

Dinamikai és kémiai folyamatok a Titán légkörében

SZAKDOLGOZAT
FÖLDTUDOMÁNYI ALAPSZAK
METEOROLÓGUS SZAKIRÁNY



Készítette:

Tóth Gabriella

Témavezető:

Leelőssy Ádám

dr. Mészáros Róbert

ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz- és Földtudományi Intézet
Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2016.

Tartalomjegyzék

Kivonat.....	4
Abstract.....	5
Bevezetés	6
1. A Naprendszer égitestjeinek légköre.....	8
1.1.Merkúr	8
1.2. Vénusz	9
1.3. Mars.....	11
1.4. Jupiter	12
1.5. Szaturnusz.....	13
1.6. Uránusz	15
1.7. Neptunusz.....	16
1.8. Plútó.....	17
1.9. Összefoglalás.....	17
2. A Titán	18
2.1. A Titán általános jellemzése	18
2.2. A Titán felfedezésének és kutatásának története	19
2.3. A Cassini-Huygens szondapáronson lévő műszerek	22
3. A Titán légkörében zajló dinamikai folyamatok	25
3.1. Bevezetés	25
3.2. A kialakuló évszakok	26
3.3. A csapadék eloszlásának magyarázata a légkörzés éves menetén keresztül	27
3.4. A Titán dűnéinek formálódása - felszínformáló viharok	28
3.5. Légköri rétegzettség	29
3.6. Felhőképződés.....	31
3.6.1. A sarki felhők.....	32
3.6.2. Konvektív felhők képződése	34

3.7. Léggöri elektromosság kérdése.....	36
4. A légkör részecskéinek fotokémiai reakciója	39
4.1. A középső léggöri kód.....	39
4.2. A légkör molekuláinak a Nap mágneses mezejével való kölcsönhatása.....	43
4.3. A légkör eredete.....	44
Összefoglalás.....	47
Köszönetnyilvánítás	49
Irodalomjegyzék:	49

Kivonat

A Naprendszerben a Föld légköréhez leginkább a Szaturnusz legnagyobb holdjának, a Titánnak a légköre hasonlít, mind összetételében, mind sűrűségében. Bár a hold mérete összehasonlítható a legkisebb kőzetbolygókkal, gravitációja sokkal kisebb a földiénél, így légkörének kiterjedése jóval nagyobb. Emiatt az első űrszondák mérései alapján szerzett adatok ismeretéig a Titánt a Naprendszer legnagyobb holdjának gondolták. Az égitest azért is különleges számunkra, mivel a Földhöz hasonlóan légkörében jelentős mennyiségű szerves molekula található, melyek a fotokémiai reakciók következtében egészen különleges módon befolyásolják a sugárzás terjedését és ennek függvényében a hőmérsékleti értékek alakulását. A másik fontos közös vonása bolygónkkal, hogy a felszíni körülményei következtében a metán képes mind a három halmazállapotban stabilan megmaradni. A légköri metánból felhők képződnek, melyekből a hulló csapadék eléri a felszínt és tavakat, tengereket, folyókat táplál. Ezt a jelenséget a Földön kívül eddig csak a Titánon sikerült észlelni, a többi égitesten még nem találtak olyan anyagot, amely mind a három halmazállapotát képes fölvenni a felszínen.

A Föld és a Titán összehasonlítása közben érdekes eltérések figyelhetők meg a két égitest esetében az év, az évszakok és a napok hosszának különbségeiből fakadóan, a metán és a víz körforgásának sajátosságaiból adódóan, a Naptól való távolság, a légköri összetétel és az ezen alapuló kémiai reakciók végeredményeiben, a kialakuló légkörzési rendszerekben és ezek kapcsán a felhőképződésben. A hold felfedezésének történetében legnagyobb lépés a Cassini–Huygens program, melynek révén 2005 óta űrszondákkal vizsgálhatjuk a Titán felszínét és légkörét. A jelenleg is tartó program eredményei a dinamikai és kémiai folyamatok páratlan gazdaságát fedték fel a Titán légkörében. Ezek áttekintése a dolgozat tárgya, nagy hangsúlyt fektetve a földi légkörrel való hasonlóságok és eltérések bemutatására.

Abstract

Both in its composition and density the atmosphere of Titan (the biggest moon of Saturn) is the most similar to the atmosphere of the Earth in the Solar system. Though the size of the moon is comparable to the smallest planet rocks, its gravity is much smaller than the Earth's gravity, thus the extension of its atmosphere is much larger. That is the reason why Titan used to be known as the biggest moon of our Solar system till the data which were acquired by the measurements of the first spacecrafts. This solar body is special for us even because there is a significant amount of organic molecules in the planet's atmosphere, which can influence the radiation speed and changes in temperatures in a very special way due to photochemical reactions (similarly to the Earth). The other common characteristic with our planet is that under surface conditions methane can remain stable in the three phases. Clouds are formed from the atmospheric methane, from which precipitation can reach the surface and feed lakes, seas and rivers. Outside the Earth, this phenomenon has been perceived only on Titan, yet. On other planets people haven't discovered such material that can remain stable in each of the three phases on the surface.

With the comparison of the Earth and the Titan we can discover significant differences in the length of the year, seasons and the days, due to methane /water cycle, distance from the Sun, in atmospheric composition and in the results of chemical reactions based on it, in evolving atmospheric circulation system and in their connections to the cloud formation. The biggest step in the history of the moon discovery was the Cassini–Huygens mission. Thanks to it, we have been able to examine the surface and the atmosphere of Titan with spacecrafts since 2005. The richness of dynamical and chemical processes in the atmosphere of Titan has been revealed by the results of the ongoing program. These are the subjects of this thesis with emphasis on similarities and differences of the Earth and the Titan atmosphere.

Bevezetés

A Föld légkörében zajló folyamatok vizsgálata nagy múltra tekint vissza és a 19. század közepétől kezdődő kutatásokkal jelentős mértékben fellendült az elméleti meteorológia nagy évszázadának idején. Ezt követően a hidegháború alatt a technológiai fejlődés következtében az űrkutatás során megkezdődött a Föld és más égitestek mélyreható vizsgálata. Így lehetővé vált, hogy más bolygók légköréről is információkat szerezzünk, melyek feldolgozása a földi légkörben zajló folyamatok teljesebb megértéséhez vezetett. Észrevehetünk hasonlóan működő mechanizmusokat, mint például, hogy azokon a bolygókon, amelyek forgástengelye nem ferde, nem alakulnak ki évszakok. Vannak azonban olyan folyamatok, melyek bizonyos paraméterektől, karakterisztikáktól való függésük következtében nagyon eltérő módon működnek. Ilyen például, hogy míg a Földön a felhőkben kondenzálódó nedvességtartalom csapadékként eléri a felszínt és formálja azt, addig a Vénuszon és a Marson a sivataghoz hasonlóan száraz a talaj, mivel – bár felhőképződés van – maga a csapadék nem éri el a felszínt. Nem utolsó sorban ezeken felül jobban értékelhetjük Földünket is, miután olyan folyamatok együttes jelenlétét ismertük meg bolygónkon, melyek egyedülállóak a Naprendszerben és az Univerzum általunk ismert részében, és amelyek következtében nemcsak, hogy az élet kialakulása vált lehetővé, de viszonylagosan nagy kényelmet biztosítanak a mindennapi életünkhöz.

Az űrkutatás eredményei közül a dolgozat szempontjából a különböző légkörökről szerzett információk a legfontosabbak. Felvetődhet a kérdés, hogy minden égitestnek van-e légköre, hogyha van, akkor hogyan keletkezhet, és miként maradhat meg. Légköre csak annak az égitestnek lehet, melynek felszínén a szökési sebesség nagyobb a gázmolekulák átlagsebességénél. A szökési sebesség az a sebesség, amellyel egy adott test képes elhagyni az égitestet, parabola alakú pályán. A levegő molekuláinak mozgási energiája arányos a hőmérséklettel, így minél közelebb van az égitest a Naphoz, annál nagyobb gravitációs mezőre van szüksége, hogy a légkörét megtartsa (*Bérczi, 1978*). A légkörök keletkezésének két módját ismerjük. Az egyik lehetőség, hogy az égitest gravitációs mezejével befogja a bolygóközi térben áramló molekulákat a keletkezése, formálódása során. Ezt nevezik kozmikus eredetű légkörnek, mely a Naprendszer óriásbolygóira jellemző. A másik mód pedig az, hogy a gázok az égitest belsejéből erednek, ahol a gravitációs összehúzóerő és a radioaktív bomlás miatt létrejövő hő

következtében a kőzetolvadékokból felszabadulnak a gázok és vulkanizmus útján a felszínre jutnak (Lagzi et al., 2013).

A dolgozatban röviden bemutatom a Naprendszer égitestjeinek különböző sűrűségű légköreit, illetve az azokban lejátszódó legfontosabb folyamatokat. Ezt követően részletesen kifejtem a Titán légkörének jellemzőit, dinamikai folyamatait és a meghatározó kémiai reakciókat azok következményeivel együtt, majd ismertetem a légkörének eredetéről szóló hipotéziseket és azok ellenérveit.

Mindezek ismeretéhez szükséges megmagyaráznom, mit értek pontosan dinamikai, illetve kémiai folyamat alatt. Dinamikai folyamatnak a légkörben ható erők következtében meginduló mozgások összességét és azok következményeit nevezzük. Ezek elsődleges energiaforrása a Napból érkező sugárzás, mely felmelegíti a felszínt, az pedig leadja a sugárzásból kapott energiáját, miközben alulról melegíti a légkört (Rákóczi, 1993). Ennek hatására eltérő sűrűségű térfogatok jönnek létre a légkörben és légáramlatok indulnak meg a sűrűség- és hőmérsékletkülönbség kiegyenlítésére. Ezekre az elmozduló légrésekre hat az égitest tengely körüli forgása következtében létrejövő Coriolis-erő, a felszín érdekessége miatt a súrlódási erő, a gravitációs erő, az égitest gömbhöz közeli alakja következtében ható metrikus erők, a levegő molekuláinak egymás közti súrlódása következtében ható molekuláris viszkozitási erő és a nyomási gradiens erő. A horizontális irányú elmozdulások mellett meg kell említenünk a vertikális irányú légmozgásokat is, a besugárzás hatására kialakuló globális légkörzési rendszereket, melyek a tengelyferdeség és a forgás sebességének függvényében nagyon különbözőek lehetnek az egyes égitestek esetén. Továbbá vizsgálnunk kell a felhőképződési mechanizmusokat, melyek függenek a légkört alkotó gáz- és aeroszol részecskék összetételétől, koncentrációjától és a légnyomástól a légkör különböző magassági szintjein, hogyha van szilárd felszín, akkor annak topográfiájától és a besugárzás erősségétől. Amennyiben a feláramlás elég erőssé válik, töltésszétválasztódás alakulhat ki, amit villámtevékenység is kísérhet és kérdés, hogy azt milyen módon vagyunk képesek észlelni.

A légkörben zajló kémiai reakciók elsődleges energiaforrása szintén a Napból érkező sugárzás, emellett megemlíthetjük az elektromos kisülésekkor felszabaduló energia által elindított reakciókat is. Ezek következtében módosul a légkör kémiai összetétele, és azzal arányosan a sugárzásáteresztő- és visszaverő tulajdonsága is. Az összetételtől tehát nagymértékben függ az, hogy az égitest felszínére vagy az alsóbb légköri tartományaiba mennyi Napból érkező, rövidhullámú sugárzás jut el, illetve mennyi hosszúhullámú sugárzás tud távozni onnan. Ezzel arányosan alakul a felszíni és az alsó légköri

tartományok hőmérséklete. Fontos megemlíteni, hogy melyik égitesten milyen légköri összetevő okozza az üvegházhatást, illetve, amennyiben kialakul, annak ellentétjét, az ún. „anti-üvegházhatást”. A kémiai folyamatok bemutatásában elsőként az indító reakciókra térek ki, majd az azok hatására történő változásokra és a folyamat eredményeképpen kialakult légköri sajátosságokra. A legrészletesebb bemutatás természetesen a Titán esetében történik, hiszen annak légkörét tanulmányozom a dolgozatomban. A Naprendszer bolygóinak bemutatásakor csak az egyes légkörök sajátosságaihoz hozzájáruló kémiai reakciókat és következményeit említem meg.

Egyes bolygók, például a Mars, a Vénusz és a Jupiter légkörének tanulmányozásáról már nagy terjedelmű irodalmi munkák születtek (*Gierasch, 1975; Ingersoll et al., 2004; Kieffer et al., 2006*). A Szaturnusz holdjáról, a Titánról is voltak információink már az űrkutatás idejének kezdete után nem sokkal, a Voyager-program űrszondáinak köszönhetően. Részletesebb kutatása azonban csak a közelmúltban kezdődött, a Cassini–Huygens szondák 2004-ben történt sikeres, a Szaturnuszhoz és a Titánhoz való érkezését követően. A szondapáronson lévő műszerek a mai napig aktívak, adataik még folyamatos kiértékelés alatt állnak, így a hold légköréről szerzett információink jelentős része még friss. A téma újszerűsége miatt a magyar nyelvű szakirodalomban még csak néhány ilyen tárgykörű tanulmány íródott (*Homolya, 2010; Kovács and Turányi, 2010*). A Titán és a Föld légköre sok szempontból hasonló. Összevetésük lehetőséget ad a bolygónk légkörében működő folyamatok teljesebb megértésére, egyedi jellemvonásainak értékelésére, illetve, a Földünkön nem működő mechanizmusok megismerésére is. Mindezen különlegességek miatt választottam a Titán légkörének bemutatását a dolgozatom témájának.

1. A Naprendszer égitestjeinek légköre

1.1.Merkúr

A Merkúr a Naphoz legközelebb elhelyezkedő bolygó. Kisebb a Naprendszerben található két legnagyobb holdnál: a Ganümedésznél és a Titánnál. Van mágneses mezeje, mely sokkal gyengébb a Földiéénél, azonban elég erős ahhoz, hogy a Napból érkező töltött részecskékkel kölcsönhatva magnetoszférát hozzon létre (*Anderson et al., 2009*). Tengely körüli forgásának ideje 59 nap, keringési ideje ennél hosszabb, 88 nap. Túl kevés

gravitációs erővel rendelkezik ahhoz, hogy tartósan légkör maradjon körülötte, van azonban egy, a földi exoszférának megfelelő sűrűségű gázburka, mely a felszín közelében helyezkedik el. Nyomása 10^{-15} bar, ez a földi viszonylatban gyakorlatilag vákuum. A rendkívül ritka légkör miatt a felszíni hőmérséklet nagyon szélsőséges értékeket vehet fel: a Nap felőli oldalon akár $610\text{ }^{\circ}\text{C}$, míg a Naptól távoli oldalon $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ jellemző. A jelenlévő gázmolekulák közül jelentős a hidrogén és a hélium, melyek a napszéllel érkeznek, szétterülnek a bolygó mágneses mezejében, majd újra visszatérnek a világűrbe. Hélium, illetve nátrium és kálium a kéregben lévő anyagok radioaktív bomlásával is kerülhet a vékony légkörbe. A jelen lévő víz vagy a meteoritok és az üstökösök becsapódása által, vagy a bolygó belsejéből induló kigőzölgések révén került felszínre. Amennyiben a direkt napsugárzásnak kitett, magas hőmérsékletű oldalára kerül a Merkúrnak, elpárolog és megszökik a légkörből, ha azonban az alacsony hőmérsékletű, árnyékolt területekre kerül, megfagy, és a felszínen maradhat, ameddig el nem olvad a napsugárzás miatt (*Strom and Sprague, 2003*). Pontosabb tanulmányozására eddig két, a NASA által előkészített űrprogram indult. Ennek keretében az első űrhajó, a Mariner-10 1973. november 3-án indult útnak, hogy a Vénusz melletti elhaladása után a Naprendszer legbelső bolygóját is megközelítse. A MESSENGER nevű második űrszondát 2004. augusztus 3-án indították, mely érkezése után nem sokkal pályára állt a bolygó körül, hogy így a Merkúr első műholdjaként folyamatos méréseket végezhesen. A küldetés egyik legjelentősebb eredménye a sarki vízjég létezésének megerősítése a szonda neutron- spektrométerének mérései alapján. A kutatók a vízjég létét a Merkúron már korábban gyanították földi teleszkópos vizsgálatok alapján; a kutatás fontos célja volt a feltevés igazolása (*Lawrence et al., 2013*).

1.2. Vénusz

A Naphoz a második legközelebb elhelyezkedő bolygó, gyakran nevezik a Föld testvérbolygójának, mivel tömegében, sűrűségében és méretében nagyon hasonló a két égitest. A Vénusz a Földről legfényesebbnek látszó bolygó. Ezt az egész égitestet beburkoló felhőzetének köszönheti, mely visszaveri a napsugárzás jelentős részét. Bár nem a Naphoz legközelebb elhelyezkedő égitest, a sűrű, túlnyomórészt szén-dioxidból álló légkörében uralkodó erős üvegházhatás miatt mégis a Naprendszer legmelegebb bolygója. Felszíni hőmérséklete $460\text{ }^{\circ}\text{C}$ körüli értékeket vesz fel. A Nap körüli keringésének ideje 225 nap, tengely körüli forgásának ideje ennél hosszabb, 243 nap. A lassú forgás miatt a Vénuszon elmozduló bármely testre, így az elmozduló légrésekre is

a Coriolis-erő hatása elhanyagolható mértékű. Tengelyének ferdesége $2,7^\circ$. Ehhez még hozzájárul, hogy a felhők elnyelik, illetve visszaverik a sugárzás nagy részét. A felszíni hőmérséklet értéke így közelítőleg állandó az egész Nap körüli pálya során, nem alakul ki évszakos változás az éghajlatban. A légköri összetevők 96%-a szén-dioxid, 3,5%-a nitrogén, a maradék kevesebb, mint 1%-ot szén-monoxid, argon, kén-dioxid és vízgőz alkotja (Schubert et al., 1980). A felszíni légnyomás mintegy 92-szerese a földinek. A felszín közelében a levegő rendkívül sűrű, ezért lassú felszíni szelek jellemzőek. A kisebb sűrűségű magaslégköri tartományokban azonban 300 km/h-ra növekszik a szélső sebesség; a légkörnek ez a rétege négy nap alatt körbefutja a bolygót (Illés, 1974). Sok kutató (Kasting and Pollack, 1983; Grinspoon, 1993; Kulikov et al., 2006; Kereszturi, 2009) úgy véli, hogy korábban lehetett víz a Vénusz felszínén, akár egy egész óceán is, mint a Föld esetén, ám a Naphoz való közelségből fakadó magas hőmérséklet miatt párologni kezdett. A légkörben egyre növekvő vízgőz koncentráció egyre erősebb üvegházhatást, és ezzel arányosan növekvő hőmérsékletet eredményezett, így a felszíni víz is egyre gyorsabban párologott, míg végül teljesen elfogyott (Kereszturi, 2009). A hőmérséklet a felhők szigetelő hatása miatt a Nap felőli, illetve az ellenkező oldalon hasonló értékeket vesz föl a lassú tengely körüli forgás ellenére is. A Vénusz felhői kénsav cseppekből állnak, melyekből a kihulló csapadék sosem éri el a felszínt. A kondenzációs szint 60 km magasságban van. A Földön ennél jóval alacsonyabban, 0–10 km magasságban zajlik a felhőképződés. A lassú tengely körüli forgás miatt az északi és déli félgömbön csak egy-egy cirkulációs cella alakult ki. Az egyenlítő környékére merőlegesen érkező napsugárzás hatására felszálló légáramlat indul el, mely közvetlenül szállítja a hőt a sarkvidéki örvényekig. Emiatt az alacsonyabb és a magasabb szélességek hasonló hőmérsékletűek. Az egyenlítő környékéről felszálló és távozó légtömegek a pólusok környékén összeáramlanak és lesüllyednek. A konvergencia és a leáramlás együttes következményeként egy örvény alakul ki (Schubert et al., 1980). 100 km magasságban a légkörben van egy nagyon kis sűrűségű ózonréteg, melyet az Európai Űrügynökség által indított Venus Express űrszonda SPICAV ultraibolya-műszere észlelt először. Mennyisége 0,02–0,3 DU (Montmessin et al., 2011). A szonda egyik további mérési eredménye, hogy magnetométere segítségével villámlás nyomait észlelte a légkörben (Russell et al., 2007; Svedhem et al., 2007). Mivel a Vénuszon a felhőzet nagyon magasan helyezkedik el, csak felhő-felhő villámok létezhetnek, lecsapó villámok valószínűleg nem. A Vénusz részletesebb tanulmányozására 1962-től kezdődően nagyon sok

űrszondát indítottak, a volt Szovjetunió, a NASA és az Európai Űrügynökség különböző programjai keretében.

