

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM

Természettudományi és Informatikai Kar

Kísérleti Fizikai Tanszék

SZAKDOLGOZAT

Exobolygók légköre

Készítette: Dávid Tamás

fizika BSc szakos hallgató

Témavezető: dr. Szatmáry Károly

egyetemi docens, az MTA doktora

Szeged, 2015

Tartalomjegyzék

| | |
|---|----|
| Tartalomjegyzék | 2 |
| 1. Bevezetés, történeti háttér | 3 |
| 2. A Naprendszer bolygóinak légköre | 5 |
| 3. Exobolygók légkörének megfigyelési módszerei | 6 |
| 3.1 Közvetlen leképezés | 6 |
| 3.2 Exobolygó tranzit megfigyelések | 7 |
| 4. Az eddigi kutatások eredményeinek bemutatása | 10 |
| 4.1 Forró Jupiterek | 10 |
| 4.2 Forró-Neptunuszok..... | 13 |
| 4.3 Szuperföldek..... | 14 |
| 5. Az exolégkör kutatáshoz alkalmazott berendezések | 17 |
| 5.1 A Hubble űrtávcső (Hubble Space Telescope) | 17 |
| 5.2. A Spitzer űrtávcső (Spitzer Space Telescope) | 18 |
| 5.3 A jövő űrobszervatóriuma: James Webb Space Telescope (JWST) | 20 |
| 6. Műholdak felhasználhatósága az exobolygók légkörének kutatásában | 22 |
| 7. Összefoglalás, kitekintés | 26 |
| Irodalomjegyzék | 27 |
| Köszönetnyilvánítás | 30 |
| Nyilatkozat | 31 |

1. Bevezetés, történeti háttér

Az exobolygók kivételes tárgyai a csillagászat tudományának, mert Naprendszerünkben helyileg tanulmányozhatjuk analógjaikat, pl. a gázóriások legismertebb példája, a Jupiter képében. Ezért szükséges bevezetesként szót ejteni a Naprendszer bolygóinak légköréről, ill. vizsgálatuk történelméről.

A bolygókat körülvevő légköröket a XIX. századtól kutatják. Megfigyelték, hogy néhány jellemző nem olyan szabályos ciklusban változik, mint ahogy azt egy tengelye körül forgó objektumtól várnánk (pl. felszíni alakzatok). Ezek alapján felismerték, hogy a többi bolygót is légkör veszi körül. Azonban az első, spektroszkópiai módszerekkel történő kutatások rávilágítottak, hogy ezek a légkörök nagyon különböznek a Földétől. Az 1920-as években azt – az akkori tudósok számára meglepő – felfedezést tették, hogy a Vénusz légköre nem tartalmaz oxigént¹. A planetáris atmoszférakutatás együtt fejlődött a spektroszkópiával. A korai sikerek közé tartozott a metán felfedezése az óriásbolygók atmoszférájában, és a CO₂-é a földtípusúakéban. Később, a 20. század végén a különböző bolygókat vizsgáló szondák által fejlődött jelentős mértékben a légköri ismereteink.

Az exobolygók esetében a hajtóerő több mint pusztán tudományos kíváncsiság. A végső cél az első lakható földön kívüli planéta felfedezése. Jelenlegi fejlettségi szintünkön az exobolygók légkörének kutatása az egyetlen módja, hogy információt szerezzünk egy másik bolygó lakhatóságáról. A légkör ismerete alapján szerezhetünk információt a hőmérsékletről, az élet jelenlétére utaló gázokról.

Az exobolygók tudománya rengeteget köszönhet a Naprendszer több évtizedes kutatásának. Nincs még egy területe az asztronómiának, amely ennyi helyi analógiával, részletes megfigyeléssel, elméleti alapozással rendelkezne. Persze egy alapvető különbség mindig marad a Naprendszer égitestjeinek és az exobolygók között. Az előbbiek sokkal fényesebbek, könnyebben megfigyelhetők, tulajdonságaik nagyságrendekkel nagyobb jel-zaj aránnyal mérhetők. Emiatt az exobolygók légkörének kutatása nem csak a fizikai-kémiai ismeretek kiterjesztése az új típusú bolygókra, hanem új mérés technikák, rendkívüli kihívást jelentő megfigyelési módszerek kifejlesztése is².

Jelen dolgozatban röviden összefoglalom a Naprendszer bolygóira jellemző légköröket. Ezután rátérek az exobolygók légkörének vizsgálati módszereire. Az ezt követő részben részletezek néhány konkrét eredményt. Bemutatom a legfontosabb légkör kutatásra

alkalmazott berendezéseket, végül felvetem a lehetőségét, hogy használjuk a működő földmegfigyelő műholdakat az idegen világok légkörének vizsgálatában.

