionosféra éjszakai oldala nagyon különbözik a nappali oldaltól. Az elektronsűrűség sokkal alacsonyabb. (*Withers et al., 2012*)

5.9 Mars mágneses tere

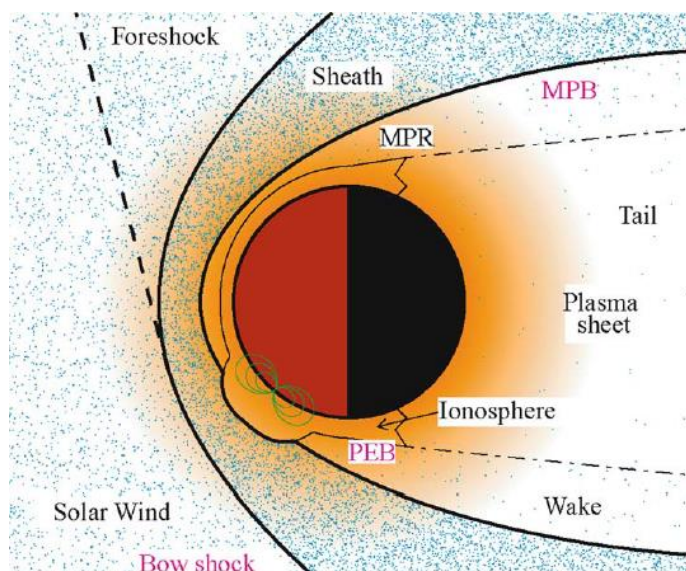
A Földdel ellentétben a Marsnak nincs belső dinamó-mechanizmusa, amely egy kiterjedt mágneses teret hozna létre. A Mars Global Surveyor (MGS) műhold megfigyelései alapján gyűjtött bizonyítékok arra utalnak, hogy egyszer a Mars is működhetett a dinamó-mechanizmus. Az űrszonda 1997-2006 között mérte a bolygó mágneses terét 100-400 km-rel a felszín felett. A mérések relatíve erős (pár száz nT) mágneses területek létére utaltak a kéregben. A kéreg mágnesesség az északi síkságokon, a becsapódásos medencékben és a Tharsis-hátságon nagyon alacsony, viszont délen sokkal magasabb [19 - *planetary.org*]. Ezek a közetbe fagyott mágneses terek helyi, kis magnetoszférákat hoznak létre. Az MGS magnetométerének mérései alapján a mágneses tér bizonyos területeknél eléri az 1600 nT-t, ez kellően erős ahhoz, hogy ellen tartson a napszél nyomásával 400 km-en (*Ma et al., 2008*). A magnetoszféra egyfajta pajzsként szolgál, amely megakadályozza, hogy a töltött részecskék, a napszél elérje a bolygó felszínét a kérdéses területeken (*Connerney et al., 2004*).

6 A Mars űridőjárása

6.1 A Mars plazmakörnyezete

A Marsnak nincs eredendő globális mágneses tere, csak helyenként gyenge kéreg mágneses tere. A Napból érkező ultraibolya sugárzás ionizálja a Mars felső légkörét. Ez egy elektromosan töltött közeg, amelybe a napszél mágneses tere nem hatol be. A napszél körülfolymja a bolygót, így a Mars ionoszférájával kölcsönhatva létrehoz egy indukált magnetoszférát. A Mars előtt kialakul egy lökeshullám, így a plazmaáramlás szubszonikus sebességre lassul [23 – *Szegő: Nem mágneses bolygók magnetoszférája*]. Az MGS mérései alapján ez a távolság kb. $2,33 R_M$ (Mars sugár). Itt az űrszonda nagy energiájú elektronokat és a mágneses térerősség hirtelen növekedését figyelte meg (*Acuna et al., 1998*). A lökeshullám után a következő határ a Magnetic Pileup Boundary (MPB), amely elválasztja egymástól a mágneses burkot és a Magnetic Pileup Region-t (MPR) (9. ábra). Az MPR a bolygó légkörének ionjai által dominált tartomány, ahol a napszél protonjainak sűrűsége

már lecsökken és a mágneses mező rendkívül erős (Nagy *et al.*, 2004). A legbelső határ, amelyet az MGS detektált, a fotoelektron határ (PEB). A PEB magassága korrelál a kéreg mágneses területekkel, melyek főként a déli féltéken találhatók (Bertucci *et al.*, 2005).