1.3. Mars

A Naprendszerben kifelé haladva a negyedik közbolygó, sugara a Föld sugarának közelítőleg a fele. Tengely körüli forgásának ideje nagyon hasonló a Földéhez: 24,622 óra. Légköre a földihez képest nagyon ritka, a légnyomás évszaktól függően 0,7–0,9 kPa, mégis beszélhetünk légköri cirkulációról, felhőzetről, légköri dinamikáról (*Illés, 1974*). Ilyen alacsony nyomáson globális mennyiségben tartósan nem lehet folyékony halmazállapotú víz. Leggyakrabban előforduló gázkomponense a szén-dioxid, mely a légkör 93%-át teszi ki, ezen kívül jelentős a nitrogén, az argon és az oxigén. Belső eredetű globális mágneses tere nincs, azonban a Mars Global Surveyor keringőegység helyenként erős lokális mágneses mezőket azonosított (*Albee et al., 2001*). Tengelyferdesége 25°, a Földhöz hasonlóan itt is négy évszak alakul ki: tavasz, nyár, ősz és tél.

A téli félgömbön, a magasabb szélességeken olyan alacsonnyá válik a hőmérséklet, hogy a sarki területeken kifagy a légköri szén-dioxid egy része, jelentős légnyomáscsökkenést okozva. Tavasszal ismét elég magas lesz a hőmérséklet ahhoz, hogy a szén-dioxid megolvadjon, viszonylag gyorsan visszakerüljön a légkörbe, ezáltal újra megnövelve a légköri nyomást (*Kieffer et al., 2006*). A légköri összetétel szezonális változása és az ebből fakadó nyomásváltozás okozza az időről időre keletkező porviharokat. A Mars felszínét finom por borítja, mely csapadék híján száraz. A szelek elég erősek ahhoz, hogy nagy mennyiségű port felkapjanak, és a magasba emeljenek. Egy-egy porvihar kiterjedése a felszíntől 40–60 km-es magasságig jellemző (*Illés, 1974*). Megfigyeltek már villámokat is a porviharok során a Marsra küldött leszállóegységek műszereinek segítségével. Zivatarfelhők itt sosem képződnek, azonban a szél által szállított porszemcsék ütközése, súrlódása során kialakulhatnak légköri elektromos jelenségek.

A Marson két felhőtípus jellemző. A vízjégből álló vékony felhők a konvekció eredményeképpen jönnek létre. Szén-dioxid-felhők a sarki területek felett, télen képződnek, amikor hosszú ideig nem éri sugárzás a bolygónak ezt a részét (*Colaprete, 2000*). Az európai Mars Express két ózonréteget is észlelt a légkörben. Az egyiket a felszínhez közel, a másikat 30–60 km-es magasságban. Összességében kevés ózon van a Marson, kevesebb, mint 1 DU, ami a földi ózonmennyiségnek 300-ad része (*Montmessin et al., 2011*), mivel kevés az oxigén is, melyből az erős ultraibolya sugárzás hatására

bomlással keletkezik (*Lebonnois et al., 2006*). A légköri szén-dioxid gyenge üvegházhatást okoz, így az infravörös sugárzás energiájának egy része nem a világűr felé távozik, hanem melegíti az alsóbb légrétegeket. Ennél azonban nagyobb fűtő hatása van a levegőbe kerülő por által elnyelt, majd kibocsátott sugárzásnak.

A Mars teljesebb megismerésére nagyon sok keringő- és leszállóegység indult. A legutóbbi űrszondát, az ExoMars-ot 2016. március 14-én indította az Európai Űrügynökség a Kazahsztánban található Bajkonurból. Nagy figyelmet szenteltek a felszíni morfológia kialakulásának, a légkörnek és az élet lehetőségének tanulmányozására, víz jelenlétének felkutatására. Sok ötlet született a bolygó olyan átfarmálásáról is – az úgynevezett terraformálásról – mely könnyebbé tenné az ember ottani megélhetését (*Vago et al., 2006*).

1.4. Jupiter

A Naprendszer bolygói közül a legnagyobb, és egyben az egyetlen, melynek Nappal való közös tömegközéppontja a Nap felszínén kívül helyezkedik el. Tengelyferdesége $3,13^\circ$, így a Vénuszhoz hasonlóan itt sem alakulnak ki évszakok. Ebben a Naptól távoli tartományban a könnyebb elemek előfordulása jellemző: főként a hidrogén és a hélium, melyek a Naprendszer kialakulásakor elillantak a Nap közeléből és a közetbolygók felszínéről. Így a Jupiter anyagának nagy része, légköre és köpenyének anyaga főként ezekből épül föl, továbbá jelen van még metán, ammónia és kén. A légkörnek nincs természetes alsó határa, anyaga folyamatosan megy át a köpeny anyagába, legbelül pedig szilárd maggal rendelkezik. Óriási mágneses mezeje van, mely a Szaturnusz pályáján is túlnyúlik. A laboratóriumi mérések szerint a hidrogén a nyomás és a hőmérséklet emelkedésével arányosan egyre inkább vezetővé válik. Ennek a hidrogénköpenynek áramlásai keltik a bolygó mágneses mezejét (*Illés, 1974*). A Földhöz hasonlóan itt is megfigyelhető a sarki fény jelensége.

Tengely körüli forgása rendkívül gyors: a sarkvidékeken 9 óra 55 perc 30 másodperc, az egyenlítőnél pedig 9 óra 50 perc 40 másodperc, emiatt alakja erősen lapult ellipszoid. Ennek köszönhetően a hőmérséklet a pólusokon veszi fel a maximális értéket, mivel ezek a területek vannak a legközelebb a maghoz, a belső hő forrásához. A Jupiter a légkörében zajló dinamikai folyamatokhoz szükséges energiát nagyrészt belső hőjéből fedezi, és csak kis részben a Naptól jövő sugárzásból. 2,5-szer több energiát sugároz ki, mint amennyi Naptól érkezőt elnyel (*Illés, 1974*). Az óriásbolygók légköre, így a Jupiteré is sávós. Hagyományosan a fehér sávokat zónáknak, a vörös sávokat öveknek hívják. A zónák

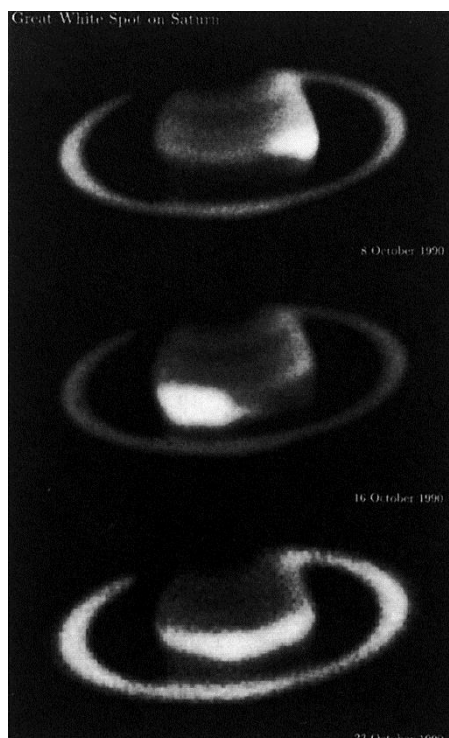
anticiklonális, az övek ciklonális mozgásúak (*Ingersoll et al., 2004*). A felhők fő összetevői ammónia, kénsav és víz, jellemzően színtelenek, de a bennük lévő kén- vagy foszfortartalom függvényében elszíneződhetnek. A Jupiter legkiemelkedőbb légköri képződménye a Nagy Vörös Folt, mely több légköri örvény összeállásából keletkezett. Már a 17. századi megfigyelők is észlelték. Hatalmas, stabil képződmény, nagyobb, mint a Föld átmérője, de mérete évente csökken. 2000-ben megfigyeltek egy ehhez hasonló képződményt [1 - NASA Science], mely több kisebb fehér légköri örvény ütközéséből és összeállásából keletkezett. Színe eredetileg fehér volt, ám lassan bevörösödött. A fehér színű viharok valószínűleg hideg, a vörösek pedig meleg képződmények. Általában rövid életűek, a Nagy Vörös Folt azonban már legalább 300 éves. Több közel repülő űrszonda és a Galileo műhold mérései alapján megállapították, hogy léteznek villámok a Jupiter légkörében (*Little et al., 1999*). Ezek viharfelhőkhöz köthetők, melyek élete több napig is eltart.

A tudományos ismeretek sokoldalú bővítése végett több űrszonda is indult a Naprendszer távolabbi tartományába, melyek hintamanőver művelethez kihasználták a Jupiter jelenlétét, melynek gravitációs mezeje egy új pályára állította őket. Ilyen volt a Pioneer-1, -2, a Voyager-1,-2 és a Cassini–Huygens. Az Ulysses kétszer repült el mellette Nap körüli pályája során, a Galileo pedig sokáig műholdként keringett körülötte. Eközben mindig újabb adatokat küldtek a Jupiterről és holdjairól a Földre.

1.5. Szaturnusz

A Naprendszer második legnagyobb bolygója, és egyben az egyetlen, melynek sűrűsége a víz sűrűségénél is kisebb. Ez vastag légkörének köszönhető, mely térfogatának jelentős részét kitölti. Látványos, centiméteres-méteres nagyságrendű jégsziklákból álló gyűrűrendszere van, melynek felszíne leginkább havas felülethez hasonlít. Gyors tengely körüli forgása miatt – 10 óra 47 perc – alakja erőteljesen lapult forgási ellipszoid. Van saját mágneses mezeje. Tengelyferdesége 26° , így a Földhöz és a Marshoz hasonlóan négy évszak alakul ki egy szaturnuszi év során. Légkörének főbb összetevői az óriásbolygókra jellemzően kis molekulatömegű, illékony anyagok, mint a hidrogén, a hélium, az ammónia és a metán. További, a Jupiter-típusú bolygókkal közös tulajdonsága, hogy több energiát sugároz ki, mint amennyit a Naptól kap, illetve a légkörének dinamikai folyamataihoz szükséges energiát saját belső hőjéből fedezi (*Illés, 1974*). Sávozott légköre van, az egyenlítőnél szélesebb, a pólusok környékén pedig

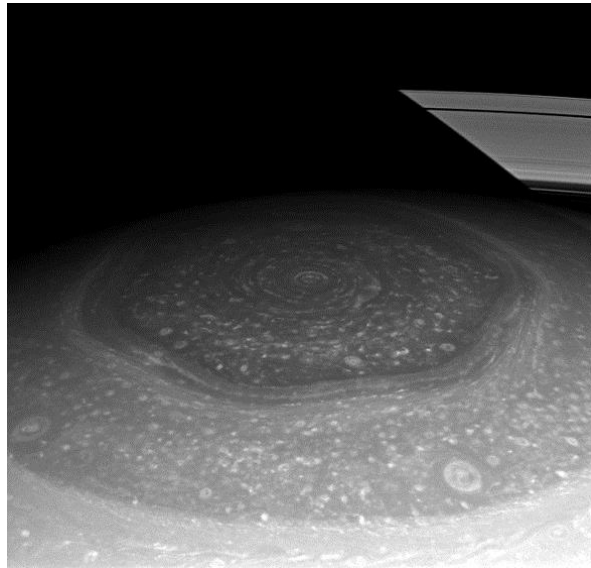
szűkebb tartományokkal. Az egyes sávok a légkörben zajló konvektív folyamatok, illetve a tengely körüli forgás eredményeképpen jönnek létre.



1. ábra: A Szaturnusz Nagy Fehér Foltjának fejlődési fázisai [2 – European Southern Observatory]

1876-ban Asaph Hall észlelte először az addigi legkiemelkedőbb jelenséget a Szaturnusz légkörében, az úgy nevezett Nagy Fehér Foltot (1. ábra). 1903-ban, 1933-ban, 1960-ban, majd 1990-ben a jelenség újra ismétlődött. Hozzávetőlegesen minden szaturnuszi évben megjelenik a képződmény, és minden bizonnyal a besugárzási ciklushoz kötődik. Az öt megfigyelt viharból három az egyenlítő környékén, egy a 36° szélességen és egy a 60° szélességen alakult ki (Sanchez-Lavega, 1994). 1980-ban az északi pólus körül egy 32 000 km átmérőjű, majdnem teljesen szabályos hatszög alakú légköri képződményt azonosítottak (2. ábra). Felfedezése óta stabil képződménynek tűnik, és együtt forog a bolygóval. Peremén mintegy 360 km/h-ás sebességű futóáramlás halad. A hatszög belsejében a légkör sötétebb, mint a bolygó többi területén. A kutatók még nem találtak pontos magyarázatot arra, hogy a légköri képződmény hogyan képes megőrizni ezt a közel szabályos alakját. Úgy tűnik, nagyon hasonlít a földi jet streamre (Sanchez-Lavega et al., 1993; Fletcher et al., 2008). A Naprendszer távolabbi tartományaiba indított űrszondák, mint a Voyager-1, -2 és a Pioneer-11 a Szaturnuszhoz való közelrepülésük során nagy mennyiségű, egyre pontosabb adatokat továbbítottak a

Földre, melyek a bolygó megismerésének folyamatán nagy előrehaladást jelentettek. Első műholdja, az 1997-ben útnak indult Cassini 2004-ben állt pályára körülötte.



*2.ábra: A Szaturnusz hatszög alakú felhőörvénye
[3 -NASA/JPL – Caltech/Space Science Institute]*

1.6. Uránusz

A Naptól kifelé haladva a hetedik bolygó. Átmérője négyszer akkora, mint a Földé. Tengely körüli forgása a Vénuszhoz hasonlóan retrográd irányú, ideje 17 óra 14 perc, keringési ideje pedig 84 év. Tengelyferdesége $97,77^\circ$, azaz csak közel 8° -al tér el pályasíkjától, így a pólusok környékét is éri merőlegesen beérkező napsugárzás a pályájának bizonyos szakaszain. A Naptól való nagy távolsága miatt nagyrészt belső hője fűti légkörét. Az Uránusz belső hője – a többi óriásbolygóval ellentétben – azonban már nem többszöröse a Napból érkező sugárzási energiának, így annak ellenére, hogy nem a legkülső bolygó, az Uránusz légköre a leghidegebb a Naprendszerben. Troposzférájának hőmérséklete -153°C és -218°C között mozog. Kevés rendelkezésre álló energiája miatt jellemző időjárása általában nyugodtabb a többi nagybolygóhoz képest, ám hét évvel azután, hogy legutoljára áthaladt pályájának a Naphoz legközelebb eső pontján, távérzékelő műszerek segítségével vihart fedeztek fel a légkörében. A kutatók számára eddig megoldatlan kérdés, hogy miért nem a napforduló idején keletkezett a vihar (Sromovsky et al., 2012). A légkör legfőbb alkotóelemei a hidrogén, a hélium, az ammónia és a metán. A légkörben a hőmérséklet változását nagyrészt a metán magasságbeli eloszlása befolyásolja, mivel a nagyobb koncentrációjú övek több Napsugárzást nyelnek el, mint más légköri tartományok (Wallace, 1980). A bolygó kék színét szintén a

légkörben lévő metán okozza, ugyanis a metán elnyeli a vörös színhez tartozó alacsony hullámhosszú sugárzást, a kékhez tartozó rövid hullámhosszú sugárzást pedig visszaveri. A felső légköri rétegeket szinte csak hidrogén és hélium alkotja, míg a bolygó legbelső tartományaiban nem jelentős az előfordulásuk. Légköre a Földéhez hasonlóan rétegekre tagolható. Legalul a troposzféra helyezkedik el, ahol a hőmérséklet csökken a magassággal, és ahol a legsűrűbb a légkör. Itt képződnek a felhők. A legalacsonyabban találhatóak vízből állnak, fölöttük ammónium-hidroszulfid felhők, azok fölött hidrogén-szulfidból állók, majd legmagasabban a metán felhők vannak. A következő réteg, a sztratoszféra, etánködből áll; ebben a tartományban a hőmérséklet növekszik a magassággal. A termoszféra és az exoszféra hőmérséklete eléri az 577°C -ot, de ennek oka egyelőre még ismeretlen. A felsőlégkör magas hőmérsékletéből fakadóan az Uránusz légköre nagyon nagy magasságokig terjed, így hatással van a gyűrűrendszer mozgására (Herbert et al., 1987).

1.7. Neptunusz

A Naprendszer legkülső bolygója. Ilyen távolságból a Nap már nem is látszik korong alakúnak, csak egy nagyon fényes csillagnak. A Neptunusz az óriásbolygók közül a legkisebb, de tömege nagyobb az Uránuszénál, továbbá közülük a legjobban ez hasonlít a közetbolygókra nagy sűrűsége miatt. A Napot 164,79 év alatt kerüli meg, tengelye körül pedig 15,97 óra alatt fordul meg, a különböző szélességeken különböző sebességgel – hasonlóan a másik három óriásbolygóhoz. Tengelyferdesége $28,32^{\circ}$, így négy évszak váltja egymást egy Nap körüli útja során. A Neptunusz felszínén az egyik legvadabb és legszélsőségesebb időjárás uralkodik a Naprendszerben. Légkörének fő összetevője a hidrogén és a hélium, illetve jelentős még a metán, melynek kék színét köszönheti (Cruikshank et al., 1995). Légkörének főbb rétegei közül a legalacsonyabban fekszik a troposzféra, ahol a hőmérséklet csökken a magassággal. Ez azért van, mert a Neptunusz légköre, nagy távolságra lévén a Naptól, belső hője által alulról felfelé fűtődik. Az efölötti rétegben, a sztratoszférában növekszik a hőmérséklet. A termoszférában és az exoszférában uralkodó légnyomás nagyon alacsony. A Neptunusz felhői magasságtól, azaz a légnyomástól és hőmérséklettől függően különbözőek. Az alacsonyabban fekvő felhők ammóniából, ammónium-szulfidból és vízből állnak, a magasabban lévő felhők pedig fagyott metánból álló cirrusok. Felsőlégkörében egy ködréteg helyezkedik el.

A jellemző szélsősebesség 2100 km/h , így rendkívül erős viharokat figyelhettek meg a közel haladó űrszondák. Közülük a legjellegzetesebb az ovális alakú Nagy Sötét Folt volt.

Először a Voyager-2 észlelte 1989-ben. A légörvény méretében és dinamikájában egészen hasonló a Nagy Vörös Folthoz. Azonban, míg a Jupiter évszázadok óta ismert, stabil légköri örvénye tartós képződmény, a Nagy Sötét Foltot egy néhány évvel későbbi mérés során már nem tudták észlelni, mivel addigra eltűnt (*Cruikshank et al., 1995*).

1.8. Plútó

A Neptunuszon túli Kuiper-övbe tartozó égitest, ám sokáig a bolygók közé sorolták. Pontos hovatarozását azonban nem volt könnyű eldönteni, mivel helyileg a nagybolygók mellett található, távol a többi kőzetbolygótól, azonban mérete, sűrűsége és szilárd felszíne alapján egyértelműen a belső bolygókhoz hasonlított jobban. A Nemzetközi Csillagászati Unió 2006-ban hivatalosan törpebolygónak nyilvánította, mivel Nap körüli pályája során található vele nagyságrendjében összemérhető méretű égitest, mely a legnagyobb holdja, a Charon (*Brown, 2002*). A tudósok ezért Plútó–Charon kettős bolygónak is hívják. Tengely körüli forgásának ideje 6,4 földi nap, ez megegyezik azzal az idővel, amely alatt a Charon egy teljes kört tesz körülötte. Forgása retrográd irányú. A Plútó felszíne az egyik leghidegebb hely a Naprendszerben, a hőmérséklet -225 °C körüli értékeket vesz föl jellemzően. Pályája hosszan elnyúlt, 248 év alatt futja be, melynek során mintegy 20 éven keresztül a Neptunusz pályáján belülre kerül. Napközeli pályaszakaszának idején az egyébként fagyott felszín felenged, a talajból gázok szublimációja kezdődik meg, és kialakul egy időszakos, ritka légkör, mely túlnyomórészt nitrogénből és egy kevés metánból áll. A légkör ritkasága ellenére a megfigyelések szerint erős szelek tudnak kialakulni. Mivel a Plútó gravitációs ereje nagyon kicsi, a földiének huszad része, a légkör nagy magasságig képes terjedni. A mintegy 200 éven keresztül tartó naptávoli időszakban kifagynak a légköri gázok, megfagy a felszín, ilyenkor nincsenek légköri dinamikai mozgások. A Plútó, annak holdjai, illetve a többi Kuiper-övi objektum tanulmányozására a NASA 2006-ban egy külön űrszondát indított, a New Horizons-t, mely 2015 júliusában közelítette meg a törpebolygót, majd tovább haladt a Naprendszer külsőbb tartományai felé (*Brown, 2002*).