2. A Naprendszer bolygóinak légköre

Naprendszerünk bolygóinak légköre jól ismert és vizsgált, ahogy utaltam is rá a bevezetőben, de az összehasonlítás kedvéért röviden összefoglalom a főbb jellemzőket. A pontos adatok az 1. ábrán³ láthatók.

Adatok forrása: Ilés Erzsébet: Planetológiai adatok (1997.), Összehasonlító Planetológia (2001), The Cambridge Planetary Handbook, OUP (2000), NASA's Planetary Atmospheres Node (web, 2002).

| Bolygók | Átmérő km | Naptáv mló. km | Szökési seb. km/s | Albedo* % | Forgás sz/d. | T* felsz K* | T* _{szk.} K* | Légny. Atm. | Légkör összetétele (térfogat%) | | | | | | | | Hőkiug. besz. W/m ² | Napáll.** W/m ² | Szélesség m/s | | Sarki sapka anyaga | | |
|---------------------|--------------|-------------------|----------------------|--------------|----------------------|----------------|-----------------------|-----------------------|---|----------------|------------------|------------------|------|----------------|-------------------------|-----------|-----------------------------------|-------------------------------|---------------|-----------------------------------|-----------------------|------------------|----------------|
| | | | | | | | | | CO ₂ | N ₂ | H ₂ O | CH ₄ | Ar | O ₂ | H ₂ | He | | | Más | Felülégl. | | Felszln | |
| Merkúr | 4878 | 57,9 | 4,3 | 9,6 | 58°15' | 100/700 | 449 | 10 ⁻¹⁵ | Napszéli anyaga (H, He) és kőzetek kigázozása (K, Na) | | | | | | | | 3566 | | | | | | |
| Vénusz | 12104 | 108,2 | 10,4 | 72 | -243 ° | 737-740 | 328/231 | 93 | 96,4 | 3,4 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | SO ₂ : 0,015 | 2660 | 100-150 | 0,3-1 | | | | | |
| Föld | 12756 | 149,6 | 11,2 | 39(5-90) | 23°56' | 250(234/33) | 279/254 | 1,014 | 0,03 | 78 | 0-4 | 10 ⁻⁴ | 0,9 | 20,9 | 10 ⁻⁴ | Ne: 0,002 | 0,062-0,09 | 1380 | 60-120 | 0-100 | H ₂ O | | |
| Ósi Föld (4 md éve) | 12756 | 149,6 | 11,2 | ? | 13°30''? | 250-300? | | 0,5-70? | 15? | ?? | 84? | + | | | | 0,3+? | 1000? | ?? | | | | | |
| Mars | 6787 | 227,9 | 5,0 | 14 | 24°38' | 218(133/26) | 226/210 | 0,007 | 95,3 | 2,6 | 0,03 | 1,6 | 0,13 | | CO: 0,07 | 0 | 595 | 100 | 2-30 | H ₂ O, CO ₂ | | | |
| Jupiter | 142984 | 778,3 | 59,6 | 52±10 | 9°50-55' | 152(119/12) | 122/109 | | | | | | | 0,1 | 0,1 | | 81 | 17 | | | | | |
| Szaturusz | 120536 | 1429,4 | 35,6 | 47 | 10°14-39' | 143 | 90/80 | | | | | | | 0,1 | 0,2 | | 93 | 5 | | | | | |
| Uránusz | 51118 | 2870,9 | 21,3 | 51 | -17°14' | 68 | 64/58 | | | | | | | + | 2 | | 82 | 14 | | | | | |
| Neptunusz | 49572 | 4504,3 | 23,6 | 41 | 16°6' | 53 | 51/46 | | | | | | | | | | 84 | 12 | | | | | |
| Plútó | 2274 | 5913,5 | 1,3 | 35(5-80) | 6°9' | 33-55 | 44 | 3·10 ⁻⁶ ±? | + | + | + | | | | | | | | | | | N ₂ | |
| Hold | 3476 | 149,6 | 2,4 | 7(3-24) | 27,32 ° | 120/391 | | 3·10 ⁻¹⁵ | + | | + | + | | | | | | | | | | H ₂ O | |
| Io | 3632 | 778,3 | 2,6 | 60 | 1,76 ° | 100-133 | | 10 ⁻⁹ | | | | | | | | | | | | | | | |
| Europa | 3138 | 778,3 | 2,0 | 60 | 3,55 ° | 110 | | 2,5·10 ⁻⁷ | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ganymedes | 5276 | 778,3 | 2,7 | 40 | 7,15 ° | 145 | | 10 ⁻¹¹ | | | | | | | | | | | | | | | |
| Titán | 5150+ | 1429,4 | 2,7 | 20-45 | 15,94 ° | 94 | /84 | 1,46 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Triton | 2705 | 4504,3 | 2,4 | 27-90 | -5,87 ° | 37-39 | | 1,4·10 ⁻⁶ | + | | + | | | | | | | | | | | | N ₂ |
| Chiron | 148-208 | 2049 | | | 5,9° | | | | | | + | | | | | | | | | | | | |
| HD 209458b | -20000 | 6,75 (!) | | | 3,5° _{kezd} | 1400 | | | | | + | | | | | | | | | | | | |