9. ábra: A Mars plazmakörnyezete, ahol a narancssárga színezés a bolygó semleges részecskéinek sűrűségét jelzi, a kék pedig a napszél ionjainak sűrűségét a különböző plazma tartományokban. A zöld szín a lokális kéreg mágnesesség erővonalait szemlélteti (Brain, 2006).

6.2 Az űridőjárás hatása a Mars plazmakörnyezetére

A Földnek eredendő erős mágneses tere van, míg a Marsnak gyenge indukált mágneses tere, amely nem véd meg a Napból jövő nagyenergiájú részecskéktől. Ez a különbség nagymértékben befolyásolja a bolygó kölcsönhatását a napszéllel. A napszél változásai (pl. CIR), a napkitörések (CME), a nagyenergiájú részecskék (SEP) jelentősen befolyásolják a bolygó plazmakörnyezetét. Ezek vizsgálata fontos mind a marskutató szondák, mind az esetleges emberes küldetések biztonsága szempontjából. Emellett azért is érdekes lehet a gyengén mágneses bolygók (pl.: Mars, Vénusz) vizsgálata, mert általuk megismerjük azokat a plazma folyamatokat, amelyek akkor fordulnának elő, ha a Föld mágneses tere gyengülne (Trupka, 2015).

Ahogy a Földön, úgy a Marson is megfigyelhető auróra. A Napból érkező nagyenergiájú részecskék ütköznek a bolygó légkörének atomjaival, molekuláival, így gerjesztik azokat. A Földnek van globális mágneses tere, a Marsnak viszont nincs. Így a Napból érkező töltött részecskék pályáját az inhomogén eloszlású, lokális kéreg mágneses terek erővonalai határozzák meg, ezért auróra bármely szélesség felett előfordulhat, nem csak a sarkoknál. Épp ezért a Mars estében nem indokolt a sarki fény elnevezés [22 - *urvilag.hu*]. A marsi légkör főként szén-dioxidból áll, ezért itt az aurórák domináns színe a kék lehet (*Lilensten et al., 2015*). A kék mellett zöld, illetve vörös színű auróra is előfordulhat.

7 Összefoglalás

Az űridőjárás a napszél áramlásával, annak változásaival, illetve a napszél égitestekkel való kölcsönhatásával foglalkozik. A Mars nem rendelkezik globális mágneses térrel, viszont az áramló napszél és a bolygó ionoszférájának kölcsönhatása indukál egy gyenge magnetoszférát, ezáltal a Mars mágneses tere erősen függ a napszélről, illetve az űridőjárástól. Globális mágneses tér hiányában a bolygó légköre ki van téve a napszél hatásának, amely fokozatosan erodálja azt. A lokális kéreg mágneses terek nem nyújtanak elegendő védelmet a nagyenergiájú részecskékkel szemben.

A marsi ionoszféra térbeli és időbeli változásának fő oka a napszél kölcsönhatása a lokális kéreg mágneses terekkel. Intenzív naptevékenység esetén az ionopauza alacsonyan helyezkedik el. Míg a magas ionopauzát az erős, közel vízszintes lokális kéreg mágneses terek okozzák, amelyek visszatartják a napszelet.

8 Köszönetnyilvánítás

Köszönöm témavezetőmnek, Opitz Andreának a szakdolgozat elkészítésében nyújtott segítségét és hasznos tanácsait. Továbbá szeretném megköszönni tanszéki konzulensemnek, Soósné Dezső Zsuzsannának munkám ellenőrzését. Hálás vagyok Kereszturi Ákosnak és Király Péternek, hogy tanácsaikkal segítették szakdolgozatom tökéletesítését.