1.9. Összefoglalás

Összességében elmondható, hogy a Naprendszer bolygóinak majdnem mindegyike rendelkezik számottevő légkörrel. A Naphoz közelebbi tartományokban a Naptól érkező sugárzás a légköri dinamikai folyamatok hajtóereje, míg eltávolodva a Naptól, az

óriásbolygók esetén a saját, belső hő a dinamikai folyamatok fő energiaforrása. Amennyiben nem az égitest saját belső hője a légköri dinamikai folyamatok elsődleges energiaforrása, minél nagyobb a pálya excentricitása, annál nagyobb különbség lesz a légkör napközeli és naptávoli állapota között. A mágneses térrel rendelkező bolygók légköre védelmet élvez a napszél részecskék erodáló hatása ellen, míg mágneses mező nélkül a légkör az erózió miatt fogy. A kialakuló évszakok tulajdonságai a forgástengely ferdeségétől függenek.

2. A Titán

2.1. A Titán általános jellemzése

A Titán a Szaturnuszhoz a negyedik legközelebb eső hold. Méretét tekintve a Naprendszerben a Jupiter Ganümedész holdja után a második legnagyobb hold, nagyobb a Merkúr bolygónál is. Átlagos átmérője 5150 km nagyságú. A kutatók a Földdel mutatott sok hasonló tulajdonsága miatt figyeltek föl rá. Szilárd felszínnel és számottevő, nagyrészt nitrogénből álló légkörrel rendelkezik. A felszínén mérhető légnyomás a földinek másfélszerese. Mivel a hold gravitációs ereje a földinek mindössze 14%-a, légköre jóval vastagabb a földiénél, mintegy 1500 km. A felszíni átlagos hőmérséklet – 180°C. A légkörében jelen lévő metán ilyen körülmények között mindhárom halmazállapotát fel tudja venni a felszínen, illetve a légkörben. Vannak metán felhők, melyekből metáneső vagy -hó esik, ezek metán folyókat és tavakat táplálnak (*Stofan et al., 2007; Raulin, 2008*). A Földön kívül a Titán az egyetlen égitest, amelyen a felhőkből hulló csapadék eléri a felszínt (*Hueso and Sánchez-Lavega, 2006*).

A Naprendszerben a Földön kívül az egyetlen ismert égitest, melyen egy anyag - ez esetben a metán - mind a három halmazállapotban jelen van. A víz a felszíni körülmények között nem tudja fölvenni a folyékony halmazállapotot, hanem szilárd fázisban a hold közeteinek egyik fő alkotóanyaga. A forgástengely ferdesége 26,7°, így négy évszak alakul ki egy Titán-év során. A Napot a Szaturnusszal együtt 29,5 év alatt kerüli meg, így egy-egy évszak átlagosan hét év hosszúságú. A kutatások során nagyon fontos szempont volt, hogy van-e, illetve kialakulhat-e élet a Titánon (*Norman, 2011*). A felszíni, Földhöz képest zord körülmények ismeretében ma már tudjuk, hogy nincs élet a holdon, azonban a sok hasonló tulajdonság miatt jó alapul szolgál annak modellezésére, hogy az ősi Földön milyen körülmények lehettek, és mi segíthette az élet kialakulását.

2.2. A Titán felfedezésének és kutatásának története

A Titánt egy holland matematikus csillagász, Christiaan Huygens fedezte föl 1655. március 25-én. Ez volt az ötödik hold, amelyet fölfedeztek a Naprendszerben a Jupiter négy, Galilei által megfigyelt holdja után. Elsőként a Voyager-1, -2 űrszondák vizsgálták közlelről. A NASA által indított Voyager program első űrszondái 1977 szeptemberében indultak útnak, melynek során megközelítették a Jupitert és a Szaturnuszt, illetve azok holdjainak egy részét, így a Titánt is. Ekkor kaptunk róla először pontosabb információkat, azonban az űrszondákon még nem volt megfelelő műszer ahhoz, hogy sűrű légköre alatt rejlő felszínéről pontos információt szerezzenek, mivel a légkörét csak ekkor fedezték föl.



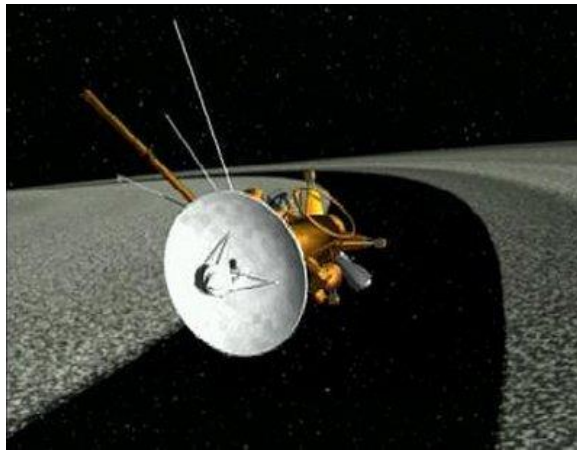
3.ábra: A Cassini–Huygens indítása, 1997.október 15. [4 - NASA]

A Voyager-program előtt a vastag légkör miatt a Titán olyan nagynak látszott, hogy azt hitték, a Naprendszer legnagyobb holdja, azonban a közelrepülés során végzett vizsgálatokból kiderült, hogy valójában kisebb, mint a Ganümédész, csak légköre miatt tűnt nagyobbak.

Az első űrprogram, mely konkrétan a Titán megismerését tűzte ki célul, az Európai Űrügynökség és a NASA együttműködésével létrejött Cassini–Huygens program (Matson et al., 2003). A Cassini a NASA által épített keringőegység, mely a Szaturnusz körül kering, a hold felfedezőjéről elnevezett Huygens pedig egy, a Titán felszínén működő leszállóegység. Az általuk küldött pontos és részletes információk előtt csak annyit tudtunk a holdról, hogy nagyméretű, van légköre, mely főként nitrogénből és kis

mennyiségű metánból áll (*Fulchignoni et al., 2005*), a felszíni légnyomás lehet, hogy eléri a földi tengerszinti légnyomás értékét, kőszilárd és lehet, hogy mindezen feltételek mellett az élet is kialakult.

A légkör létének egy további bizonyítékául szolgált a 2003-ban történt jelenség, melynek során a Titán két fényes csillag előtt haladt el, mintegy fél óra különbséggel (*Luz et al., 2005*). Az áthaladás idejének közepe felé a csillag fénye erősebbnek látszott, mivel a légkör prizmaként viselkedve a Föld felé fókuszálta a csillagok fényét. A jelenség végén a csillagok fénye fokozatosan halványult el.



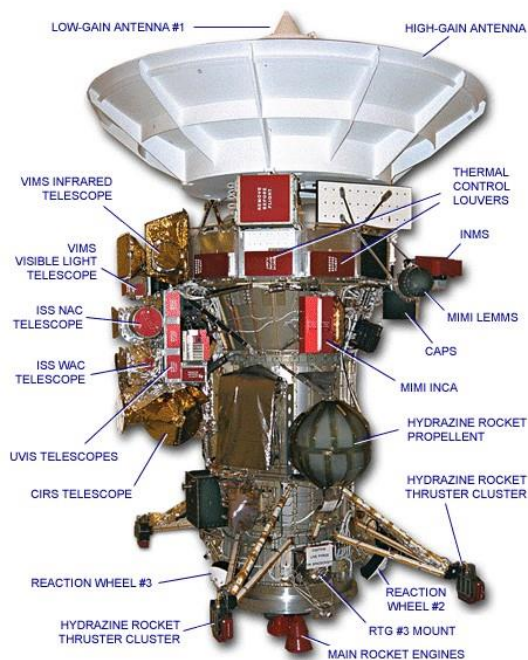
4.ábra: A Cassini–Huygens szondapáros a Szaturnusz gyűrűi mellett [5 – NASA/ESA]

Az előismeretek igazolására és új információk szerzésére megfelelő műszerekkel ellátott szondapáros indítására 1997. október 15-én került sor, Cape Carneval-ból (3. ábra). Hét évig tartó útja során a Vénusz, a Föld és a Jupiter gravitációs mezejét használta fel gravitációs lendítésre. A Szaturnuszt 2004-ben közelítette meg, áthaladt annak gyűrűrendszerén, 2068 km távolságban elhaladt a Phoebe hold mellett, majd július 1-jén sikeresen pályára állt a bolygó körül (4. ábra). A Cassini feladata a Szaturnusz légkörének, felhőzetének, gyűrűrendszerének, valamint holdjainak tanulmányozása. Fél évvel a pályára állás után, december 25-én a Huygens leszállóegység különvált a Cassinitól, hogy megkezdje saját küldetését, a Titán légkörének és felszínének tanulmányozását. A hold légkörébe 65°-os szögben lépett be, 6 m/s-os sebességgel mintegy 2,5 óra alatt haladt keresztül rajta. Ereszkedése közben 1400 km-es magasságtól kezdve folyamatosan vizsgálta a légkör vertikális szerkezetét, a fizikai tulajdonságainak és összetételének magassággal való változását, míg három hetes önálló útja végén el nem érte a felszínt. A légkör molekuláival való súrlódás következtében a szonda olyan mértékig felmelegedett, hogy érkezése után a magas hőmérsékletű üreszköz jelenlétének

köszönhetően a környező felszínből gázok szublimáltak el, így az első mérések nagyobb metán koncentrációt mutattak ki a szonda környékén és lehetséges, hogy emiatt még csapadékképződés is lejátszódott. A landolás után $-179,45\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os hőmérsékletet és 1467 hPa légnyomást mért a felszínen (Fulchignoni et al., 2005).

Az első színeképelemzős mérések a felszínen jégciklák és szerves anyag jelenlétét állapították meg. A szonda megmérte a légkör pontos összetételét is (Niemann et al., 2005). Eszerint a jelen lévő gázok 95%-a nitrogén, 3%-a metán, a maradék 2% pedig a hidrogén és annak szénnel alkotott különböző vegyületei. A Cassini–Huygens által végzett vizsgálatok kiterjednek a felszínformákra és az azokat kialakító folyamatokra, a felszín és légkör közötti kölcsönhatásokra, a felszín korának meghatározására, a holdon zajló kémiai reakciókra, az időjárást és az azt irányító folyamatokra, az élet kialakulásának lehetőségére és még sok egyéb jellegzetességre.

A szakdolgozat témája szempontjából fontos mérési eredmények és az azokon alapuló tények bemutatására a dolgozat további fejezeteiben kerül sor. A tervek szerint a Cassini küldetése 2017. szeptember 15-én véget ér és a szonda belemerül a Szaturnusz felszínébe. Volt olyan terv, hogy 2016-ban a NASA új űrszondát indít a Titán felfedezésére, a Titan Mare Explore-t, ez a küldetés azonban néhány éve megghiúsult [6 - Universe Today].



5. ábra: A Cassini keringőegység felépítése [7 – NASA/ESA]

2.3. A Cassini-Huygens szondapároson lévő műszerek

A Cassini-Huygens űrszonda-pároson összesen 18 műszer található, 12 a Cassinin és 6 a Huygensen (*Matson et al., 2003*). Közülük sok többféle feladatot is képes ellátni. Az űreszköz összesen 27 különböző vizsgálatra van felszerelve. A Cassini az egyik legnagyobb, legnehezebb és legösszetettebb űrszonda, amit valaha építettek (5. ábra). Tömege 5700 kg. A rajta lévő kamerák és műszerek segítségével képes önállóan pontos méréseket végezni, részletes képeket alkotni különböző légköri adottságok és fényviszonyok esetén. A megszerzett adatokat az antenna-alrendszerének segítségével továbbítja a Földre. A keringőegységen található műszerek (*Matson et al., 2003*) [8 – ESA - Cassini]:

CDA - Cosmic Dust Analyser: jég- és porszemcséket tanulmányoz a Jupiter és a Szaturnusz körüli bolygóközi térben. Megvizsgálja azok fizikai, kémiai és dinamikai tulajdonságait a Naptól, a Jupitertől, a Szaturnusztól, a Szaturnusz holdjaitól és gyűrűjétől való távolságuk függvényében. Megfigyeli a részecskéknek a gyűrűvel, a holdakkal és a magnetoszférával való kölcsönhatását.

CIRS - Composite Infrared Spectrometer: egy kettős interferométerből áll, a légkör, a gyűrűrendszer a holdak és felszínük által kibocsátott infravörös, 7–1000 μm közötti hullámhossz tartományú sugárzást vizsgálja. Mérései eredményeképpen meghatározza az infravörös sugárzást kibocsátó objektum összetételét. A dolgozat szempontjából legfontosabb mérési eredménye számunkra a Titán légkörének összetételében fellépő évszakos változások megfigyelése.

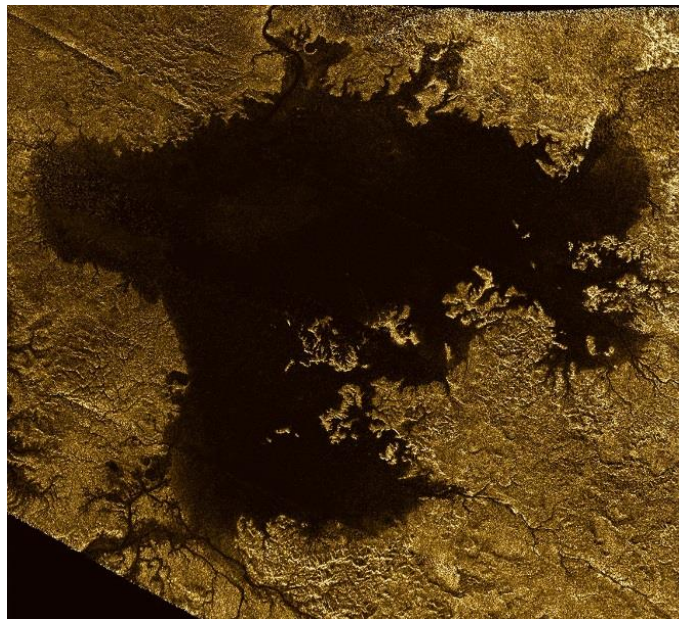
INMS - Ion and Neutral Mass Spectrometer: semleges és töltött részecskéket vizsgál a Szaturnusz és a Titán környezetében, célja, hogy minél több adatot szerezzen azok kiterjedt légköréről és ionoszférájáról.

CAPS: Cassini Plasmaspectrometer: a Szaturnusz mágneses mezejét és a körülötte található ionizált gázt, vagyis a plazmát vizsgálja. Méri az egységnyi felületen áthaladó ionok mennyiségét, illetve azok áramlási irányának a műszerrel bezárt szögét. Vizsgálja a Szaturnusz ionoszférájában található molekulák eredetét, a bolygó mágneses mezejének alakját, elhelyezkedését és a napszél részecskék viselkedését a magnetoszférában. Megfigyeli a szaturnuszi sarki fényt, a bolygó által kibocsátott rádióhullámú sugárzást (SKR), illetve a tengely körüli forgás által vezérelt folyamatokat.

ISS - Imaging Science Subsystem: látható-, közeli infravörös- és közeli ultraibolya tartományban készít képeket.

MAG - Dual-Technique Magnetometer: a Szaturnusz magnetoszféráját és annak a napszél részecskékkal, a gyűrűrendszerrel és a holdakkal való kölcsönhatását tanulmányozza.

RADAR - Cassini Radar: A Titán felszínét térképezi fel (6. ábra), mivel az nem látszik a sűrű légkör és a középső légkörben elhelyezkedő ködréteg miatt. Méri a felszíni magasságkülönbségeket is. Fő feladatai: a Titán metántavai és -tengerei létének bizonyítása, elhelyezkedésük és kiterjedésük felderítése, a hold szilárd felszínének geológiai és topográfiai tulajdonságainak meghatározása, továbbá vizsgálja a Szaturnusz jeges holdjait és a gyűrűk létezésének feltételét.



6. ábra: A Ligeia Mare, a Titán felszínén lévő metántavak egyike a Cassini Radar felvételén [9 – NASA]

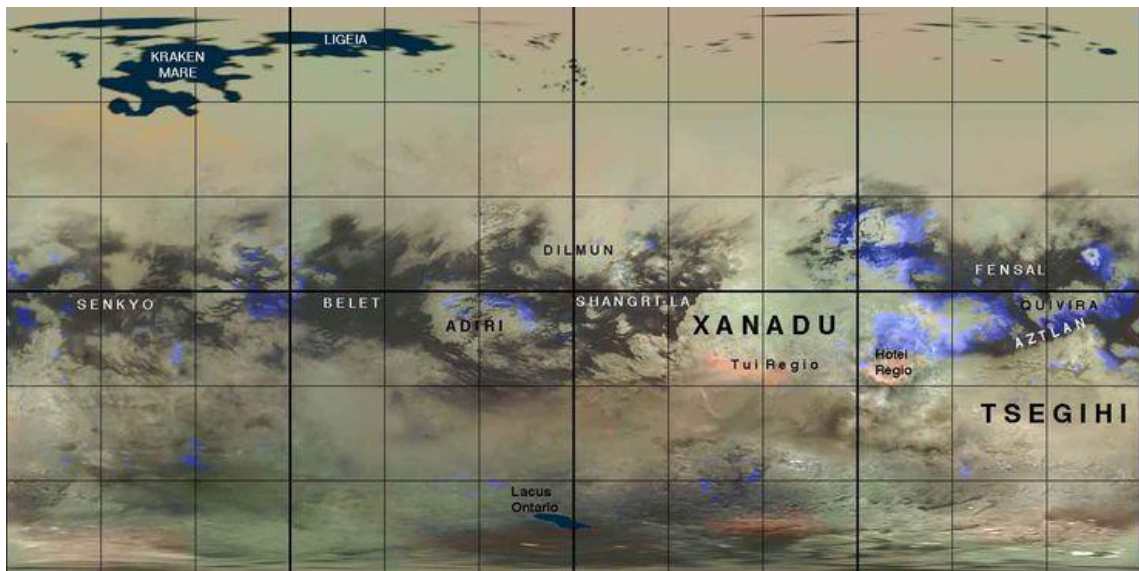
MIMI - Magnetospheric Imaging Instrument: a Szaturnusz magnetoszférájáról, annak a napszél részecskékkal való kölcsönhatásáról és a Napból áramló ionizált gázok áramáról készít képeket.

RSS - Radio Science Subsystem: gravitációs hullámokat keres az Univerzumban, tanulmányozza a Szaturnusz légkörét, gyűrűrendszerét, a bolygó és holdjai gravitációs mezejét az általa kibocsátott rádióhullámok segítségével.

RPWS - Radio and Plasma Wave Spectrometer: vizsgálja a Szaturnuszból kiáramló ionizált gázok alkotta plazmahullámokat, a kibocsátott rádióhullámokat és a keringő porszemcséket.

UVIS - Ultraviolet Imaging Spectrograph: a légkör és a gyűrűrendszer által kibocsátott ultraibolya sugárzást méri, ezáltal következtet azok alakjára és kémiai összetételére.

VIMS - Visible and Infrared Mapping Spectrometer: meghatározza a légkör hőmérsékletét és vegyi összetételét, a felszín és a gyűrűrendszer formáját az általa kibocsátott látható fény és infravörös sugarak visszaverődéséből. A kibocsátott sugárzás hullámhossza 0,35–5,1 μm közötti. Ez a műszer térképezi fel a felszínt (7. ábra), annak ásványi és kémiai összetételének eloszlását. Főbb feladatai: a szelek időbeli viselkedésének, a légköri örvényeknek és a felhők eloszlásának, összetételének meghatározása a Szaturnusz és a Titán esetén. A Szaturnusz jégholdjának, az Enceladusnak a felszínét alkotó anyagok vizsgálata, a Szaturnusz alsó légkörének, belső felépítésének és hőmérsékletének meghatározása. Ezeken kívül még villámok detektálása a Szaturnuszon és a Titánon, illetve az utóbbi égitest szilárd felszínén működő vulkánok keresése [10 – ESA - VIMS].