1. ábra. A Naprendszer főbb égitesteinek légköri viszonyai³

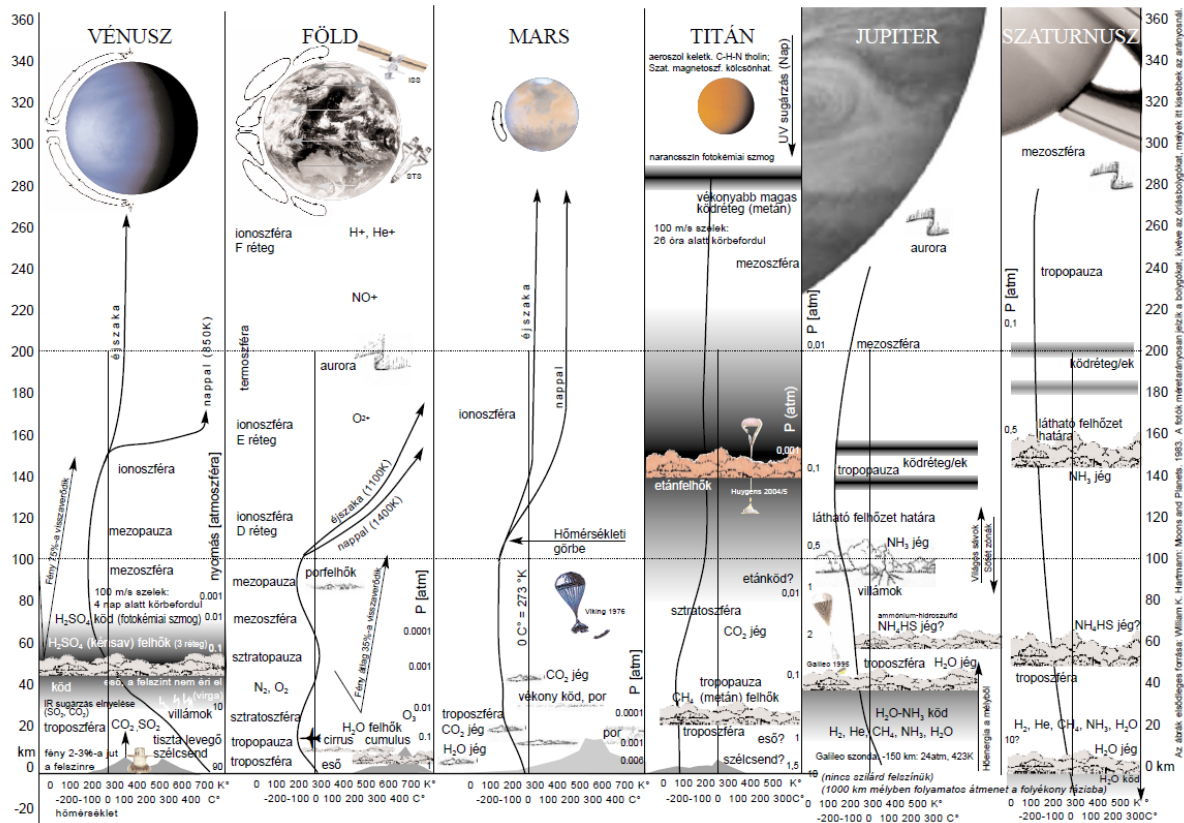
A kőzetbolygók közül a Merkúrnak gyakorlatilag nincs állandó légköre. A felszínén oxigén, Na és K mutatható ki a kőzetek kipárolgása miatt, amit az erős napsugárzás okoz. Ezen kívül a napszélnek köszönhető a hidrogén és hélium jelenléte.

A Vénusz felszínén pokoli körülmények uralkodnak. Vastag, sűrű és átlátszatlan légköre 96,4 %-ban CO₂-ból áll emiatt nagyon erős üvegházhatás lép fel, 500 °C-os hőmérséklettel és 93 atm légnyomással. Kb. 3 % N₂ mellett a maradék 1 %-ot kénsav alkotja, amely esők formájában öntözi a felszínt.

Földünk légköre jól ismert, 78 % N₂-t, 21 % oxigént tartalmaz. A maradék 1 % nagyobb része Ar és egyéb gázok (CO₂, por, vízpára, stb.). A légkör egészére kiterjedő mozgások hajtóerejét a Nap sugárzása adja. Az áramlás irányultságát és több cellából álló cirkulációjának oka a Föld gyors forgása miatt fellépő Coriolis-erő. A legjelentősebb légköri jelenség a felhők jelenléte, melyeket vízpára alkot. Utánpótlásuk a Föld felszínét 71 %-ban borító óceánoknak köszönhető.