9 Irodalomjegyzék

Acuna, M.H., Connerney, J.E.P., Wasilewski, P., Lin, R.P., Anderson, K.A., Carlson, C.W., McFadden, J., Curtis, D.W., Mitchell, D., Reme, H., Mazelle, C., Sauvaud, J.A., d’Uston, C., Cros, A., Medale, J.L., Bauer, S.J., Cloutier, P., Mayhew, M., Winterhalter, D., Ness, N.F., 1998: Magnetic field of plasma observations at Mars: Initial results of the Mars Global Surveyor mission, *Science*, volume 279, 1677.

Bertucci, C., Mazelle, C., Acuna, M.H., 2005: Interaction of the solar wind with Mars from Mars Global Surveyor MAG/ER observations, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, volume 67, 1797 – 1808.

Bérczi, Sz., Hargitai, H., Illés, E., Kereszturi, Á., Opitz, A., Sik, A., Weidinger, T., 2002: Kis atlasz a Naprendszeréről (4): Bolygóléggörök atlasza, Uniconstant, Püspökladány

Brain, D.A., 2006: Mars Global Surveyor measurements of the martian solar wind interaction, *Space Science Reviews* 126, 77 – 112.

Brecht, S.H. and Ledvina, S.A., 2006: The solar wind interaction with the martian ionosphere/atmosphere, *Space Science Reviews* 126, 15.

Connerney, J.E.P., Acuna, M.H., Ness, N.F., Spohn, T. and Schubert, G., 2004: Mars Crustal Magnetism, *Space Science Reviews* 111, 1 – 32.

Forsyth, R.J., 2002: Space physics advanced option on the solar wind and heliosphere study material and worksheet, Imperial College London seminar, 1 – 9.

Gosling, J.T., Pizzo, V.J., 1999: Formation and evolution of corotating interaction regions and their three dimensional structure, *Space Science Reviews*, 21 – 22.

Haberle, R.M., 2014: Solar System/Sun, Atmospheres, Evolution of atmospheres, Planetary atmospheres: Mars, *Encyclopedia of Atmospheric Sciences* (second edition), 168 – 77.

Homolya, E., 2010: „Havazások” a Naprendszerben: egy-, két- és többféle „hókristállyal”, szakdolgozat, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest (Dr Bérczi Szaniszló), 56 p.

Hundhausen, A.J., 1977: An interplanetary view of coronal holes, Coronal holes and high speed wind streams, 226.

Kálmán, B., 2004: Egy „közönséges” csillag, Magyar Tudomány, 2004/6, 689.

Kereszturi, Á., Tepliczky, I., 1996: Csillagászati tankönyv kezdőknek és haladóknak (elektronikus változat), Magyar Csillagászati Egyesület, 70 p.

Kereszturi, Á., 2006: Fejezetek a Mars fejlődéstörténetéből, Magyar Tudomány, 2006/8, 946.

Kereszturi, Á., 2007: Éghajlatváltozás a Marson I. rész, Légkör, 52. évfolyam, 12 – 17.

Krieger, A.S., Timothy, A.F. and Roelof, E.C., 1973: A coronal hole and its identification as the source of a high velocity solar wind stream, Solar Physics 29, 505.

Lilensten, J., Bernard, D., Barthélémy, M., Gronoff, G., Simon Wedlund, C., Opitz, A., 2015: Prediction of blue, red and green aurorae at Mars, Planetary and Space Science 115, 48 – 56.

Ma, Y.J., Altwegg, K., Breus, T., Combi, M.R., Cravens, T.E., Kallio, E., Ledvina, S.A., Luhmann, J.G., Miller, S., Nagy, A.F., Ridley, A.J. and Strobel, D.F., 2008: Plasma flow and related phenomena in planetary aeronomy, Space Science Reviews 139, 320.

Nagy, A.F., Winterhalter, D., Sauer, K., Cravens, T.E., Brecht, S., Mazelle, C., Crider, D., Kallio, E., Zakharov, A., Dubinin, E., Verigin, M., Kotova, G., Axford, W.I., Bertucci, C. and Trotignon, J.G., 2004: The plasma environment of Mars, Space Science Reviews 111, 33-114.

Ogilvie, K.W. and Coplan M.A., 1995: Solar wind composition, Reviews of geophysics, volume 33, 615.

Opitz, A., 2007: STEREO PLASTIC calibration, simulation and data analysis, PhD Dissertation, Universitat Bern, Bern (supervisor: Dr Peter Boschler), 127 p.