7. ábra: A Titán felszíne a VIMS által alkotott képen [11 – Jrehling/NASA]

A Huygens leszállóegység 318 kg tömegű, 2,7 méter átmérőjű, kagyló alakú űreszköz. Érzékeny műszereit kemény, ellenálló burkolat védte a leszállás során a Titán légkörének molekuláival való súrlódás során keletkező hőtől. Két részből áll: egy, a Cassinitől való különválás után a leszállóegységre felügyelő félből, amelyen van egy fékező-védőpajzs, és egy, a műszereket tartalmazó félből, melyek bemutatása az alábbiakban történik (Matson et al., 2003) [12 – ESA - Huygens]:

ACP - Aerosol Collector and Pyrolyser: aeroszoloikat gyűjt a Titán légkörében, hogy meghatározza azok kémiai összetételét. A mintavétel úgy történik, hogy az eszközbe

levegőt szívni be, miközben a benne lévő aeroszok fennakadnak a műszer elején kifeszített szűrőn. A műszer az egyes mintavételek alkalmával mintegy 30 µg tömegű aeroszot gyűjt, majd előkészíti azt a kémiai összetétel vizsgálatára. Két magasságban történt mintavétel a leszállás során: az első a 160–40 km-es tartományban, a második 23–17 km-en, ahol a felhőképződés zajlik.

DISR - Descent Imager and Spectral Radiometer: képeket és spektrális méréseket készít olyan szenzorokkal, melyek széles színek tartományban képesek érzékelni. A Titán felszínének elérése előtt néhány száz méter magasan a műszer lámpája bekapcsolt, hogy megvizsgálja, milyen állagú, összetételű talajra fog érkezni a leszállóegység.

DWE - Doppler Wind Experiment: rádió jeleket használ a légkör tulajdonságainak meghatározására. Sikerült detektálnia a légköri szeleket, és miattuk a szonda elsodródását az esés során a kibocsátott jelek Doppler-eltolódásból.

GCMS - Gas Chromatograph and Mass Spectrometer: sokoldalú műszer, mely gázok kémiai összetételének megállapítására alkalmas. Célja, hogy vizsgálja és számszerűsítse a légkör összetételét.

HASI - Huygens Atmosphere Structure Instrument: egy sokoldalú érzékelő „csomag”, mely a légkör szerkezetének, fizikai és elektromos tulajdonságainak mérésére alkalmas műszereket tartalmaz. Képes volt még a becsapódás előtt távolról érzékelni az alatta lévő felszín anyagát, hogy szilárd, vagy folyékony közegbe fog-e becsapódni [13 – ESA – HASI].

SSP - Surface Science Package: egy érzékelő műszer-sorozat, a felszín fizikai tulajdonságainak meghatározására. A szonda azon oldalán található, amelyikkel becsapódott a felszínbe. Tartalmaz egy gyorsulásmérőt, amivel mérni tudta a fékeződést a légkörben az esés során. Méri a levegő hőkapacitását, hőmérsékletét, vizsgálja az optikai tulajdonságait, méri a hangsebességet és a különböző anyagok dielektromos állandóját.

3. A Titán légkörében zajló dinamikai folyamatok

3.1. Bevezetés

A Titán az egyetlen ismert, jelentős légkörrel rendelkező hold a Naprendszerben. Légköri dinamikai folyamatait a hosszúsági körök mentén tapasztalható eltérő mennyiségű besugárzás és az ennek hatására történő aszimmetrikus felmelegedés

befolyásolja. A napfordulókat tartalmazó évszakokban egy aszimmetrikusan elhelyezkedő cirkulációs cella alakul ki. A nyári félgömbön a 30° – 40° szélességek környékén jön létre a felszálló ág a legmeredekebb szögű besugárzás által ért felület fölött, és a téli félgömb pólusának környékén van a leszállóág. Az átmeneti évszakokban, a napéjegyenlőség idején kétcellás cirkuláció alakul ki. Mivel ekkor az egyenlítő környékére érkezik a legnagyobb szögben a besugárzás, ott lesz a légkörzés felszálló ága, a pólusok fölött pedig a két leszállóága. A troposzférában kialakuló cirkuláció a földi Hadley-cellához hasonló légkörzési rendszer, azzal a különbséggel, hogy itt a légáramlatok képesek eljutni a pólusokig, mivel a tengely körüli forgás sebessége nagyon lassú. A Földön azonban a gyors forgás miatt csak jóval szűkebb tartományt fed le a Hadley-cella (Lora et al., 2011).

3.2. A kialakuló évszakok

A Titán a Szaturnusszal együtt 29,5 földi év alatt járja be Nap körüli pályáját, melynek során $26,7^{\circ}$ -os tengelyferdeségéből adódóan négy évszak váltja egymást, így egy-egy évszak átlagosan hét földi éven keresztül tart. Nyár azon a félgömbön van, amelyikre a maximális beesési szögben érkeznek a napsugarak. Mivel nagyobb lesz a beérkező sugárzás mennyisége, a felszín jobban fel tud melegedni, így jobban fűti alulról a fölötté lévő légkört. Ezáltal pedig felszálló légáramlatok indulnak el a felszínről, melyekből felhők képződése válik lehetővé. Az elnyúlt Nap körüli pálya mentén a Titán északi félgömbjének nyara esik a naptávolsági szakaszra, így az hosszabb ideig tart, mint a téli félgömb nyara, mely napközben van (Schneider et al., 2012). A tél arra a félgömbre esik, amelyikre a legalacsonyabb szögben érkezik a besugárzás, illetve amelyen a sarkvidék környékére egyáltalán nem jut el a sugárzás a tengely ferdesége miatt. Mindezek következtében a felszín ezen a félgömbön kevésbé képes felmelegedni, így a hőmérséklet is jóval alacsonyabb értékeket vesz föl. A sugárzás hiányában megszűnnek a fotokémiai reakciók, ennek függvényében évszakosan változik a légkör lokális összetétele. Az évszakok hosszúsága miatt a télen és nyáron kialakuló légkörzés és az ezen alapuló csapadékképződési- és transzport folyamatok, a besugárzás hatására létrejövő kémiai reakciók és a légkör összetételének ezzel arányos megváltozása egy időre stabil rendszerré képes fejlődni. Amikor az átmeneti évszakokban a napsugárzás beesési szöge ismét az egyenlítő vidékén veszi föl a maximális értékét, ez a stabillá vált rendszer viszonylag hirtelen felborul. A besugárzási mennyiség változásának hatására

nyomásváltozások lépnek föl, melyek következtében óriási viharok keletkeznek az alacsonyabb szélességek környékén (*Hueso and Sánchez-Lavega, 2006*).

3.3. A csapadék eloszlásának magyarázata a légkörzés éves menetén keresztül

A csapadék mennyiségének, valamint tér- és időbeli eloszlásának jó nyomjelzői a holdon lévő metántavak. Miután a Cassini–Huygens mérései alapján igazoltta vált, hogy a metán folyékony halmazállapotban képes stabilan megmaradni a holdon (*Stofan et al., 2007*), felvetődött a kérdés, hogy miért csak a magasabb szélességek környékén találhatók metán tavak, illetve miért van belőlük több, és miért nagyobbak éppen az északi félgömbön. Az alacsonyabb szélességek környéke ugyanis leginkább sivataghoz hasonló, száraz terület, ellentétben a poláris területekkel (*Schneider et al., 2012*).

A válasza a légkörzés éves menetének, illetve az erre alapuló légköri összetétel változásának megismerése kapcsán derült fény. Egy adott félgömbön a tavasszal kialakuló kétcellás Hadley-cirkuláció következtében a sarkvidékeken felhalmozódik a metán, mivel egy hideg-csapdába esik. Amikor eljön a nyári csapadékképződés ideje, a felgyülemlett metánból sok felhő képződik, melyekből sok eső esik, ezért a csapadék maximuma mindig a nyári félgömb pólusainak környékéhez köthető. Mivel az északi félgömb nyara naptávolban van és hosszabb, mint a déli félgömbé, csapadékos időszaka is tovább tart, mint a másik félgömbön, ezért lesznek itt nagyobb tavak, melyek közül a legnagyobb a Kraken Mare (*Schneider et al., 2012*). A felhalmozódó metán mennyiségének egy része a folyómedrekben elkezd az alacsonyabb szélességek felé szállítódni a felszínen. Később elpárolog és a következő napéjegyenlőség idején, amikor megfordul a cirkuláció iránya, elszállítódik az ellenkező pólusra. A sarkvidékeken felhalmozódott metán mennyiség a nyár végétől kezdve télig – földi léptékkal szemlélve 15 éven keresztül – fogyni kezd (*Schneider et al., 2012*), [14 – Methane Rains on the Desert].

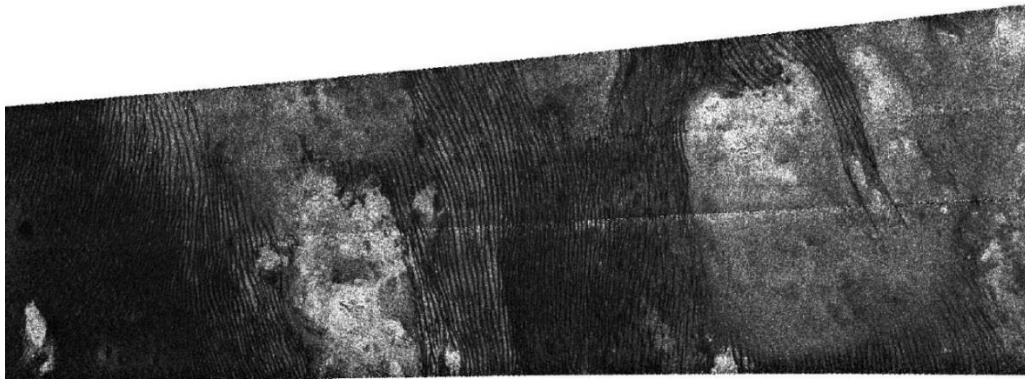
A sarki területek csapadékeloszlása egyenletesebb, mint az alacsonyabb szélességeké, ott ugyanis a csapadékbevitel a napéjegyenlőségekkor kialakuló óriási viharokhoz kötődik, így eső csak évente kétszer fordul elő, de egyszerre hatalmas mennyiségben. A magasabb szélességeken pedig a nyárra jellemző konvektív folyamatok során hosszabb időn keresztül, kisebb, egyenletesebb mennyiségekben érkezik a csapadék (*Schneider et al., 2012*). Troposzférikus felhők elsősorban a közepes és magas szélességeken jellemzőek. Az alacsony szélességeken az év nagy részében a légkör túl stabil zivatarok kialakulására, ez a terület csak a napéjegyenlőségekkor aktív (*Schneider et al., 2012*).

Ebben például különbözik a Földtől, ahol az alacsonyabb szélességeken fekvő területek fölött instabilabb a légkör, itt szinte mindennaposak a záporok.

3.4. A Titán dűnéinek formálódása - felszínformáló viharok

A Titán a Földhöz hasonlóan szilárd felszínnel rendelkezik, melyen folyók, tavak, jégvízsziklák, hegyek és dűnék találhatók. A Cassini felvételein jól látható, hogy a felszínnek csak 15%-át borítják a földi Szaharában lévő homokdűnékhez hasonló képződmények, melyek az egyenlítő környékén helyezkednek el. Ezek a Naprendszerben található dűnék közül a legnagyobbak. Magasságuk több mint 90 méter, hosszúságuk 30–50 km között változik (8. ábra). Nem egyszerű homokból épülnek föl, anyaguk ennél nyúlósabb, viszkózusabb. A dűnék összetételét még nem sikerült a mérések alapján pontosan meghatározni, de annyi bizonyos, hogy szén és hidrogén van az alkotórészei között (*Barnes et al., 2011*).

A földi homokdűnék folyamatosan formálódnak a helyi szelek hatására, a Titán dűnéiről kiderült azonban, hogy rövid ideig tartó erős szelek alakítják (*Radebaugh et al., 2008; Charnay et al., 2015*). Devon Burr és kutatócsapata vizsgálták a dűnék kialakulását és az őket formáló erőket. Számítási eredményeik szerint a dűnék kora 3 000 szaturnuszi év lehet, mely mintegy 88 500 földi évnél felel meg. Sokáig vizsgálták, hogy a Titán felszínén általában jellemző nyugat felé fújó szelek ellenére a dűnék miért éppen az ellenkező irányba néznek és növekednek. Újabb tanulmányaik azt mutatják, hogy az év 95%-ában fújó nyugati szelek nem elég erősek ahhoz, hogy ezt a masszív anyagot formálni tudják. A napéjegyenlőségek idején keletkező ritka, erős trópusi viharok azonban megoldást jelenthetnek a dűnék orientációjának és formálódásának kérdésére. Megfigyelték, hogy 5 km-es magasságban erős keleti szél fúj. A napéjegyenlőségkor kialakuló dinamikai mozgásokat modellezők azt figyelték meg, hogy az egyenlítői metán viharokban leáramlás alakul ki, majd miután elér a felszínig, az egész képződmény kelet felé kezd mozogni az 5 km-es magasságban lévő légmozgások hatására (*Charnay et al., 2015*). Egy ilyen metán viharban 10 m/s-os széllökések is kialakulhatnak, ami tízszer erősebb az átlagos szélsébségnél. Ezek a Titán úgynevezett „hurrikánjai”. Ezen széllökések már magyarázhatják a dűnék orientáltságát, formálódását és nyugat felé való növekedését. Ha a folyamatot jobban megérthetnénk, a légkör jelenébe és múltjába is nagyobb belelátásunk lehetne.



8.ábra: A Titán dűnei a Cassini felvételén [15 – NASA]

A legerősebb viharok akkor tudnak kifejlődni, amikor a levegő metán-páratartalma 80% fölött van. A bennük létrejövő maximális vertikális sebesség 80%-os felszíni relatív páratartalom esetén 20 m/s, maga a feláramlás pedig 30 km-es magasságig képes feljutni, mielőtt energiája felemészthető. 90%-os relatív páratartalom mellett a felszálló légáramlat sebessége 18 m/s. A felhőtető magassága ebben az esetben csak 25 km (*Hueso and Sánchez-Lavega, 2006*). Egy konvektív cella növekedésének és a feláramlásnak tipikus élettartama 1–3 óra, az érett fázisnak, amikor a legintenzívebb a csapadéktevékenység, 2–4 óra, a disszipációs szakasznak pedig 4–10 óra (*Hueso and Sánchez-Lavega, 2006*). A Titán metánviharjai gyengébbek a földi viharokhoz képest. Ez részben annak köszönhető, hogy a hold gravitációja sokkal kisebb ($1,35 \text{ m s}^{-2}$, (*Hourdin et al., 2004*)), részben pedig annak, hogy a metán kondenzációja során keletkező látens hő sokkal kevesebb, mint a víz kondenzációja során keletkező (*Hueso and Sánchez-Lavega, 2006*).

A felhőképződéshez a légrész túltelítettsége és megfelelő mennyiségű kondenzációs mag jelenléte szükséges. A Huygens adatai alapján ezen részecskék sűrűsége a légkörben $1\text{--}50 \text{ db/cm}^3$. Ha a levegő túltelítetté válik, a kondenzációs magok koncentrációja minimum 1 cm^{-3} kell, hogy legyen a konvektív cellában a felhőképződés megindulásához, *Hueso and Sánchez-Lavega (2006)* és *Roe, (2012)* mikrofizikai modellje szerint a cseppek mérete $15 \text{ }\mu\text{m}$ és $4,5 \text{ mm}$ között változhat.

3.5. Léggöri rétegzettség

A felszínhez legközelebb lévő léggöri réteg a határréteg, melyet a felszín, a szelek és a domborzat leginkább befolyásol. Ez a réteg az időjárási jelenségek és a klimatológiai

változások helyszíne. A hold légkörének vastagsága és átlátszatlansága miatt az erről kapott információk először zavarosnak tűntek. A Voyager-1 szonda a mérései alapján 3,5 km-re becsülte a határréteg magasságát, a Huygens azonban csak 300 m vastagságúra. Hogy megoldják a rejtélyt, kifejlesztettek egy háromdimenziós modellt, amely azt mutatja meg, hogy a légkör hogyan reagál a Napból érkező sugárzás időbeli változására. A szimuláció által kiderült, hogy az alsó légkör két rétegre osztható, melyek hőmérsékletükben egyaránt elkülönülnek a felsőbb légrétegektől és mindkét réteg érzékenyen reagál a felszíni hőmérséklet megváltozására. Az alsó réteg sekély, felső határa 800 méterig emelkedik a nap folyamán, az efölött elhelyezkedő pedig átlagosan 2 km vastagságú, kiterjedése évszakosan változik (*Charnay and Lebonnois, 2012*). Így a korábbi, és az újabb mérések is egyaránt értelmet nyertek. A határrétegben található a troposzféra alsó rétege.

A troposzféra 44 km vastag, átlagos hőmérséklete 80 K (*Imanaka et al., 2004*). Fölötte a tropopauza helyezkedik el. A sztratoszféra alsó része statikusan stabil, mely extrém hideg hőmérsékleti értékeket vesz föl a téli pólus fölött, és meleget a nyári pólus fölött. A középső sztratoszférában az egyenlítő fölött fordulnak elő a legmagasabb hőmérsékleti értékek, innentől a pólus felé erős hőmérséklet csökkenés tapasztalható a téli félgömbön. A sztratopauza a nyári félgömb pólusa és a 45° szélesség között viszonylag állandó magasságban, a 0,1 hPa-os nyomási szinten, mintegy 300 km-en található, de onnan viszonylag gyorsan emelkedik a magassága egészen a téli félgömb pólusáig, ahol már a 0,01 hPa-os nyomási szinten, azaz 400 km magasságban van (*Strobel et al., 2009*). A középső légkörbe a felszín felett 200–500 km magasságban található réteg tartozik. Tetején, mintegy 380–500 km magasságban egy szénhidrogén molekulák összesűrűsödéséből álló ködréteg található, mely a dinamikai mozgások következtében elkülönül a légkör többi részétől, és jelentős mértékben módosítja a légkör optikai tulajdonságait (*Teanby et al., 2012*). A beérkező sugárzás egy részét visszaveri, illetve elnyeli, és ezáltal az alsóbb tartományokban kialakuló hőmérsékletet lényegesen befolyásolja. Maga a sztratoszféra is a köd jelenlétének köszönhetően jön létre (*Lavvas et al., 2008a*). A ködréteg alatt nem sokkal egy jelentős dinamikai folyamat zajlik. A Titán légkörében lévő erős zonális áramlások sebessége a 200–300 km-es magasságban éri el a maximum értékét. Ebben a magasságban a légkör 10-szer nagyobb sebességgel forog, mint a szilárd felszín, tehát szuperrotál. Ez a sokak által modellezett, és a valóságban is lejátszódó dinamikai folyamat magyarázható az úgynevezett Gierasch–Rossow mechanizmussal, melyet a Vénusz légkörének szuperrotációja kapcsán alkottak meg

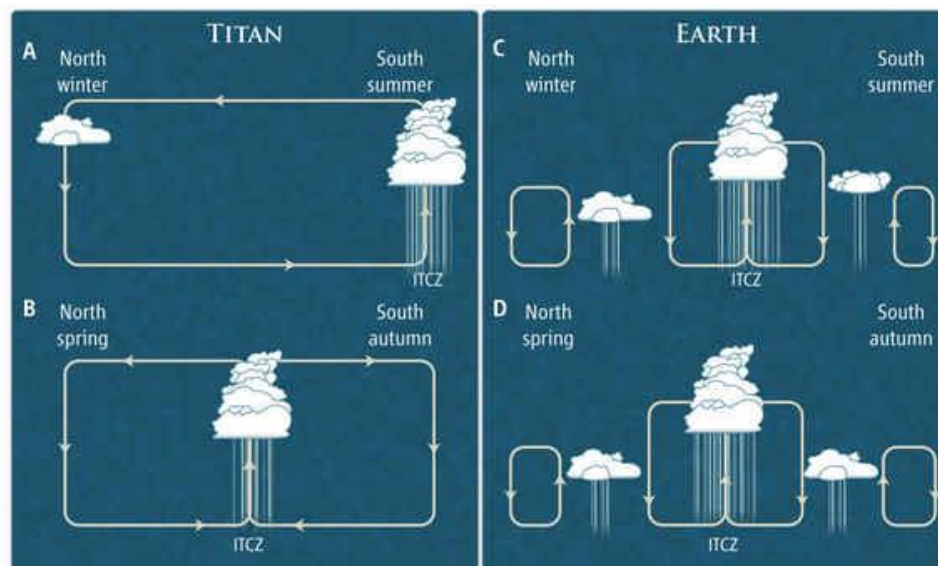
(Gierasch, 1975). Az egyenlítőtől a pólusokig érő Hadley-cella felszállóágának nettó légtömeg transzportja képes létrehozni és fenntartani egy perdülettöbbletet a magasabb légköri tartományokban, mivel a perdület az egyenlítőnél nagyobb, mint a pólusokon. Ebből az következik, hogy több perdület szállítódik a magasabb szélességek felé a Hadley-cella magaslégkörben haladó ágában, mint amennyi a felszínközeli, egyenlítő felé haladó ágban van. Így a meridionális cirkuláció következtében, a téli félgömbön létrejön egy intenzív áramlás a pólus körül, hasonlóan a földi jet streamhez.