A Marsnak vékony légköre van, melyet 95 %-ban CO₂ alkot, a maradék 3 % N₂, 1,5 % argon és 0,5 % egyéb gázok mellett. A ritka atmoszféra nem teszi lehetővé komoly üvegházhatás kialakulását, így a felszín száraz és jelentős a hőingadozás: nappal +130 °C, éjszaka -160 °C hideg is lehet.

Az aszteroida övezeten túl elhelyezkedő gázbolygók főleg hidrogénből és héliumból állnak. Összetételük méretük miatt kismértékben eltér. Külön alcsoportba osztható a Jupiter és a Szaturnusz, mint gázbolygók, közel 100 %-os H_2 és He tartalommal. A másik csoport a jégbolygóké, az Uránusz és a Neptunusz által képviseltetve. Ez utóbbiak közül légkörükben 2,5, ill. 1 %-nyi metán tartalmaznak, ennek köszönhetik kékes színüket.



2. ábra. Hőmérsékleti inverziók a Naprendszerben³

A légkörök rétegekbe rendeződnek, általában jellemző hőmérsékleti inverzióval (2. ábra) (a hőmérséklet emelkedik a felszín feletti magassággal). Ez az UV sugárzás hatására bekövetkező kémiai reakcióknak köszönhető (pl. ózonképződés).

3. Exobolygók légkörének megfigyelési módszerei

3.1 Közvetlen leképezés

A legtermészetesebb módja, hogy megvizsgáljuk egy exobolygó légkörét, ha „lefényképezzük” magát a bolygót. Ez a közvetlen módszer korlátozottan alkalmazható, az objektumok köre leszűkül a nagy, fényes, fiatal, csillaguktól nagy távolságban keringő égitestekre. Közvetlen leképezéssel fedeztek fel bolygót pl. a HD 8799 csillag körül (HD 8799 b, c és d, becsült tömegük rendre 5, 12 és 8 Jupiternek felel meg, becsült távolságuk csillaguktól 46, 330 és 330 csillagászati egység (a továbbiakban CSE)⁴.

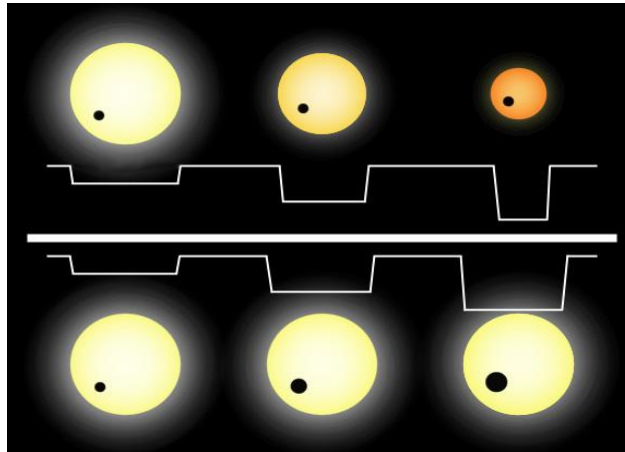
2015 áprilisában az Európai Déli Obszervatórium jelentette be, hogy sikerült felmérniük egy exobolygó optikai színeképét. A méréshez az 1995-ben elsőként felfedezett 51 Peg b, forró Jupiter színeképét vették fel. A HARPS spektrográf segítségével a csillag fényét összevetették a bolygóról reflektált halványabb fény spektrumával. Ezáltal meghatározhatták tömegét, pályahajlását és az albedóra is lehet következtetni, így a bolygófelszínről is lehet információt szerezni. A módszer előnye, hogy ez esetben nem szükséges a csillag fényének áthaladni a bolygó légkörén, tehát nem kell a bolygó-csillag átvonulásra várni⁵.

Kisméretű exobolygók felfedezése és vizsgálata ezzel a módszerrel még nem lehetséges a rendkívül nagy bolygó-csillag fény kontraszt arány miatt, ami jellemzően a Földről nézve $1:10^7$ és $1:10^9$ közötti, vagy még nagyobb látható fényben és közép infra hullámhosszakon. A közvetlen leképezésre jelenleg az adaptív optikával rendelkező földi teleszkópokat, vagy a Hubble űrtávcsövet használjuk.

A várhatóan 2018-ban fellövésre kerülő James Webb űrteleszkóp hozhat majd áttörést a forró Jupiterek közvetlen megfigyelésében, míg a Földdel összemérhető nagyságú planéták ilyen vizsgálatához még várnunk kell a ma még csak tervezés alatt álló missziókra (pl. WFIRST/AFTA⁶).