Parker, E.N., 1963: Interplanetary Dynamical Processes, Interscience Publishers, New York, 14.

Sánchez Díaz, E. , Opitz, A., Witasse, O., 2013: Space Weather conditions in the inner Heliosphere, report, Leiden/ ESA Astrophysics Program for Summer Students, 2.

Trupka, Z., 2015: A bolygók űridőjárása a Föld szolgálatában, Élet és Tudomány, 2015/27

Withers, P., Fallows, K., Girazian, Z., Matta, M., Hausler, B., Hinson, D., Tyler, L., Morgan, D., Patzold, M., Peter, K., Tellmann, S., Peralta, J. and Witasse, O., 2012: A clear view of the multifaceted dayside ionosphere of Mars, Geophysical Research Letters, volume 39, 5 p.

Withers, P., Fillingim, M.O., Lillis, R.J., Hausler, B., Hinson, D.P., Tyler, J.L., Patzold, M., Peter, K., Tellmann, S. and Witasse, O., 2012: Observations of the nightside ionosphere of Mars by the Mars Express Radio Science Experiment (MaRS), Journal of Geophysical Research, volume 117, 11 p.

Internetes források:

[1 - solarscience.msfc.nasa.gov]

<http://solarscience.msfc.nasa.gov/whysolar.shtml>

[2 - astro.u-szeged.hu]

http://astro.u-szeged.hu/oktatas/csillagaszat/6_Naprendszer/0102Nap/nap_adatai.html

[3 - solarscience.msfc.nasa.gov]

<http://solarscience.msfc.nasa.gov/interior.shtml>

[4 - solar.physics.montana.edu]

<http://solar.physics.montana.edu/ypop/Spotlight/SunInfo/Conzone.html>

[5 - astro.u-szeged.hu]

http://astro.u-szeged.hu/oktatas/csillagaszat/6_Naprendszer/0102Nap/nap.html

[6 - space.com]

<http://www.space.com/14736-sunspots-sun-spots-explained.html>

[7 - solarscience.msfc.nasa.gov]

<http://solarscience.msfc.nasa.gov/SunspotCycle.shtml>

[8 - hesperia.gsfc.nasa.gov]

<http://hesperia.gsfc.nasa.gov/sftheory/flare.htm>

[9 - hesperia.gsfc.nasa.gov]

<http://hesperia.gsfc.nasa.gov/sftheory/studyflare.htm>

[10 - helios.gsfc.nasa.gov]

<http://helios.gsfc.nasa.gov/cme.html>

[11 - swpc.noaa.gov]

<http://www.swpc.noaa.gov/phenomena/coronal-mass-ejections>

[12 - nasa.gov]

https://www.nasa.gov/sites/default/files/files/MAVENFactSheet_Final20130610.pdf

[13 - nasa.gov]

https://www.nasa.gov/mission_pages/maven/news/confirmation.html#.VwDcxnrp-Dk

[14 - lasp.colorado.edu]

<http://lasp.colorado.edu/home/maven/science/instrument-package/>

[15 - vilaglex.hu]

http://www.vilaglex.hu/Csillag/Html/Mars_.htm

[16 - universetoday.com]

<http://www.universetoday.com/14892/mars-dust-storms/>

[17 – universetoday.com]

<http://www.universetoday.com/14719/does-mars-have-seasons/>

[18 - planetologia.elte.hu]

<http://planetologia.elte.hu/mcdd/climatemaps.html>

[19 - planetary.org]

<http://www.planetary.org/blogs/emily-lakdawalla/2008/1710.html>

[20 - sci.esa.int]

<http://sci.esa.int/mars-express/51056-new-views-of-the-martian-ionosphere/>

[21 – msss.com]

<http://www.msss.com/http/ps/seasons/seasons.html>

[22 – urvilag.hu]

http://www.urvilag.hu/a_nap_es_bolygotestvereink/20150528_kek_aurorak_a_mars_egen

[23 – Szegő: Nem mágneses bolygók magnetoszférája]

http://www.rmki.kfki.hu/~opitz/NF2016/08_SzK_A_bolygok_magnetoszfera.pdf