Fontos megemlíteni, hogy a Titán lassú tengely körüli forgása miatt (15 földi nap) a Hadley-cella képes elérni az egyenlítőtől a pólusokig. A modellezett és a Titán esetében a valóságban lejátszódó szuperrotáció között az a jelentős különbség, hogy a hold tengelyferdesége miatt évszakosan változik a Hadley-cella kiterjedése, ezért a folyamat valójában csak a napéjegyenlőségek körül alakul ki, amikor a globális légkörzés két, az egyenlítőtől a pólusokig terjedő Hadley-cellából áll (Hourdin et al., 2004). A felsőlégkör – 600 km fölött – rendkívül kis sűrűségű, ez a tartomány kapja a legtöbb fényt, mivel itt semmilyen légköri képződmény nincs, ami akadályozná a beérkező sugárzást. Itt található az ionoszféra, és itt zajlik a legtöbb fotokémiai reakció, melyek befolyásolják az alsóbb légköri tartományokat, és változtatják a légkör összetételét (Lavvas et al., 2008a). A legfontosabb reakciók és következményeik részletesebb bemutatása a későbbiekben történik.

3.6. Felhőképződés

A felhőképződés a Titánon a légkörzés eredményeképpen alakul ki egy adott terület fölött, amiatt, hogy a felszálló légáramlatokkal emelkedő légréteg lehűl és a benne lévő metán kicsapódik (9. ábra). Felszálló légáramlat ott alakul ki, ahol a felszínen összeáramlás következtében felhalmozódnak a légtömegek, illetve, ahol a besugárzás hatására felmelegedett felszín átadja a hőt a fölette lévő légtömegeknek, aminek hatására a légrétegződés instabillá válik. Összeáramlás azonban nem csak a felszínen, hanem a magasban is kialakulhat, ennek következtében pedig – szintén a légtömegek felhalmozódása miatt – leáramlás alakul ki. Az összeáramlás helyét mind az egyenlítőnél a felszínen, mind a pólusok fölött a magasban konvergenciazónának nevezzük, mely a Titánon az évszakok váltakozásával nagymértékben változtatja a helyét (Tokano, 2011).

A felhőképződési mechanizmusok függvényében kétféle felhőtípust különböztetünk meg (Barth and Rafkin, 2007; de Kok et al., 2014).



9. ábra: A Titán és a Föld légköri rendszerének változása az évszakokkal (Tokano, 2011).

3.6.1. A sarki felhők

A Titánon 2009-ben bekövetkezett napfordulóval a déli félgömb nyara elmúlt, kezdetét vette az ősz. 2012 májusában egy többszáz km átmérőjű örvénylő felhőtömeget vettek észre a déli pólus fölött a Cassini felvételein (de Kok et al., 2014). A napéjgyenlőség idejétől távolodva egyre inkább az északi félgömbön lévő légtömegeket kezdte el nagyobb mértékben melegíteni a Nap, melynek hatására kialakult egy felszálló légáramlat és megindult a déli félgömb felé. Lassan feloszlott az átmeneti évszakokra jellemző kétcéls cirkuláció, és a konvergenciazóna a déli pólus fölé helyeződött, alatta pedig létrejött a cirkuláció leszálló ága. A felhalmozódó légtömegében megindult a kondenzáció és 300 km magasságban felhők jöttek létre, ami nagyon meglepő volt, mivel az addigi becslések szerint ebben a magasságban már túl meleg van a felhőképződéshez (de Kok et al., 2014).

A jelenség kiváltó okát a Titán légköréről visszaverődő sugárzás spektrumának vizsgálata során találták meg, mivel abból következtetni lehet a jelenlévő molekulákra, így megállapítható a légkör összetétele is. A sarki örvény felől visszaverődő sugárzás jelentős különbséget mutatott a légkör többi része felől visszaverődött sugárzáshoz képest. A vizsgálat során kimutatták, hogy a sarki felhők fagyott hidrogén-cianid molekulákból állnak (10. ábra). A hidrogén-cianid egyike a Titán légkörében kis mennyiségben jelenlévő molekuláknak, mégis jelentős szerepe van a felszíni hőmérséklet kialakításában a légkör sugárzásáteresztő képességét módosító hatása miatt. Ahhoz, hogy

fagyott állapotban kondenzálódni tudjon, -148°C -os hőmérséklet szükséges. Ez körülbelül 100°C -al hidegebb annál, amit erre a magasságra a modellek számítottak. A felhőörvény fölött és alatt korábban mért hőmérsékleti adatok azt mutatják, hogy a déli félgömb gyorsan lehűlt a nyári felmelegedés után, így a 300 km-es magasságba a levegő hőmérséklete elérte azt az értéket, amelyen a hidrogén-cianid (HCN) kondenzációja lehetővé válik. A gyors hűlés a hidrogén-cianid jelenlétének és a légköri cirkulációnak a következménye, melynek során a napéjegyenlőségkor gáztömegek áramlása indult meg a déli félgömb felé. Amikor a hidrogén-cianid ennek következtében a póluson felhalmozódott, elkezdte egyre nagyobb mértékben elnyelni a napsugárzást és infravörös sugárzás formájában a felszín és a világűr felé leadni az így szerzett energiatöbbletet. Ennek következtében a felszínre már csak egy kis hányada volt képes eljutni a légkör tetejére érkező sugárzásnak.

Ezt a folyamatot hívják a kutatók „anti-üvegházhatásnak”, mely a hold légkörének teljes felületén jelen van, de a téli félgömbön mindig sokkal erősebben, mint a nyárin (*de Kok et al., 2014*). A légkör összetételének szezonális változása a légköri cirkuláció következtében tehát hatással van a felszíni hőmérséklet alakulására. A felhőörvény mindig a következő napéjegyenlőségig áll fenn, annak közeledtével folyamatosan fölemészttődik és szétoszlik – amint ez 2009 előtt az északi félgömb telének végével is megfigyelhető volt a Cassini felvételei alapján (*Le Mouélic et al., 2012*). A felhőörvény aktivitásának csökkenése a pólusok fölötti leszálló légáramlatok megszűnésének következménye a tavasz beálltával (*de Kok et al., 2014*). Az „anti-üvegházhatás” folyamatának kiegészítéseként itt említeném meg, hogy a Titán légkörében működik az üvegházhatás jelensége is, a légkörben található N_2 , CH_4 , és a H_2 jelenlétének köszönhetően (*McKay et al., 1991*). Ezek a molekulák a felszín által kibocsátott hosszuhullámú sugárzást nyelik el, melynek hatására gerjesztett állapotba kerülnek, és rezegni kezdenek. Az általuk elnyelt energiát minden irányba kisugározzák a relaxációjuk során, így az visszajut a felszínre is, és csak egy része távozik a világűrbe. A felszínközeli tartományban ilyen módon megmaradó energia mennyiségével arányos a hőmérséklet értéke is, ezért lesz annál melegebb, minél több energia továbbítódik vissza a felszínre. A korábban említett „anti-üvegházhatás” ennek fordítottjaként működik, mivel a felhalmozódó hidrogén-cianid a Napból érkező sugárzást akadályozza abban, hogy elérje a felszínt, míg az üvegházhatás során a felszín felől távozó hosszuhullámú sugárzás számára jelentenek akadályt a metán, a nitrogén és a hidrogén molekulák. Az

üvegházhatás 12 K-el növeli a felszíni hőmérsékletet, az anti-üvegházhatás pedig 9 K-el csökkenti, így alakul ki az átlagos 94 K-körüli hőmérséklet (McKay *et al.*, 1991).



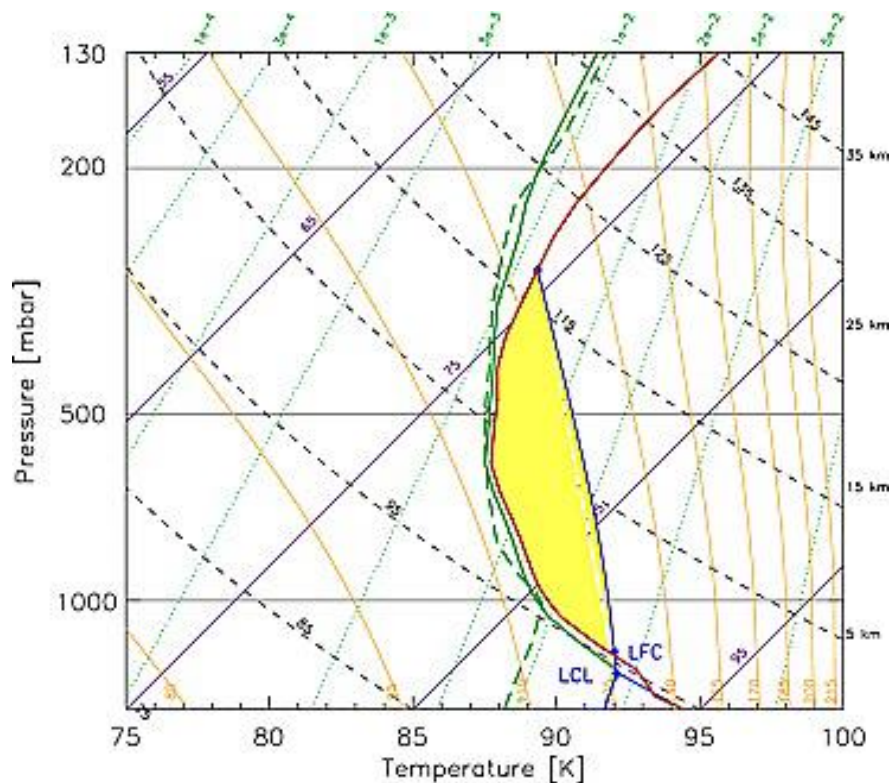
10.ábra: Hidrogén-cianid felhő alkotta örvény a pólus felett [16 - NASA]

3.6.2. Konvektív felhők képződése

A konvektív felhők aszimmetrikus eloszlásúak, mindig a nyári félgömb közepes és magasabb szélességeinek környékén képződnek. Ez a globális légkörzés eredményeképpen alakul ki. A besugárzás által a felszín felmelegszik, ami labilissá teszi a légrétegződést (Brown *et al.*, 2010). A sugárzás által felmelegedő felszín fölött felszálló légáramlatok indulnak el, melyek emelkedésük során elérhetik azt a szintet, amelyen a hőmérséklet elég alacsony ahhoz, hogy a bennük lévő metán kondenzációja elkezdődjön. Így elindul a metán felhők képződése, melyből adott esetben csapadékhullás is lehetővé válik. Ahhoz, hogy egy légréteg telítetté váljon, emelkedése során el kell érnie az emelt konvekció szintjét (LCL). Hogyha valamilyen kényszer hatására a légréteg ennél tovább emelkedik, megindul a kondenzáció. Az ehhez szükséges energiát maga a légréteg fedezi, ezért hűlni fog az emelkedés során. Amennyiben a kényszeremelés a labilis rétegződés alsó határáig tart, a légréteg eléri a szabad konvekció szintjét (FCL), ahonnan már kényszer nélkül is képes gyorsulva tovább emelkedni egészen addig, amíg el nem fogy a lendülete. Itt lesz a légréteg emelkedése közben kialakult konvektív felhő teteje.

Griffith *et al.* (2000) vizsgálták a Titán légkörének stabilitását és megállapították, hogy az emelt konvekció (LCL) jellemző szintje 60%-os felszíni nedvességtartalom esetén 2 km, a szabad konvekcióé (FCL) pedig 5,5 km magasságban található, 80%-os felszíni nedvességtartalom esetén pedig az LCL 2 km alá süllyed. A konvektív felhők jellemző élettartama néhány óra, magasságuk a felszíntől 25 km-re tehető, elhelyezkedésük pedig

legfőképp a nyári félgömb pólusa és a 40° között jellemző, szemben a poláris HCN-felhőkkel, melyek élettartama több földi éven keresztül tart, többszáz km magasságban találhatók a téli félgömb pólusa fölött. A konvektív felhők képződése során az LCL jellemző szintje a Titán és a Föld esetében hasonló magasságba tehető, bár a Titán konvektív felhői magasabban helyezkednek el, mint a földi cumulusok. A felhőképződés élettartama is hasonló nagyságrendű, mind a két égitest esetében néhány órás időtartamot jelent. Az egyesített dinamikai és mikrofizikai modell, a Titan-RAMS szimulációi szerint a holdon a felhőelemek jellemző mérete 0,4 μm és 5 mm közötti, ami szintén hasonló a földön képződő felhőelemek méretéhez (Barth and Rafkin, 2007). Az ennél nagyobbra növvő cseppek szétesnek a felszín felé zuhanás közben.



11. ábra: Ferde diagram: a Titán légkörében zajló konvekció ábrázolása (magyarázat a szövegben) (Barth and Rafkin, 2007)

A 11. ábrán egy ferde diagram látható, melyet a Huygens leszállóegységnek a légkörön való keresztülhaladása során mért adatai alapján készítettek. A diagram alsó tengelyén a hőmérséklet, erre merőlegesen pedig a nyomás logaritmikus függvénye látható. A piros folytonos vonal a hőmérséklet változását ábrázolja a magasság függvényében. A folytonos zöld vonal egy Lellouch et al., (1989) által feltételezett metánprofil a Voyager szonda által végzett mérések kiértékelése alapján, a szaggatott zöld vonal pedig a Huygens mérései alapján felállított vertikális metán profil (Niemann et al., 2005). A kék

folytonos vonal a felszíntől emelkedő légrész állapotát ábrázolja a különböző magasságokban. A piros és a kék vonalak által határolt sárga színű terület a konvektív hasznosítható potenciális energia (CAPE) mennyiségét jelöli. A fekete folytonos vonalak az izobárok, a lila folytonosak az izotermák, a szaggatott fekete vonalak a száraz adiabaták, a narancssárga szaggatottak pedig a nedves adiabaták.

3.7. Légköri elektromosság kérdése

Elméletileg létezhetnek villámok a Titánon, hiszen jelentős sűrűségű légkörrel rendelkezik, melyben van konvektív felhőképződés, és amennyiben szilárd fázisú részecskék is találhatók a felhőben, azok az intenzív légáramlatok hatására ütköznek és súrlódnak egymással. Ez töltésszétválást okoz a molekulákban, ezt követően pedig a felhajtóerő hatására a különböző töltéssel rendelkező részecskék eltávolodnak egymástól. Ahogy a töltésszétválás egyre intenzívebbé válik, egyre nagyobb lesz a feszültség a feláramlás területén. Ez a feszültség egyenlítődik ki a villámlás során, ami negatív töltésű részecskék árama. Annak ellenére, hogy egyik űreszköz sem észlelt még villámtevékenységet a Titán légkörében, a kutatók egy része mégsem zárja ki a légköri elektromosság jelenlétét, és abban reménykednek, hogy az itteni viharokat is kíséri elektromos tevékenység. A legtöbb, légkörrel rendelkező égitest esetében már sikerült bizonyítani a villámok jelenlétét, és a feltételek elméletileg a Titánon is adottak. Valószínűleg, hogyha vannak is villámok a hold légkörében, akkor nagyon ritkán fordulhatnak elő.

A mennydörgés észlelése speciális feladat, mivel a hold légkörében a hang terjedése valamelyest más, mint a földi légkör esetén. A villámcsapás hatásának és a mennydörgés pontos hangzásának modellezésével két kutatócsoport is foglalkozik, hogy a detektáláshoz szükséges eszközök lehetőség szerint megfelelőek legyenek. Ehhez figyelembe kell venni azt is, hogy nem a villámlás által okozott mennydörgés az egyetlen hangforrás a holdon. *Petculescu and Lueptow (2007)* készítettek egy fokozatos skálát azon hangzásokról, amelyeket hallani lehet a Titán felszínén, a metán-patakcsörgedezéstől a távoli mennydörgésig minden elképzelhető zajt figyelembe véve. Annak modellezésére, hogy egy ott sétáló ember mit hallhatna, tudományos dokumentumfilmeket, planetáriumi bemutatók anyagát és sci-fi filmeket próbálnak alapul venni, majd a lehetséges hangzások közül ki kell szűrni a légköri elektromosság okozta hangokat. A modellje szerint a villámlás által keltett hangok 100 és 20 Hz közötti

frekvenciájúak lehetnek. A Titán akusztikai szempontból jobb, mint a Föld, a hang itt tovább terjed, mint a Földön, a Marson, vagy a Vénuszon, ezért a mennydörgés, illetve minden ottani hangzás a megszokottnál nagyobb távolságból is detektálható (*Petculescu and Lueptow, 2007*), [17 - Thunder on Saturn] [18 - Thunder Could Help Track Lightning]. A villámok létének bizonyítására azonban nem csak a mennydörgés okozta hangjelek azonosítása az egyetlen mód. A villámlás kémiai reakciók, átalakulások sorozatát képes indukálni, melyek további jó potenciális nyomjelzők lehetnek. A Voyager-1 elhaladását követően már feltételezték a villámok jelenlétét, és azt, hogy azok hatására jelentős mennyiségű hidrogén-cianid (HCN), molekuláris szén és nitrogén keletkezhet, melyekről kimutatták, hogy a Titán légkörének alkotórészei.

Plankensteiner et al., (2007) szerint a villámlás olyan bonyolult kémiai reakciók energiaforrása is lehet, melyek során a jelen lévő szerves molekulákból az élet kialakulása válhat lehetővé. A Titánon feltételezett villámok által indukált lehetséges kémiai reakciókat és azok hatásait a légkörben *Kovács and Turányi (2010)*, valamint *Fischer and Gurnett (2011)* vizsgálták. Az alábbiakban az ő modelljeiket és számítási eredményeiket mutatom be. A troposzféra alsó részében a jellemző hőmérséklet -180°C , így a nitrogén és a metán kémiai reakciók során való termelődése nagyon lassú folyamat. A légköri elektromos tevékenység azonban gyorsan végbemenő reakcióknak biztosít feltételeket. Modelleket készítettek arról, hogy egy villámlást követően hogyan változik időben a légkör hőmérsékleti profilja, és ennek függvényében szimulációk segítségével megbecsülték, hogy az indukált kémiai reakciók során milyen anyagok keletkezhetnek. A villámlás magas hőmérsékletet idéz elő, amely a felszínen is olyan kémiai reakciók végbemenetelét teszi lehetővé, melyek egyébként csak a magas légkörben zajlanak. Hogyha feltételezzük, hogy van légköri elektromos tevékenység a Titánon, akkor *Borucki et al. (1984)* állítására alapozva – mely szerint valószínűleg a holdon a villámok energiájának felemésztődése kisebb mértékű, mint a Földön – elmondhatjuk, hogy a légköri elektromos tevékenység nagyobb mértékben hozzájárulhat a légköri hidrogén-cianid és a dicián (C_2N_2) képződéséhez, mint a Napból érkező ultraibolya sugárzás. A modell szerint a villámcsatorna 2,5 cm széles keresztmetszetű és a benne rövid ideig uralkodó hőmérsékletet 30 000 K-re becsülik. A villámlás azonban gyorsan lezajlik, így a hőmérséklet csökkenni kezd, melynek eredményeképpen újabb, bonyolultabb molekulák keletkeznek a létrejött nitrogén és metán alkotta vegyületekből. Az ezután beálló alacsony hőmérsékleten az így keletkezett molekulák bomlása elhanyagolható, így lesznek képesek felhalmozódni az alsó troposzférában (*Kovács and Turányi,*

2010). Amennyiben léteznek villámok a Titánon, az általuk kibocsátott rádiójelek detektálhatók a Cassini szonda RPWS műszere számára, így egy újabb mód nyílik létezésük bizonyítására. Ehhez azonban meg kell vizsgálni, hogy a rádiójelek képesek-e áthaladni a hold ionoszféráján (*Fischer and Gurnett, 2011*). A Voyager-1 és a Cassini korábbi és újabb mérései alapján a Titán légkörében két meghatározott magasságban van egy-egy hasonló nagyságú elektronsűrűségi szint. Ezek közül a felsőt definiálták először, mely az ionoszféra tetején, 1200 km-es magasságban helyezkedik el. Az alacsonyabb szint 500–600 km körülre tehető. Mindkét helyen $1000\text{--}3000\text{ cm}^{-3}$ körüli az elektronsűrűség. Az ionoszférára jellemző plazmafrekvencia 280–490 kHz, amely a felszín felől érkező egyéb rádióhullámokat leárnyékolja, így azok nem tudnak keresztülhaladni az ionoszférán. (A plazmafrekvencia szemléletesen azt mondja meg, hogy egy ion, és egy hozzá képest kicsit elmozdított elektronoszlop hogyan oszcillál egymás körül. Amennyiben – külső mágneses tér nélküli esetben – egy transzverzális elektromágneses hullámot bocsátunk a plazmára, a plazmafrekvenciánál kisebb frekvenciájú sugárzás nem tud a plazmába hatolni (*Kocsis, 2014*)).