3.2 Exobolygó tranzit megfigyelések

Egy kedvező jelenség a légkör megfigyelésére a tranzit módszer. Amikor a bolygó elhalad csillaga előtt, kitakar abból egy kis részt, csökkentve annak fényességét. A csökkenés mértéke függ a bolygó/csillag terület aránytól (pontosabban a Földről nézve a két égitest keresztmetszetének arányától), lásd 3. ábra⁷. A csillag méretének ismeretében meghatározhatjuk a bolygó nagyságát.

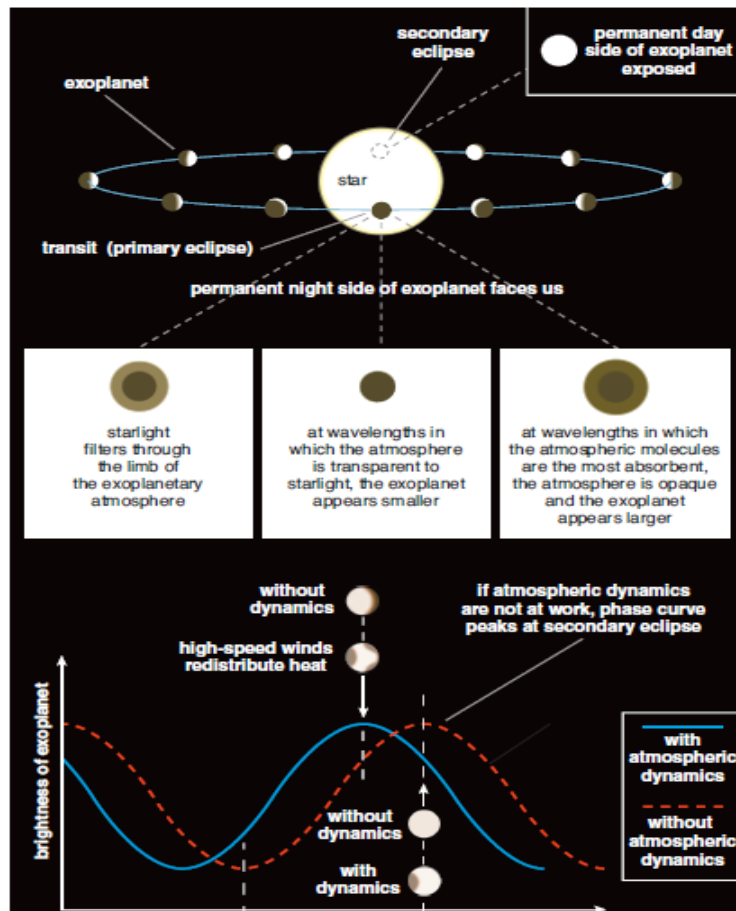


3. ábra. A tranzitmélység változása a csillag/bolygó keresztmetszet arány függvényében⁷

Minél közelebb kering a bolygó a csillaga körül, annál nagyobb az átvonulás valószínűsége. Ennek során valamennyi csillagfény áthatol a bolygó légkörén, amelyre ráakadik valamennyi jel az atmoszféra anyagából, amely adott szórással és elnyeléssel rendelkezik. Az így kapott transzmissziós spektrumból következtethetünk a felső légkör összetételére, közel az éjszaka-nappal határvonalhoz. Jóllehet ha ismerjük is az atmoszféra fő összetevőit (pl. H/He forró Jupiterek esetében), a nyomokban előforduló gázok azonosítása meglehetősen bonyolult, mivel az esetleges átlátszatlan felhők, ködök kimoshatják a spektrális jellemzőket. Ezen túl az összetevők egy része láthatatlan lehet a tranzit módszer számára. Ezen kívül a Földhöz képest a megfelelő szögben kell lenni a bolygónak, hogy az átvonulás megfigyelhető legyen.

A földről nézve az exobolygó pályára során időről időre eltűnik a csillaga mögött, ezt hívjuk másodlagos fogyatkozásnak. Közvetlenül az eltűnés előtt a bolygó és a csillag fénye együttesen vizsgálható, ezután a planéta eltűnése csökkenti a bolygó-csillag rendszer összfényét, mivel ez előbbi hozzájárulás a másodlagos fogyatkozás idejére megszűnik. A fogyatkozás előtti-utáni, illetve az alatti jel különbsége adja a bolygó saját színképét és a nappali oldal fényességét is innen számolhatjuk. A bolygó fénye információt ad a légkör anyagi összetételéről, hőmérséklet gradienséről (infra hullámhosszakon), vagy albedójáról (látható fény esetén). Az utóbbi jelenség még a hőmérsékletről is információval szolgál.