A Cassini közelrepülései során megvizsgálták, hogy a villámlás által kibocsátott rádiójelek képesek-e áthaladni az ionoszférán és így detektálhatók-e az RPWS által. A mérések során kiderült egyrészt, hogy a hold Nap felőli oldalán mindig nagyobb az elektronsűrűség, mint az éjszakai oldalán. Másrészt az egyik közelrepülés során, amikor a keringőegység egészen közel került a Titánhoz, megállapította, hogy az 550 kHz feletti rádióhullámok számára nem jelent akadályt a hold ionoszférája, a villámok által kibocsátott jelek frekvenciája pedig meghaladja ezt, tehát elméletileg detektálhatók lennének a Cassini számára. A gyakorlatban azonban szinte lehetetlen azonosítani a Titán villámjai által kibocsátott rádiójeleket 1 MHz alatt, mivel ez a frekvenciatartomány túlnyomórészt a Szaturnusz által kibocsátott természetes, rádióhullámú sugárzás (SKR) tartománya. Rengeteg robbanáshoz, kitöréshez hasonló jelet detektált már a Cassini műszere, ám azok a Szaturnusz villámjai voltak, nem a Titáné. A Jupiter villámjait szintén nem rádiójelek vételével határozták meg annak idején, mivel a kibocsátott jelek vagy nem tudtak áthaladni a Jupiter ionoszféráján, vagy lassú kisülésű villámok lehettek. Mindkét variáció lehetséges a Titán esetében is, talán ezért nem sikerült még eddig villámot észlelni a hold légkörében (*Fischer and Gurnett, 2011*).

4. A légkör részecskéinek fotokémiai reakciója

4.1. A középső légköri köd

A Titán légkörének legszembevetőbb vonása a középső légkörben található Los Angeles-i típusú szmoghoz hasonló ködréteg, melyet először a Voyager űrszondák figyeltek meg (*Rages and Pollack, 1980*). Jellegzetes narancssárgás színe van és képződése a hold légkörében zajló fotokémiai folyamatokhoz kapcsolódik. A középső légkör dinamikai mozgásainak következtében a köd a többi légköri tartománytól elkülöníthető réteget képez (*Teanby et al., 2012*). A policiklusos aromás szénhidrogének (PAH) a Földön jól ismert rákkeltő és környezetszennyező anyagok, melyek szén, olaj, szemét, és egyéb szerves anyag tökéletlen égésének következményeként kerülnek a levegőbe. Ezek az anyagok, mint a mérések alapján kiderült, a hold sztratoszférájának tetején elhelyezkedő ködrétegnek is összetevői.

Egy, Bianca Maria Dinelli által vezetett olasz kutatócsoport a Titán légkörét alkotó különféle molekulák által kibocsátott infravörös sugárzást vizsgálta a VIMS által végzett mérések kiértékelésével. Munkájuk során egy rendhagyó jelet észleltek, melyről eleinte nem tudták, milyen anyagból származó kibocsátás lehet, de azt megállapították, hogy ennek a légköri összetevőnek a kiterjedése 600–1250 km közé tehető és maximális mennyiségben a 950 km-es magasságban van jelen. (*Dinelli et al., 2013*). Ennek központi hullámhossza 3,28 μm körüli, mely jellemző az aromás vegyületekre, tehát olyan molekulákra, melyeknél a szénatomok gyűrűs szerkezetben kapcsolódnak egymáshoz. Miután kizárták az egyszerűbb molekulákat azok közül, melyek ilyen sugárzást bocsáthatnak ki, azt állapították meg, hogy az észlelt jel sok különböző policiklikus aromás szénhidrogén keverékének eredményeképpen létrejött molekula sugárzásából származik. Átlagosan 34 szénatomot tartalmaznak, melynek mindegyikéhez 10 gyűrű kapcsolódik. Az egyesített dinamikai és mikrofizikai modell, a Titan-RAMS szimulációi alapján a ködöt alkotó részecskék nagysága $1,3 \times 10^{-4}$ – 3,35 μm közötti értékeket vehet föl (*Barth and Rafkin, 2007*). Több tanulmány is megerősíti, hogy a köd és az alsóbb légköri tartományokban található szerves aeroszolok képződése már a felső légkör tetején elkezdődik (*Waite et al., 2007; Lavvas et al., 2008a; Brown et al., 2009*). A folyamat egészének felfedezésével a Titán légkörében zajló szerves kémiai folyamatok sokkal teljesebb megértése vált lehetővé. (*Brown et al., 2009*) leírása alapján INMS műszer közvetlen mérései során nagy mennyiségű szerves molekula – sokféle nitril és

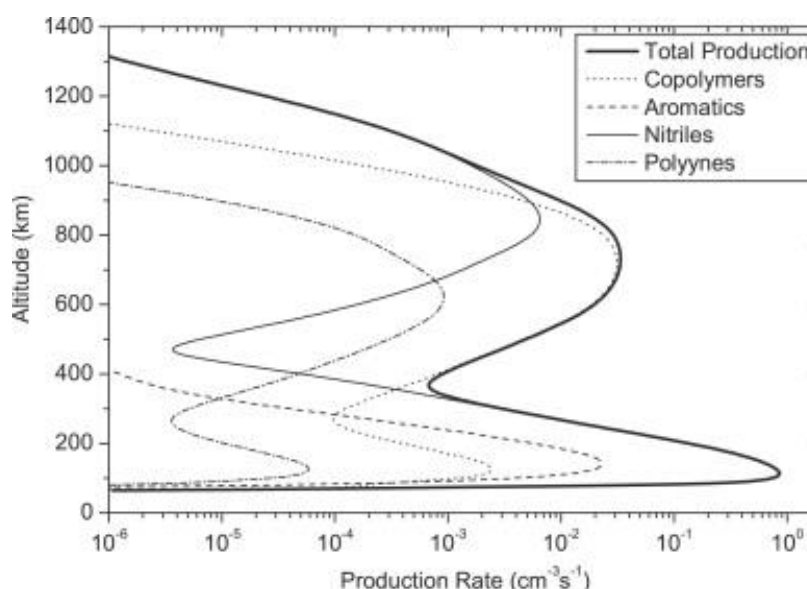
szénhidrogén – jelenlétét állapították meg a felső légkörben, melyek ki vannak téve a napsugárzás hatásának és Szaturnusz magnetoszférájában száguldó energikus részecskékkel való ütközéseknek. Ilyen körülmények között a felső légkör a molekulák fotokémiai bomlásának következtében szerves vegyületek képződési helyévé válik, mely egyedülálló a Naprendszerben (*Brown et al., 2009*). A szénhidrogén molekulák reakcióit tovább fokozza a hidrogén szökése a világűrbe, melynek során párosítatlan elektront tartalmazó molekulák jönnek létre. Ezek reaktívabbak lesznek, így meggyorsítják a telítetlen szénhidrogén- és nitritfajták képződését. Az INMS nagy mennyiségű negatív töltésű ion, naftalin (C₁₀H₈), antracén (C₁₄H₁₀) és benzol (C₆H₆) jelenlétét is kimutatta az ionoszférában (*Brown et al., 2009*). Ezek a műszer által kimutatott vegyületek a PAH molekulák képződéséhez szükséges prekursor anyagok, vagyis olyan vegyületek, melyek a PAH molekulákat előállító kémiai reakcióban vesznek részt. Az ilyen módon meginduló kémiai láncreakciók végén a megmaradt elektronokból és pozitív töltésű ionokból szénhidrogén molekulák lesznek, többek között policiklikus aromás szénhidrogének is, melyek a kisebb szénhidrogén molekulák összekapcsolódásából jönnek létre. Mivel nagy molekulatömegű részecskékből állnak, súlyuk miatt egyre alacsonyabbra süllyednek a légkörben, egészen a sztratoszféra tetejéig, ahol felhalmozódnak. Így hozzák létre a ködréteget, mintegy 500–380 km-es magasságban. (*Lavvas et al., 2008a*) leírása szerint a nitrogén és a metán, melyek a légkörben leggyakrabban előforduló elemek, disszociálnak a Naptól érkező ultraibolya sugárzás, a Szaturnusz mágneses terében található energikus részecskék és a kozmikus sugárzás hatására. A Titán légkörének komplex kémiai folyamatai ezen fotodisszociációkkal, illetve ionizációkkal kezdődnek és komplex szerves vegyületek kialakulását eredményező reakciók sorozatát eredményezik. A metán fotolízise az ultraibolya sugárzás energiájától függően:



A nitrogén fotolízise az ultraibolya sugárzás energiájától függően (Lavvas et al., 2008b):

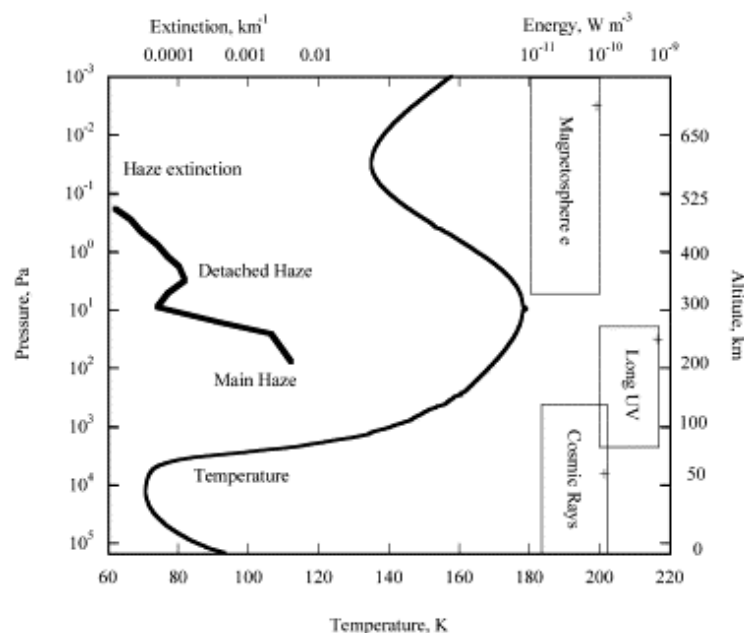


A kémiai folyamatokat modellezők úgy vélik, hogy a meginduló reakciók mindegyike szénhidrogének képződéséhez vezet, melyek több mint 10 szénatomot tartalmaznak. Ezek az úgynevezett tholinok alkotják a ködöt, mely a fotokémiai reakciók végeredményeképpen jön létre a sztratoszféra tetején (Lavvas et al., 2008b).



12. árba: A ködrészecskék képződésének vertikális profilja (Lavvas et al., 2008a)

A 12. ábrán látható, hogy a magas légkörben zajló reakciók hatására képződő molekulák egyre nagyobb sűrűséggel fordulnak elő a magasság csökkenésével a ködréteg jellemző szintjéig. A köd helyét legjobban az aromás vegyületek gyakoriságának csúcsa rajzolja ki. Jól látható az is, hogy a ködréteg alján, közel 400 km-es magasságban van a teljes termelődési arány minimuma.



13. ábra: A nyomás és a hőmérséklet változása a Titán légkörében, az egyes magasságokban jellemző kémiai reakciók energiaforrásaival, melyek: a Szaturnusz magnetoszférája, az ultraibolya sugárzás és a kozmikus sugárzás (Imanaka et al., 2004).

A fotokémiai reakciók során termelődő részecskék a légkör különböző magasságaiban különböző optikai tulajdonságokat mutatnak. Imanaka et al. (2004) kimutatta, hogy a légnyomás értéke meghatározza az egyes magasságokban végbemenő reakciók típusát, ezzel a légkör optikai tulajdonságait is, mivel a különböző nyomási szinteken az egyes reakciók során eltérő vegyületek jönnek létre. Szimulációja szerint a szén/nitrogén arány növekszik, az aromás vegyületek és a nitrogén tartalmú policiklikus aromás vegyületek száma pedig csökken a nyomás növekedésével. Ahol több tholin keletkezik, ott nagyobb lesz a sugárzás elnyelődése is. Khare et al. (1984) volt az első, aki laboratóriumi mérései során vizsgálta a ködöt alkotó részecskék koncentrációjának függvényében kialakuló légköri optikai tulajdonságokat. Az égitestre eső fény a felszíni- és légköri tulajdonságok függvényében verődik vissza. Egy elméletben létező idealizált, az égitestével megegyező keresztmetszetű sík felület teljesen visszaveri a rá eső fényt. A két érték hányadosa egy dimenzió nélküli szám, az égitest geometriai albedója, mely a Titán légkörében a ködöt alkotó részecskék sugárzás elnyelő- és visszaverő tulajdonságaitól nagymértékben függ. A geometriai albedó értékével arányosan változik a törésmutató értéke is, amely azt mutatja meg, hogy egy adott közegben (itt a Titán légkörében) az elektromágneses sugárzás milyen sebességgel terjed a vákuumbeli terjedési sebességhez képest (Budó et al., 1977).

A laboratóriumi mérések alapján kimutatták, hogy az ultraibolya sugárzás elnyelődéséért, illetve a geometriai albedó és a légkör törésmutatójának csökkenéséért a 0,6 μm -es tartomány alatt a ködréteg részecskéi felelősek legnagyobb mértékben. A sugárzás elnyelődésének következtében a törésmutató értékének csökkenésével párhuzamosan megfigyelhető a hőmérsékleti értékek növekedése a köd alatt lévő légköri rétegben – ahogyan az a 13. ábrán is látható. Így jön létre a sztratoszféra a Titánon, mely egy inverziós réteg a légkörben, ahol a hőmérséklet emelkedik a magassággal (*Lavvas et al., 2008a*).

A laboratóriumi méréseken túl a kémiai folyamatokkal kapcsolatos ismereteink bővítésében nagy szerepe volt a Huygens felszínén található ACP műszernek. Feladata az volt, hogy a légkör összetételét meghatározza. Két különböző szinten történt mintavételéből kimutatható, hogy a 130 km-es magasság alatt az aeroszolk összetétele már azonos, tehát a képződésük ezen magasság fölött kell, hogy lejátszódjon (*Israël et al., 2005*).

Figyelembe kell venni, hogy a planetáris határréteg teteje jóval ezalatt, nagyságrendileg 2–3 km-es magasságban található (*Charnay and Lebonnois, 2012*), tehát ennek a légköri tartománynak legnagyobb részében nem a turbulens átkeveredés miatt homogén az aeroszolk összetételének eloszlása. Az ACP további mérései azt mutatják, hogy a köd molekuláiban jelentős mennyiségű nitrogén található (*Israël et al., 2005*), ami azt jelenti, hogy ez a molekula a légkörben való tartózkodása során sokat süllyedt, míg a különböző reakciókban részt vett. A VIMS által végzett méréseket kiértékelők is megerősítették a policiklikus aromás szénhidrogének létét a Titán felső légkörében. Már hosszú ideje feltételezték, hogy a PAH molekulák és az aeroszolk összekapcsolódnak a Titán légkörében, de nem gondolták volna, hogy az ottani eszközökkel ezt be is tudják bizonyítani.

4.2. A légkör molekuláinak a Nap mágneses mezejével való kölcsönhatása

A köd képződési mechanizmusa során egy másik reakciósorozat is elindul. A beérkező sugárzás okozta fotolízis után a távozó elektronok egy fontos légköri folyamatnak válnak részévé, melyet a Cassini Plazmaspektrométer (CAPS) méréseinek segítségével sikerült felfedezni. Annak ellenére, hogy a Titán tízszer olyan messze van a Naptól, mint a Föld, a felső légkörére jelentős mennyiségű besugárzás érkezik. Saját mágneses mezeje nincs, ezért – bár valamennyire védi a Szaturnusz mágneses mezeje – a légkör molekulái ki vannak téve a napszél eróziójának. Amikor a beérkező sugárzás eléri a felsőlégköri

molekulákat, ionizálja azokat. Az ionizáció során leszakított elektronok, az úgynevezett fotoelektronok a Nap mágneses mezejének vonalai mentén eltávoznak a világűr felé, így a felsőlégkörben pozitív töltésű ionok maradnak. A fotoelektronoknak nagyon különleges energiájuk van, mely 24,09 eV erősségű, ami elegendő ahhoz, hogy követhető legyen a Cassini plazmaspektrométerével (CAPS), és így megkülönböztethetőek más elektronoktól, miközben a mágneses vonalak mentén haladnak.

A CAPS mérései azt mutatják, hogy a negatív töltésű fotoelektronok szétterjednek a Titán ionoszférájában és egy elektromos mezőt hoznak létre. Ez pedig elég erős ahhoz, hogy a pozitív töltésű nitril és szénhidrogén molekulákat vonzza kifelé a légkörből, így létrejön a világűr felé áramló gázmolekulákból egy különleges szél (*Coates et al., 2015*).

Ilyen jelenséget korábban csak a Földön figyeltek meg, a pólusok környékén, ahol nyitott a mágneses mező. Mivel a Titánnak nincs saját mágneses mezeje, a jelenség nem csak a pólusokon, hanem annál sokkal szélesebb területen lejátszódhat. Bár néhányan azt feltételezték, hogy a Szaturnusz mágneses mezeje elegendő védelmet nyújt ahhoz, hogy a napszél eróziója a Titán légkörében elhanyagolható mértékű legyen (*Edberg et al., 2010*), a Cassini Plazmaspektrométer méréseinek segítségével megállapították, hogy a reakció következtében a légkör naponta 7 tonna szénhidrogént és nitrilmolekulát veszít [19 - Widespread polar wind]. A légkörnek ilyen úton történő fogyása feltételezhetően a Marson és a Vénuszon is zajlik, melyeknek szintén nincs saját belső eredetű mágneses terük (*Coates et al., 2015*).

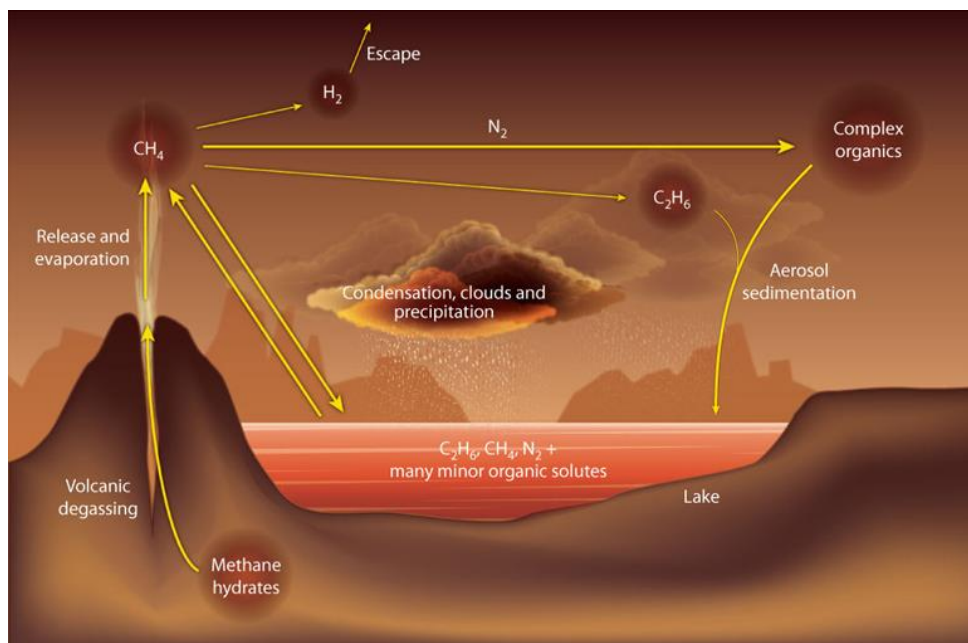
4.3. A légkör eredete

Mivel a légkörben zajló fotokémiai reakciók hatására az összetevő molekulák fogynak, a kutatók feltételezik, hogy a metánnak van valahol egy forrása, ahonnan pótlódik a légkörből távozó mennyiség. Ellenkező esetben a légkör a számítások szerint 10 millió éven belül elfogyna [20 – A metán eredete].