A horizontális és időbeli különbségek a bolygó hőmérsékletében változó hő kibocsátást eredményeznek. Például egy lassan forgó bolygó esetében a nappali oldal melegebb, fényesebb, mint az éjszakai. A bolygófázisok megfigyelése ennél fogva a nappal-éjszaka hő viszonyainak megállapításában segít. A teljes keringés megfigyelésével így térbeli képet alkothatunk a hőmérsékleti struktúráról, eloszlásról (4. ábra⁸).



4. ábra. Légköri információk gyűjtése tranzit, másodlagos fogyatkozás és a bolygó fázisok görbéinek segítségével⁸

4. Az eddigi kutatások eredményeinek bemutatása

A főbb eredmények bemutatása előtt az exobolygó légkörök egy lehetséges felosztását írom le, melyek a tudományterület eddigi közmegegyezéssel elfogadott elnevezései. Előre vetítve, hogy jelen dolgozat keretein belül nem kerül és nem is kerülhet sor minden kategória bemutatására, hisz még a csillagászat ezen tudományága egészen fiatal és a tudományos felfedezések java még előttünk áll. Figyelembe kell azt is vennünk, hogy a jelenleg működő földi és űrteleszkópok eredetileg nem ebből a célból készültek, sokszor több műszer párhuzamos alkalmazása szükséges ahhoz, hogy pontosabb adatokat kaphassunk. A jövő berendezései szükségesek ahhoz, hogy a felosztás minden helyére bolygó példák kerülhessenek.

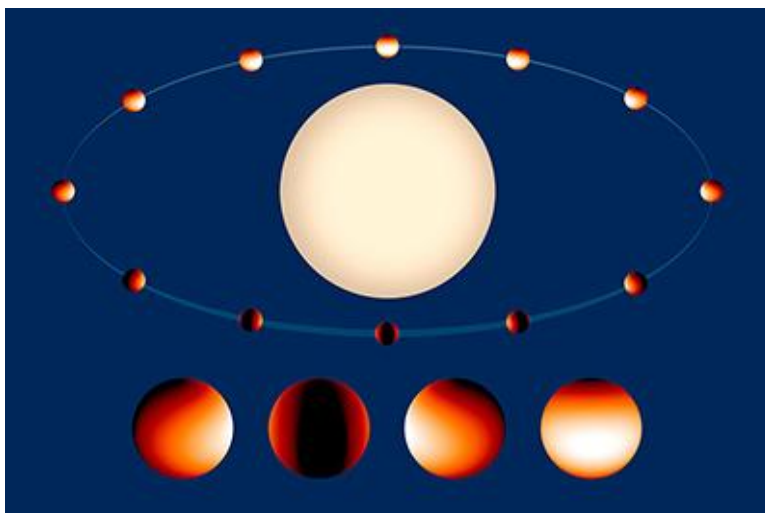
Tömegük és átmérőjük alapján Jupiter-, Neptunusz-, Szuperföld- és Föld méretű exobolygó kategóriákról beszélhetünk, melyeket hőmérsékletük alapján tovább bonthatunk forró, meleg, és mérsékelt alkategóriákra. Az egyes csoportok közötti átmenet nem éles, alapja a Naprendszerünk bolygóihoz történő hasonlítás. Különösen az általunk eddig nem ismert Szuperföldek képezhetik vita tárgyát, nem egyértelmű mindig, melyik bolygóra hasonlítanak jobban.

Az alábbiakban részletezett bolygók kiválasztása elsősorban önkényesnek és esetlegesnek tűnhet, de szempontjaim szerint igyekeztem olyan rendszerekről írni, amelyekről több, független mérés is készült. Ennek oka, hogy az exolégkör kutatás ma még mondhatni gyerekcipőben jár. A kapott eredmények szórása gyakran $1-2 \sigma$ tartományban mozog, értékelésük gyakran az alkalmazott elméleti modelltől függ.

4.1 *Forró Jupiterek*

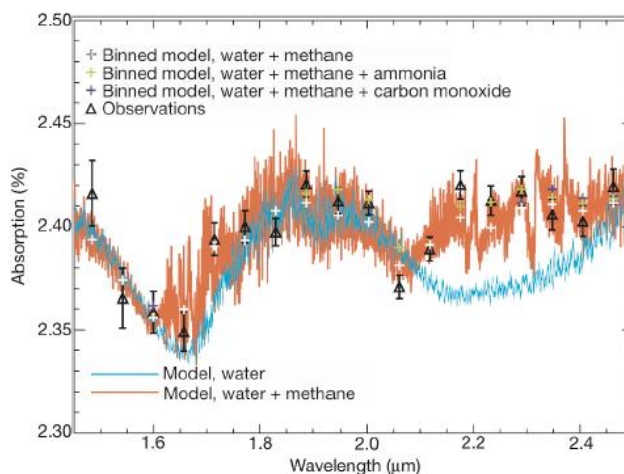
Az exobolygó légkör kutatásokban az elmúlt évtizedben a forró Jupiterek vizsgálata volt domináns. Ez annak köszönhető nagy méretüknek (átmérőjük a Jupiterével összemérhető, vagy nagyobb), és csillagukhoz közeli keringésüknek. Ez általában néhány század (!) CSE távolságot jelent, tehát ha a Naprendszerrel hasonlítjuk össze, akkor a Merkúrnál is közelebb keringenek csillagukhoz, általában kevesebb, mint egy hét alatt megkerülve azt. Ez a gyakorlatban azt eredményezi, hogy az átvonulás esélye nagy, illetve a fénygörbékben jelentős mértékű változást okoz. Általában kiterjedt légkörük van, mely jellemzők lehetővé tették a lehető legnagyobb jel-zaj arányú méréseket.

A forró Jupiterek jellemzően sötétek a látható fény tartományában és forrók. Ezek a bolygók ki vannak téve csillaguk erőteljes sugárzásának, mely akár 1000 K fölé is emeli felszíni hőmérsékletüket. A modellek már korábban is számoltak ezzel a lehetőséggel, de először a Spitzer űrteleszkóp másodlagos fogyatkozási módszerrel történt mérésének sikerült igazolnia a feltevést⁹. Nemrég egy amerikai kutatócsoportnak sikerült a WASP-43b hőmérsékleti térképét elkészíteni (5. ábra)¹⁰. Ez a bolygó csillaguk fényét erőteljesen abszorbeálja, emiatt rendkívül sötét a látható tartományban, míg jelentős sugárzó infrában.



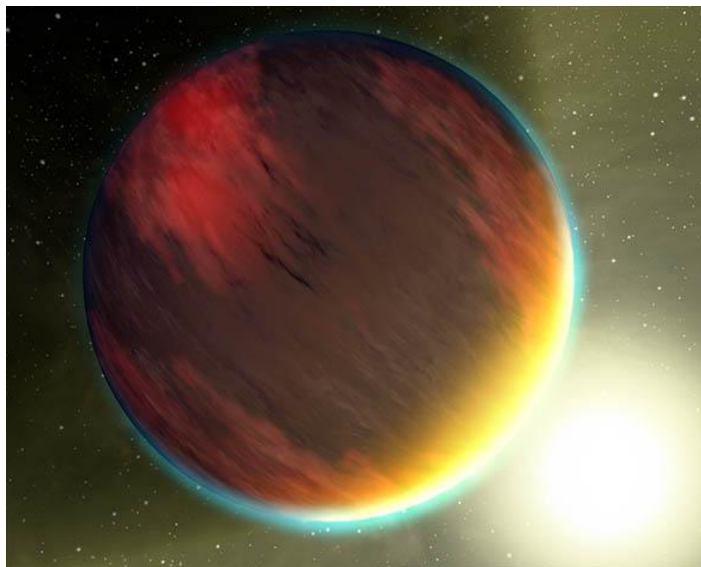
5. ábra. A WASP-43b hőmérséklet eloszlása (a világos részek melegebbek, a sötétek hűvösebbek)¹⁰

A légkörük elemi összetétele közel szoláris, főleg hidrogénből és vízgőzből áll. A hőmérséklettől és fényességtől függően tartalmazhat szén-monoxidot és metánt is. Ezek közül spektroszkópiailag messze legaktívabb a víz. A 6. ábra példáján szeretném szemléltetni, hogy a kutatók általában különböző elméleti modelleket alkotnak és azt választják ki, amely a legjobban illeszkedik a mérési eredményekhez.



6. ábra A HD 189733 transzmissziós spektruma és a modell illesztések¹¹

Az első tranzit módszerrel felfedezett exobolygó a HD 209458b volt. Mérete $1,38 R_{\text{Jup}}$, tömege $0,69 M_{\text{Jup}}$. A róla készült fantázia rajzot láthatjuk a 7. ábrán¹².



7. ábra. A HD 209458-ről készült fantázia rajz¹²

A transzmissziós mérések segítségével sikerült nátriumot kimutatni a légkörében. A további vizsgálatokkal sikerült megalkotni az atmoszféra nyomás-hőmérséklet profilját, mely azt mutatta, hogy a felsőbb, alacsony nyomású rétegekben a hőmérséklet intenzíven emelkedik a magasság függvényében. A HD 209458b új lehetőséget adott a légkör összetételének megfigyelésére. Ugyanis intenzív hidrogén kiáramlást figyeltek meg¹³, amely 4 bolygósugár távolságra kiterjed, üstököszerű csóvában a bolygó körül. Ez nem is meglepő, hisz nagyon közel, $<0,05$ CSE távolságra kering csillagától, mindössze 3,5 nap alatt megkerülve azt¹⁴.