A Titán légkörének keletkezésére két elméletet lehet feltételezni. Az első, hogy a hold a Naprendszerben jelenlévő nitrogén, metán és nemesgáz molekulákat befogta gravitációs mezejével a keletkezésekor. A másik, elfogadottabb elmélet, hogy a légkört alkotó gázmolekulák a hold belsejében jönnek létre és onnét hidrotermális tevékenységek, kigőzölgések során kerülnek a felszíne, illetve a légkörbe (14. ábra). Ezt a feltevést Christopher Glein és kutatócsoportja vizsgálta (*Glein, 2015*). Az eddigi kutatások során a legtöbb figyelmet a légkörben legnagyobb mennyiségben jelen lévő gázok, a nitrogén

és a metán megfigyelésére fordították. Glein szerint azonban fontos lenne a hold légkörében a közelmúltban talált nemesgázok tanulmányozása is. Vizsgálatai alapján ugyanis arra a következtetésre jutott, hogy Titánon a nitrogén az argonnal, a metán pedig a kriptonnal hasonlóságokat mutat, így viselkedésük tanulmányozása közelebb vihet a légkör eredetének megértéséhez. Glein hipotézise szerint a nemesgázok a hold szilárd magjában képződnek az ott lévő anyagok bomlásának következtében, és kriovulkanizmus során szállítódnak a felszínre, illetve a légkörbe (Glein, 2015). Kriovulkánoknak a rendkívül alacsony hőmérsékletű, Naptól távoli égitesteken kialakuló vulkánokat nevezzük.

A gáz felszínre jutása a hold belsejéből olyan geofizikai folyamatok eredményeképpen történik, melyek a Titán belső szerkezetétől függenek. A vulkanizmus jelenlétéhez szükséges, hogy az égitest magja forró és belseje differenciálódott legyen. Ekkor szerkezete a Jupiter Ganümedész holdjához hasonló, mely a Naprendszer legnagyobb holdja. Ellenkező esetben a Titán a Jupiter egy másik holdjához, a Callistohoz hasonlít, melynek belseje nem differenciálódott. A pontos besoroláshoz a legfontosabb a gravitációs mező megfigyelése lenne, amely megmutatja, mekkora tömegű anyag szeparálódása történt meg a Titán belső fejlődésének során. Az eddigi vizsgálatok alapján a hold a Ganümedész és a Callisto között áll belső differenciálódás szempontjából, nem tudták még egyértelműen egyik mellé sem sorolni (Glein, 2015). Azonban a jelenlévő nemesgázok vizsgálata, például már a pontos mennyiségük kiszámítása is komoly kihívást jelent, mivel a Huygens helyi méréseket képes végezni, a Cassini csak időnként halad el a Titán mellett, a földi megfigyelésekhez pedig túl messze van a hold. A vizsgálatokhoz egy újabb űrszonda lenne szükséges. A számítások szerint, amennyiben a hipotézis szerint a nemesgázokhoz hasonlóan légköri nitrogén és metán teljes egészében a hold belsejéből származik, úgy több, mint a jelenlegi mennyiségük 1,6-szerese távozhatott már a légkörből fotokémiai reakciók és szökés útján a Titán evolúciója során. A Cassini–Huygens szondapárosnak vannak ezen feltevéseket alátámasztó mérési eredményei, azonban nem elegendőek a hipotézis igazvoltának bizonyítására. Előrelépés lehetne a Titán folyamatainak megértésében, hogyha jobban tanulmányoznánk a Ganümedészt és a Callistot, hogy miért nincs légkörük, pedig méretükben hasonlóak a Titánhoz. A 2016-ban a Jupiterhez érkező Juno űrszonda mérési eredményei segítséget jelenthetnek a megértésben, illetve az Európai Űrügynökség által kezdeményezett JUICE-misszió, melyet 2030-ra terveznek és a Jupiter jégholdjait fogja tanulmányozni (Grasset et al., 2013).



14.ábra: A Titánon zajló metán/etán ciklus, a vulkanizmus jelenlétének feltételezésével (Raulin, 2008)

2010-ben a Cassini felvételein felfedeztek egy magaslatot, a Sotra Faculat, melyből úgy látszott, mintha anyag szivárgott volna ki (Lopes et al., 2013). A kutatók egy része a felvétel alapján működő vulkánnak értelmezte a felszíninformát, és erre alapozva sok, a légkör eredetével kapcsolatos kérdésük oldódott meg a fent említett érvek alapján. Mások azonban kételkedtek a vulkánok létezésében, mivel még nem sikerült bizonyítani, hogy a hold magja forró lenne, vagy lett volna a geológiai időskálán. A légkörnek egy égitest belsejéből való eredetéről szóló elmélet helyességét nem vetették el, csak a Titán esetében a hipotézis részeként feltételezett vulkánok létét cáfolták meg. A Sotra Facula valószínűleg nem vulkán, és a geofizikai mérések is arra utaltak, hogy a Titán belseje hideg ahhoz, hogy felszínén vulkanizmus működhessen (Moore and Pappalardo, 2011). A Szaturnusz egy másik holdján, az Enceladuson működik kriovulkanizmus, és egyes kutatók úgy vélik, hogy a jelenség gyakori lehet a külső Naprendszerben található holdakon. De minél több felszíni vonást ismertek meg a Titánról, annál inkább meggyőződtek arról, hogy a létrejövő felszíninformákat a külső erők alakítják: a szél, a folyók és a meteorit becsapódások (Moore and Pappalardo, 2011). A légkör eredetének egy további vizsgálati módja lenne a metán tavak aljzatának vizsgálata és annak felderítése, hogy nincsenek-e közvetlen kapcsolatban felszín alatti metántárolóval. Egyes tavak mélysége néhány méter, másoké 200 méternél is több. A Cassini radarja ezt a mélységet már nem tudja pontosan vizsgálni. Egy jövőbeli küldetés részeként terveznek

egy speciális tengeralattjáróval való vizsgálatot, mely képes lemerülni ezen mélység alá is, hogy pontosabb adatokat szolgáltatson a tavak aljzatáról. A NASA szakemberei által elképzelt projekt a Titán legnagyobb tavának, a 400 000 km² területű Kraken Mare-nak vizsgálata lenne (Stofan et al., 2010). A –183°C-os tóban, mintegy 200 méteres mélységben úszó műszernek gyakran kellene a felszínre jönnie, hogy a gyűjtött adatokat a Földre továbbítsa. Küldetése a tervek szerint 90 napig tartana, ezalatt 2 000 km hosszúságú utat kellene megtennie. A cél a kémiai mintavétel a tó különböző mélységeiből, a bennük található szerves vegyületek, illetve az aljzat morfológiájának és üledékének vizsgálata. Fontos lenne még a ciklikusan feltöltődő és újra kiszáradó metán tavak szélsőséges folyadékszint ingadozásainak részletesebb tanulmányozása is. A terv még csak elméletben létezik, részletes kidolgozásra került, azonban a megvalósítandó NASA missziók közé még nem választották be [6 - Universe Today] .

Összefoglalás

Összegzésül elmondható, hogy a Titán légkörében zajló folyamatok hasonlítanak legjobban a földiekhez a Naprendszer egészét tekintve, bőven találunk azonban eltéréseket is, melyek egyben különleges mechanizmusokra, eredményekre mutatnak rá. Mindezek megismeréséhez az űrkutatás története folyamán a NASA és az Európai Űrügynökség együttműködésével létrejött Cassini–Huygens program jelentette a legnagyobb előrelépést, melynek során a történelem egyik legnagyobb, legnehezebb, legtöbb különféle mérést és küldetést végrehajtani képes űrszondapárosának megépítése, sikeres indítása, érkezése és működésbe lépése valósult meg. A Titánon a tengelyferdeségből adódóan négy évszak követi egymást, mialatt a hold a Szaturnusszal együtt megkerüli a Napot. A szezonálisan kialakuló éghajlati és csapadékeloszlásbeli jellemzők az elnyúlt Nap körüli pálya mentén haladó hold esetén függenek attól is, hogy melyik pályaszakaszon mekkora sebességgel halad az égitest, ennek függvényében pedig milyen hosszúak lesznek az egyes évszakok. A légkörzés nagymértékben változik az évszakokra jellemző besugárzás függvényében. Tavasszal és ősszel két, az egyenlítőtől a pólusokig érő, nyáron és télen pedig egy aszimmetrikus Hadley-cella alakul ki, mely mindkét esetben a lassú tengely körüli forgás következtében képes elérni a pólusokat.

A metán csapadék képződése követi a Hadley-cellák felszálló ágának helyét a felszín fölött, ezeken a területeken konvektív felhők alakulnak ki, 20–30 km magasságban,

melyek néhány órás élettartamúak. A pólusok fölött, a leszálló légáramlatok területén a légköri hidrogén-cianid felhalmozódása, a Napból érkező sugárzás elnyelődése és ennek következtében a levegő lehűlése szintén lehetővé teszi a kondenzációt és a felhőképződést, melynek során 8–10 földi éven keresztül fennmaradó, örvénylő felhők jönnek létre 300 km-es magasságban.

Az egyenlítőnél, a napéjegyenlőség környékén hatalmas viharok fejlődnek ki, melyek elég erősek ahhoz, hogy a felszíni dűnéket formálni tudják. Egész évben csak ekkor jellemző csapadéktevékenység az alacsonyabb szélességek vidékén, a többi idő alatt sivataghoz hasonló szárazság uralkodik ezen a területen. A pólusok környékén a légkörzés következtében időszakosan felhalmozódott metánmennyiségből a nyári félgömbön a konvektív felhőképződés során gyakori csapadéktevékenység jellemző, mely aztán a felszínt elérve tavakban, tengerekben gyülemlik fel, és folyók által szállítódik az egyenlítő felé. Nyitott kérdés még, hogy a konvektív felhőket kísérik-e villámok, mivel légköri elektromos tevékenység detektálása még nem sikerült a Titán esetében, annak ellenére, hogy többféle módon is tettek rá kísérletet. A hold légkörében zajló kémiai reakciók energiaforrása a Napból érkező sugárzás. Az ezek hatására meginduló folyamatoknak alapvetően két következménye van. A nagy energiájú sugárzás hatására a légköri molekulák fotolízise után a fotoelektronok elsöknék a világűrbe, ahol egy negatív töltésű elektromos mezőt hoznak létre. Ez vonzza kifelé a pozitív töltésű hátra maradt ionokat, így a légkör állandóan fogy. A másik folyamat során a visszamaradó, nem kötő elektronpárt tartalmazó molekulák további reakciók következtében összekapcsolódnak. Ennek eredményeképpen többszáz szénatomból álló óriásmolekulák jönnek létre, a policiklikus aromás szénhidrogének. Ezek a nagy molekulatömegük miatt a gravitáció következtében süllyednek lefelé 380–500 km-es magasságig, míg ott beágyazódnak a hasonló molekulák összesűrűsödéséből álló ködrétegbe. Az így létrejövő köd jelentős mennyiségű Napból érkező, hosszú hullámú sugárzást nyel el és ver vissza, így módosítja a felszínen kialakuló hőmérsékletet.

A Titán légkörének eredetét még nem sikerült pontosan tisztázni. Az eddigi legelfogadhatóbb hipotézist Christopher Glein állította föl, mely szerint a légköri nitrogén és metán a hold belsejében keletkezik az ott található anyagok bomlásából, onnét pedig kigőzölgések folyamán kerül a felszínre. Működő vulkán létét azonban még nem sikerült bizonyítani a Titánon és a geofizikai vizsgálatok eredményei is afelé hajlanak, hogy a hold belseje nem differenciálódott eléggé ahhoz, hogy vulkanizmus kialakuljon. A Titánról szerzett információik alapján sok kérdés vetődött fel, melyek megoldásra és a

hold részletesebb megismerésére további űrprogramok tervei születtek, amelyek közül a Titan Mare Explorer állt legközelebb a megvalósításhoz. A kutatás tehát még nem zárult le, és a Cassini–Huygens küldetés is zajlik még, melyek alapján további újdonságoknak kerülhetünk birtokába.

Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni Mészáros Róbertnek, hogy a szakdolgozat témájának újszerűsége ellenére segítette a dolgozat megírásának kezdetéhez szükséges lépéseket és ötletet adott, hogyan lehet a Földtudományi alapszakos tárgyaim során tanultakat a meteorológia tárgykörében alkalmazni, hogy ezáltal még szélesebb rálátásom lehessen a tanulmányaim során elsajátított információkra, illetve hogy témavezetőmként figyelemmel kísérte munkámat. Köszönöm Soósné Dezső Zsuzsannának a kreatív ötleteket, melyeket a dolgozat írásának kezdetén adott. Külön köszönettel tartozom másik témavezetőmnek, Leelőssy Ádámnak, aki figyelemmel kísérte a szakdolgozat megírásának minden lépését. Nagy igényességgel segítette az előrehaladást, kellő részletességgel magyarázta az összefüggéseket és mindig kész volt a meteorológia tárgyköréhez tartozó fogalmakat a szakdolgozat témájának megfelelően szélesebb körben is megmagyarázni és alkalmazásukhoz újabb ötleteket adni..

Irodalomjegyzék:

- Albee, A.L., Arvidson, R.E., Palluconi, F., and Thorpe, T., 2001: Overview of the Mars Global Surveyor mission. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 106, 23291–23316. doi:10.1029/2000JE001306
- Anderson, B.J., Acuña, M.H., Korth, H., Slavin, J.A., Uno, H., Johnson, C.L., Purucker, M.E., Solomon, S.C., Raines, J.M., Zurbuchen, T.H., Gloeckler, G., and Jr, R.L.M., 2009: The Magnetic Field of Mercury. *Space Science Reviews*, 152, 307–339. doi:10.1007/s11214-009-9544-3
- Barnes, J.W., Lemke, L., Foch, R., McKay, C.P., Beyer, R.A., Radebaugh, J., Atkinson, D.H., Lorenz, R.D., Mouélic, S.L., Rodriguez, S., Gundlach, J., Giannini, F., Bain, S., Flasar, F.M., Hurford, T., Anderson, C.M., Merrison, J., Ádámkócs, M., Kattenhorn, S.A., Mitchell, J., Burr, D.M., Colaprete, A., Schaller, E., Friedson, A.J., Edgett, K.S., Coradini, A., Adriani, A., Sayanagi, K.M., Malaska, M.J., Morabito, D., and Reh, K., 2011: AVIATR—Aerial Vehicle for In-situ and Airborne Titan Reconnaissance. *Experimental Astronomy*, 33, 55–127. doi:10.1007/s10686-011-9275-9

- Barth, E.L., and Rafkin, S.C.R., 2007: TRAMS: A new dynamic cloud model for Titan's methane clouds. *Geophysical Research Letters*, 34, L03203. doi:10.1029/2006GL028652
- Bérczi, S., 1978: Áttekintés a Naprendszeréről, In: *Planetológia*. Tankönyvkiadó, Budapest.
- Borucki, W.J., McKay, C.P., and Whitten, R.C., 1984: Possible production by lightning of aerosols and trace gases in Titan's atmosphere. *Icarus*, 60, 260–273. doi:10.1016/0019-1035(84)90188-X
- Brown, M.E., 2002: Pluto and Charon: Formation, Seasons, Composition. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 30, 307–345. doi:10.1146/annurev.earth.30.090401.095213
- Brown, M.E., Roberts, J.E., and Schaller, E.L., 2010: Clouds on Titan during the Cassini prime mission: A complete analysis of the VIMS data. *Icarus*, 205, 571–580. doi:10.1016/j.icarus.2009.08.024
- Brown, R., Lebreton, J.P., and Waite, J., 2009: *Titan from Cassini-Huygens*. Springer Science & Business Media, 529 p.
- Budó, Á., Mátrai, T., and Hornyák, L., 1977: *Kísérleti Fizika*. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest.
- Charnay, B., Barth, E., Rafkin, S., Narteau, C., Lebonnois, S., Rodriguez, S., Courrech du Pont, S., and Lucas, A., 2015: Methane storms as a driver of Titan's dune orientation. *Nature Geoscience*, 8, 362–366. doi:10.1038/ngeo2406
- Charnay, B., and Lebonnois, S., 2012: Two boundary layers in Titan's lower troposphere inferred from a climate model. *Nature Geoscience*, 5, 106–109. doi:10.1038/ngeo1374
- Coates, A.J., Wellbrock, A., Waite, J.H., and Jones, G.H., 2015: A new upper limit to the field-aligned potential near Titan. *Geophysical Research Letters*, 42, 2015GL064474. doi:10.1002/2015GL064474
- Colaprete, A., 2000: *Clouds on Mars*. PhD Thesis. University of Colorado, Boulder, 3642 p.
- Cruikshank, D.P., Matthews, M.S., and Schumann, A.M., 1995: *Neptune and Triton*. University of Arizona Press, 1292 p.
- de Kok, R.J., Teanby, N.A., Maltagliati, L., Irwin, P.G.J., and Vinatier, S., 2014: HCN ice in Titan's high-altitude southern polar cloud. *Nature*, 514, 65–67. doi:10.1038/nature13789
- Dinelli, B.M., López-Puertas, M., Adriani, A., Moriconi, M.L., Funke, B., García-Comas, M., and D'Aversa, E., 2013: An unidentified emission in Titan's upper atmosphere. *Geophysical Research Letters*, 40, 1489–1493. doi:10.1002/grl.50332
- Edberg, N.J.T., Nilsson, H., Williams, A.O., Lester, M., Milan, S.E., Cowley, S.W.H., Fränz, M., Barabash, S., and Futaana, Y., 2010: Pumping out the atmosphere of Mars through solar wind pressure pulses. *Geophysical Research Letters*, 37, L03107. doi:10.1029/2009GL041814
- Fischer, G., and Gurnett, D.A., 2011: The search for Titan lightning radio emissions. *Geophysical Research Letters*, 38, L08206. doi:10.1029/2011GL047316
- Fletcher, L.N., Irwin, P.G.J., Orton, G.S., Teanby, N.A., Achterberg, R.K., Bjoraker, G.L., Read, P.L., Simon-Miller, A.A., Howett, C., Kok, R. de, Bowles, N., Calcutt, S.B., Hesman, B., and Flasar, F.M., 2008: Temperature and Composition of Saturn's Polar Hot Spots and Hexagon. *Science*, 319, 79–81. doi:10.1126/science.1149514

- Fulchignoni, M., Ferri, F., Angrilli, F., Ball, A.J., Bar-Nun, A., Barucci, M.A., Bettanini, C., Bianchini, G., Borucki, W., Colombatti, G., Coradini, M., Coustenis, A., Debei, S., Falkner, P., Fanti, G., Flamini, E., Gaborit, V., Grard, R., Hamelin, M., Harri, A.M., Hathi, B., Jernej, I., Leese, M.R., Lehto, A., Lion Stoppato, P.F., López-Moreno, J.J., Mäkinen, T., McDonnell, J. a. M., McKay, C.P., Molina-Cuberos, G., Neubauer, F.M., Pirronello, V., Rodrigo, R., Saggin, B., Schwingenschuh, K., Seiff, A., Simões, F., Svedhem, H., Tokano, T., Towner, M.C., Trautner, R., Withers, P., and Zarnecki, J.C., 2005: In situ measurements of the physical characteristics of Titan's environment. *Nature*, 438, 785–791. doi:10.1038/nature04314
- Gierasch, P.J., 1975: Meridional Circulation and the Maintenance of the Venus Atmospheric Rotation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 32, 1038–1044. doi:10.1175/1520-0469(1975)032<1038:MCATMO>2.0.CO;2
- Glein, C.R., 2015: Noble gases, nitrogen, and methane from the deep interior to the atmosphere of Titan. *Icarus*, 250, 570–586. doi:10.1016/j.icarus.2015.01.001
- Grasset, O., Dougherty, M.K., Coustenis, A., Bunce, E.J., Erd, C., Titov, D., Blanc, M., Coates, A., Drossart, P., Fletcher, L.N., Hussmann, H., Jaumann, R., Krupp, N., Lebreton, J.-P., Prieto-Ballesteros, O., Tortora, P., Tosi, F., and Van Hoolst, T., 2013: JUpiter ICy moons Explorer (JUICE): An ESA mission to orbit Ganymede and to characterise the Jupiter system. *Planetary and Space Science*, 78, 1–21. doi:10.1016/j.pss.2012.12.002
- Griffith, C.A., Hall, J.L., and Geballe, T.R., 2000: Detection of Daily Clouds on Titan. *Science*, 290, 509–513. doi:10.1126/science.290.5491.509
- Grinspoon, D.H., 1993: Implications of the high D/H ratio for the sources of water in Venus' atmosphere. *Nature*, 363, 428–431. doi:10.1038/363428a0
- Herbert, F., Sandel, B.R., Yelle, R.V., Holberg, J.B., Broadfoot, A.L., Shemansky, D.E., Atreya, S.K., and Romani, P.N., 1987: The upper atmosphere of Uranus: EUV occultations observed by Voyager 2. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 92, 15093–15109. doi:10.1029/JA092iA13p15093
- Homolya, E., 2010: „Havazások” a Naprendszerben: egy-, két- és többféle „hókrisztállyal”. Szakdolgozat. Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest, 55 p.
- Hourdin, F., Lebonnois, S., Luz, D., and Rannou, P., 2004: Titan's stratospheric composition driven by condensation and dynamics. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 109, E12005. doi:10.1029/2004JE002282
- Hueso, R., and Sánchez-Lavega, A., 2006: Methane storms on Saturn's moon Titan. *Nature*, 442, 428–431. doi:10.1038/nature04933
- Illés, E., 1974: A Naprendszer bolygótestjeinek összeállítása, In: *Geonómia*. Szádeczky-Kardoss E., Budapest.
- Imanaka, H., Khare, B.N., Elsila, J.E., Bakes, E.L.O., McKay, C.P., Cruikshank, D.P., Sugita, S., Matsui, T., and Zare, R.N., 2004: Laboratory experiments of Titan tholin formed in cold plasma at various pressures: implications for nitrogen-containing polycyclic aromatic compounds in Titan haze. *Icarus*, 168, 344–366. doi:10.1016/j.icarus.2003.12.014
- Ingersoll, A.P., Dowling, T.E., and Gierasch, P.J., 2004: Dynamics of Jupiter's Atmosphere, In: *Jupiter, the Planet, Satellites and Magnetosphere*. The Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, 105–128.
- Israël, G., Szopa, C., Raulin, F., Cabane, M., Niemann, H.B., Atreya, S.K., Bauer, S.J., Brun, J.-F., Chassefière, E., Coll, P., Condé, E., Coscia, D., Hauchecorne, A., Millian, P., Nguyen, M.-J., Owen, T., Riedler, W., Samuelson, R.E., Siguier, J.-

- M., Steller, M., Sternberg, R., and Vidal-Madjar, C., 2005: Complex organic matter in Titan's atmospheric aerosols from in situ pyrolysis and analysis. *Nature*, 438, 796–799. doi:10.1038/nature04349
- Kasting, J.F., and Pollack, J.B., 1983: Loss of water from Venus. I. Hydrodynamic escape of hydrogen. *Icarus*, 53, 479–508. doi:10.1016/0019-1035(83)90212-9
- Kereszturi, Á., 2009: Megszondázzuk a Naprendszer. *Fizikai Szemle*, 6, 193.
- Khare, B.N., Sagan, C., Arakawa, E.T., Suits, F., Callcott, T.A., and Williams, M.W., 1984: Optical constants of organic tholins produced in a simulated Titanian atmosphere: From soft x-ray to microwave frequencies. *Icarus*, 60, 127–137. doi:10.1016/0019-1035(84)90142-8
- Kieffer, H.H., Christensen, P.R., and Titus, T.N., 2006: CO₂ jets formed by sublimation beneath translucent slab ice in Mars' seasonal south polar ice cap. *Nature*, 442, 793–796. doi:10.1038/nature04945
- Kocsis, G., 2014: Fejezetek a magas hőmérsékletű kísérleti plazmafizikából. Budapesti Műszaki Egyetem, Budapest.
- Kovács, T., and Turányi, T., 2010: Chemical reactions in the Titan's troposphere during lightning. *Icarus*, 207, 938–947. doi:10.1016/j.icarus.2010.01.001
- Kulikov, Y.N., Lammer, H., Lichtenegger, H.I.M., Terada, N., Ribas, I., Kolb, C., Langmayr, D., Lundin, R., Guinan, E.F., Barabash, S., and Biernat, H.K., 2006: Atmospheric and water loss from early Venus. *Planetary and Space Science*, 54, 1425–1444. doi:10.1016/j.pss.2006.04.021
- Lagzi, I., Mészáros, R., Gelybó, G., and Leelőssy, Á., 2013: Atmospheric Chemistry. Eötvös Loránd University, Budapest.
- Lavvas, P.P., Coustenis, A., and Vardavas, I.M., 2008a: Coupling photochemistry with haze formation in Titan's atmosphere, Part II: Results and validation with Cassini/Huygens data. *Planetary and Space Science, Surfaces and Atmospheres of the Outer Planets, their Satellites and Ring Systems: Part III. European Geosciences Union General Assembly - Sessions PS3.02 and PS3.03* 56, 67–99. doi:10.1016/j.pss.2007.05.027
- Lavvas, P.P., Coustenis, A., and Vardavas, I.M., 2008b: Coupling photochemistry with haze formation in Titan's atmosphere, Part I: Model description. *Planetary and Space Science, Surfaces and Atmospheres of the Outer Planets, their Satellites and Ring Systems: Part III. European Geosciences Union General Assembly - Sessions PS3.02 and PS3.03* 56, 27–66. doi:10.1016/j.pss.2007.05.026
- Lawrence, D.J., Feldman, W.C., Goldsten, J.O., Maurice, S., Peplowski, P.N., Anderson, B.J., Bazell, D., McNutt, R.L., Nittler, L.R., Prettyman, T.H., Rodgers, D.J., Solomon, S.C., and Weider, S.Z., 2013: Evidence for Water Ice Near Mercury's North Pole from MESSENGER Neutron Spectrometer Measurements. *Science*, 339, 292–296. doi:10.1126/science.1229953
- Le Mouélic, S., Rannou, P., Rodriguez, S., Sotin, C., Griffith, C.A., Le Corre, L., Barnes, J.W., Brown, R.H., Baines, K.H., Buratti, B.J., Clark, R.N., Nicholson, P.D., and Tobie, G., 2012: Dissipation of Titan's north polar cloud at northern spring equinox. *Planetary and Space Science, Titan Through Time: A Workshop on Titan's Formation, Evolution and Fate* 60, 86–92. doi:10.1016/j.pss.2011.04.006
- Lebonnois, S., Quémerais, E., Montmessin, F., Lefèvre, F., Perrier, S., Bertaux, J.-L., and Forget, F., 2006: Vertical distribution of ozone on Mars as measured by SPICAM/Mars Express using stellar occultations. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 111, E09S05. doi:10.1029/2005JE002643
- Lellouch, E., Coustenis, A., Gautier, D., Raulin, F., Dubouloz, N., and Frère, C., 1989: Titan's atmosphere and hypothesized ocean: A reanalysis of the Voyager 1 radio-

- occultation and IRIS 7.7- μ m data. *Icarus*, 79, 328–349. doi:10.1016/0019-1035(89)90081-X
- Little, B., Anger, C.D., Ingersoll, A.P., Vasavada, A.R., Senske, D.A., Breneman, H.H., Borucki, W.J., and Team, T.G.S., 1999: Galileo Images of Lightning on Jupiter. *Icarus*, 142, 306–323. doi:10.1006/icar.1999.6195
- Lopes, R.M.C., Kirk, R.L., Mitchell, K.L., LeGall, A., Barnes, J.W., Hayes, A., Kargel, J., Wye, L., Radebaugh, J., Stofan, E.R., Janssen, M.A., Neish, C.D., Wall, S.D., Wood, C.A., Lunine, J.I., and Malaska, M.J., 2013: Cryovolcanism on Titan: New results from Cassini RADAR and VIMS. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 118, 416–435. doi:10.1002/jgre.20062
- Lora, J.M., Goodman, P.J., Russell, J.L., and Lunine, J.I., 2011: Insolation in Titan's troposphere. *Icarus*, 216, 116–119. doi:10.1016/j.icarus.2011.08.017
- Luz, D., Civeit, T., Courtin, R., Lebreton, J.-P., Gautier, D., Rannou, P., Kaufer, A., Witasse, O., Lara, L., and Ferri, F., 2005: Characterization of zonal winds in the stratosphere of Titan with UVES. *Icarus*, 179, 497–510. doi:10.1016/j.icarus.2005.07.021
- Matson, D.L., Spilker, L.J., and Lebreton, J.-P., 2003: The Cassini/Huygens Mission to the Saturnian System, In: *The Cassini-Huygens Mission* (ed. Russell, C.T.). Springer Netherlands, 1–58.
- McKay, C.P., Pollack, J.B., and Courtin, R., 1991: The greenhouse and antigreenhouse effects on Titan. *Science*, 253, 1118–1121. doi:10.1126/science.11538492
- Montmessin, F., Bertaux, J.-L., Lefèvre, F., Marcq, E., Belyaev, D., Gérard, J.-C., Korablev, O., Fedorova, A., Sarago, V., and Vandaele, A.C., 2011: A layer of ozone detected in the nightside upper atmosphere of Venus. *Icarus*, 216, 82–85. doi:10.1016/j.icarus.2011.08.010
- Moore, J.M., and Pappalardo, R.T., 2011: Titan: An exogenic world? *Icarus*, 212, 790–806. doi:10.1016/j.icarus.2011.01.019
- Niemann, H.B., Atreya, S.K., Bauer, S.J., Carignan, G.R., Demick, J.E., Frost, R.L., Gautier, D., Haberman, J.A., Harpold, D.N., Hunten, D.M., Israel, G., Lunine, J.I., Kasprzak, W.T., Owen, T.C., Paulkovich, M., Raulin, F., Raaen, E., and Way, S.H., 2005: The abundances of constituents of Titan's atmosphere from the GCMS instrument on the Huygens probe. *Nature*, 438, 779–784. doi:10.1038/nature04122
- Norman, L.H., 2011: Is there life on ... Titan? *Astronomy & Geophysics*, 52, 1.39-1.42. doi:10.1111/j.1468-4004.2011.52139.x
- Petculescu, A., and Lueptow, R.M., 2007: Atmospheric acoustics of Titan, Mars, Venus, and Earth. *Icarus*, 186, 413–419. doi:10.1016/j.icarus.2006.09.014
- Plankensteiner, K., Reiner, H., Rode, B.M., Mikoviny, T., Wisthaler, A., Hansel, A., Märk, T.D., Fischer, G., Lammer, H., and Rucker, H.O., 2007: Discharge experiments simulating chemical evolution on the surface of Titan. *Icarus*, 187, 616–619. doi:10.1016/j.icarus.2006.12.018
- Radebaugh, J., Lorenz, R.D., Lunine, J.I., Wall, S.D., Boubin, G., Reffet, E., Kirk, R.L., Lopes, R.M., Stofan, E.R., Soderblom, L., Allison, M., Janssen, M., Paillou, P., Callahan, P., Spencer, C., and Team, the C.R., 2008: Dunes on Titan observed by Cassini Radar. *Icarus*, 194, 690–703. doi:10.1016/j.icarus.2007.10.015
- Rages, K., and Pollack, J.B., 1980: Titan aerosols: Optical properties and vertical distribution. *Icarus*, 41, 119–130. doi:10.1016/0019-1035(80)90164-5
- Rákóczi, F., 1993: *Planetáris meteorológia*. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 135 p.
- Raulin, F., 2008: Planetary science: Organic lakes on Titan. *Nature*, 454, 587–589. doi:10.1038/454587a

- Roe, H.G., 2012: Titan's Methane Weather. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 40, 355–382. doi:10.1146/annurev-earth-040809-152548
- Russell, C.T., Zhang, T.L., Delva, M., Magnes, W., Strangeway, R.J., and Wei, H.Y., 2007: Lightning on Venus inferred from whistler-mode waves in the ionosphere. *Nature*, 450, 661–662. doi:10.1038/nature05930
- Sanchez-Lavega, A., 1994: Saturn's Great White Spots. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 4, 341–353. doi:10.1063/1.166012
- Sanchez-Lavega, A., Lecacheux, J., Colas, F., and Laques, P., 1993: Ground-Based Observations of Saturn's North Polar Spot and Hexagon. *Science*, 260, 329–332. doi:10.1126/science.260.5106.329
- Schneider, T., Graves, S.D.B., Schaller, E.L., and Brown, M.E., 2012: Polar methane accumulation and rainstorms on Titan from simulations of the methane cycle. *Nature*, 481, 58–61. doi:10.1038/nature10666
- Schubert, G., Covey, C., Genio, A.D., Elson, L.S., Keating, G., Seiff, A., Young, R.E., Apt, J., Counselman, C.C., Kliore, A.J., Limaye, S.S., Revercomb, H.E., Sromovsky, L.A., Suomi, V.E., Taylor, F., Woo, R., and von Zahn, U., 1980: Structure and circulation of the Venus atmosphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 85, 8007–8025. doi:10.1029/JA085iA13p08007
- Sromovsky, L.A., Fry, P.M., Hammel, H.B., de Pater, I., and Rages, K.A., 2012: Post-equinox dynamics and polar cloud structure on Uranus. *Icarus*, 220, 694–712. doi:10.1016/j.icarus.2012.05.029
- Stofan, E.R., Elachi, C., Lunine, J.I., Lorenz, R.D., Stiles, B., Mitchell, K.L., Ostro, S., Soderblom, L., Wood, C., Zebker, H., Wall, S., Janssen, M., Kirk, R., Lopes, R., Paganelli, F., Radebaugh, J., Wye, L., Anderson, Y., Allison, M., Boehmer, R., Callahan, P., Encrenaz, P., Flamini, E., Francescetti, G., Gim, Y., Hamilton, G., Hensley, S., Johnson, W.T.K., Kelleher, K., Muhleman, D., Paillou, P., Picardi, G., Posa, F., Roth, L., Seu, R., Shaffer, S., Vetrella, S., and West, R., 2007: The lakes of Titan. *Nature*, 445, 61–64. doi:10.1038/nature05438
- Stofan, E.R., Lorenz, R.D., Lunine, J.I., Aharonson, O., Bierhaus, E., Clark, B., Griffith, C., Harri, A.-M., Karkoschka, E., Kirk, R., Kantsiper, B., Mahaffy, P., Newman, C., Ravine, M., Trainer, M., Waite, H., and Zarnecki, J., 2010: Titan Mare Explorer (TiME): first in situ exploration of an extraterrestrial sea. *Astrobiology Science Conference 2010: Evolution and Life: Surviving Catastrophes and Extremes on Earth and Beyond*, League City, Texas, USA.
- Strobel, D.F., Atreya, S.K., Bézard, B., Ferri, F., Flasar, F.M., Fulchignoni, M., Lellouch, E., and Müller-Wodarg, I., 2009: Atmospheric Structure and Composition, In: *Titan from Cassini-Huygens* (eds. Brown, R.H., Lebreton, J.-P., and Waite, J.H.). Springer Netherlands, 235–257.
- Strom, R.G., and Sprague, A.L., 2003: *Exploring Mercury: The Iron Planet*. Springer Science & Business Media, 268 p.
- Svedhem, H., Titov, D.V., McCoy, D., Lebreton, J.-P., Barabash, S., Bertaux, J.-L., Drossart, P., Formisano, V., Häusler, B., Korablev, O., Markiewicz, W.J., Nevejans, D., Pätzold, M., Piccioni, G., Zhang, T.L., Taylor, F.W., Lellouch, E., Koschny, D., Witasse, O., Eggel, H., Warhaut, M., Accomazzo, A., Rodriguez-Canabal, J., Fabrega, J., Schirmann, T., Clochet, A., and Coradini, M., 2007: Venus Express—The first European mission to Venus. *Planetary and Space Science, The Planet Venus and the Venus Express Mission, Part 2* 55, 1636–1652. doi:10.1016/j.pss.2007.01.013
- Teanby, N.A., Irwin, P.G.J., Nixon, C.A., de Kok, R., Vinatier, S., Coustenis, A., Sefton-Nash, E., Calcutt, S.B., and Flasar, F.M., 2012: Active upper-atmosphere

- chemistry and dynamics from polar circulation reversal on Titan. *Nature*, 491, 732–735. doi:10.1038/nature11611
- Tokano, T., 2011: Precipitation Climatology on Titan. *Science*, 331, 1393–1394. doi:10.1126/science.1204092
- Vago, J., Gardini, B., Kminek, G., Baglioni, P., Gianfiglio, G., Santovincenzo, A., Bayón, S., and van Winnendael, M., 2006: ExoMars - searching for life on the Red Planet. *ESA Bulletin*, 126, 16–23.
- Waite, J.H., Young, D.T., Cravens, T.E., Coates, A.J., Crary, F.J., Magee, B., and Westlake, J., 2007: The Process of Tholin Formation in Titan's Upper Atmosphere. *Science*, 316, 870–875. doi:10.1126/science.1139727
- Wallace, L., 1980: The structure of the Uranus atmosphere. *Icarus*, 43, 231–259. doi:10.1016/0019-1035(80)90172-4

- [1–NASA Science] http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2006/02mar_redjr/
- [2–European Southern Observatory] <https://www.eso.org/public/images/eso9014a/>
- [3–NASA/JPL – Caltech/Space Science Institute] http://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_2456.html
- [4–NASA] <http://www.nasa.gov/image-feature/oct-15-1997-launch-of-cassini-to-saturn/>
- [5–NASA/ESA] [http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2004/05/Cassini-Huygens passing through the gap in the rings](http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2004/05/Cassini-Huygens_passing_through_the_gap_in_the_rings)
- [6–Universe Today] <http://www.universetoday.com/96924/mars-lander-wins-out-for-2016-mission-over-titan-boat-and-comet-hopper/>
- [7–NASA/ESA] <http://llis.nasa.gov/lesson/3436>
- [8–ESA - Cassini] [http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Cassini-Huygens/Cassini instruments](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Cassini-Huygens/Cassini_instruments)
- [9–NASA] <http://saturn.jpl.nasa.gov/photos/imagetdetails/index.cfm?imageId=5312>
- [10–ESA - VIMS] <http://sci.esa.int/cassini-huygens/34954-instruments/?fbodylongid=1625>
- [11–Jrehling/NASA] <http://www.unmannedspaceflight.com/index.php?showtopic=3168&st=180&p=183610&#entry183610>
- [12–ESA - Huygens] [http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Cassini-Huygens/Huygens instruments](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Cassini-Huygens/Huygens_instruments)
- [13–ESA – HASI] <http://sci.esa.int/cassini-huygens/31193-instruments/?fbodylongid=737>
- [14–Methane Rains on the Desert] <http://www.space.com/11154-saturn-titan-methane-rain-desert.html>
- [15–NASA] <http://saturn.jpl.nasa.gov/photos/imagetdetails/index.cfm?imageId=3551>
- [16–NASA] https://www.nasa.gov/mission_pages/cassini/multimedia/pia14919.html#.Vx41INSLTIV
- [17–Thunder on Saturn] <http://www.space.com/11854-saturn-moon-titan-thunder-lightning.html>
- [18–Thunder Could Help Track Lightning] <http://news.discovery.com/space/thunder-on-titan-110619.htm>
- [19–Widespread polar wind] - http://www.eurekalert.org/pub_releases/2015-06/ucl-tae061615.php
- [20–A metán eredete] <http://www.csillagaszat.hu/hirek/nr-egyeb-naprendszer/nr-egyeb-szturnusz/nr-szturnusz-titan/titan-honnan-a-metan/>