A másodlagos fogyasztás vizsgálatával következtetni lehetett a bolygó hőmérsékletére, mely kb. 1130 K-nek adódott. A felső légrétegek hőmérsékleti inverziója is bizonyítást nyert, mivel találtak a csillag hőjét abszorbeálni képes molekulákat, vizet, CO_2 -t és metánt¹⁵.

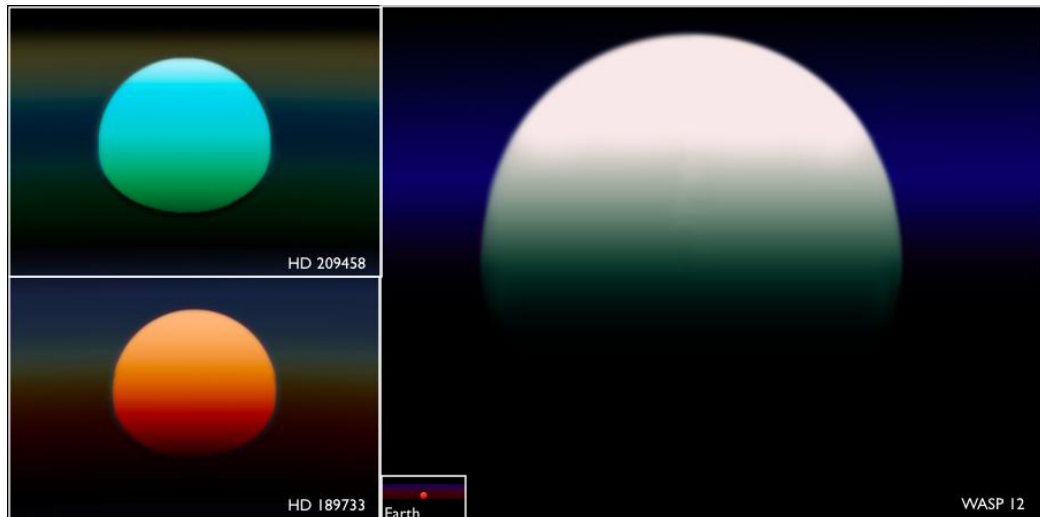
Az egyik legtöbbet vizsgált ilyen típusú exobolygó a HD 189733b, mely tőlünk 63 fényévnnyire kering csillaga körül. Relatíve könnyű tanulmányozni, hisz mérete 1,1-szer nagyobb, mint a Jupiteré, csillagának átmérője 80 %-a Napunkénak, ez viszonylag magas csillag-bolygó fényesség arányt okoz. Csillagához igen közel 0,03 CSE távolságban kering, 2,2 nap alatt megkerülve azt. A legtöbb mérést látható és infravörös tartományban végezték a Hubble és a Spitzer űrteleszkópok segítségével. Ellentétben az előbb tárgyalt HD 209458b-vel, a HD 189733b-nek „normális” a hőmérséklet profilja, azaz a magassággal csökken. A tranzit mérések meglepő módon ködszerű réteget mutattak ki a felső atmoszférában, amely

kutatók szerint szilikátszemcséből, valamint NaS-ból áll. Ezen kívül a Hubble űrtávcső NICMOS berendezésével készített újabb mérések megerősítik a H₂O és a metán jelenlétét is a légkörben¹⁶.

A forró Jupiterok a csillaguktól való kis távolságuk miatt általában kötött keringésűek, vagyis – mint a Föld-Hold rendszer esetében – mindig ugyanazon oldalukkal fordulnak csillaguk felé. Felvetődhet a kérdés, ez azt jelenti, hogy a csillag felőli oldaluk extrém forró, a távoli pedig nagyon hideg, vagy az erős planetáris szelek ellensúlyozzák ezt a hatást? A HD 189733b esetében a Spitzer teleszkóp vizsgálatai azt mutatták, hogy a hőmérséklet különbség relatíve nem túl nagy, valamivel több, mint 200 K a két oldal között¹⁷. A maximum 1212 ± 11 K, míg a minimum 973 ± 33 K. Ugyanakkor extrém nagy különbségre is van példa. A HAT-P-7b bolygón több, mint 1000 K különbséget mértek, pokoli, 2000 K-es csillagközei hőmérséklettel¹⁸.

Ettől is nagyobb forróság van a WASP-12b felszínén, ugyanis a vizsgálatok alapján megközelíti a 3000 K-t! Ezt annak köszönheti, hogy még az előbbi bolygókhoz képest is közelebb, kb. 0,02 CSE-re kering csillagától. Egy év itt alig több, mint egy földi nap alatt eltelik. A rendkívül közeli, kötött pálya azt eredményezi, hogy a bolygó alakja inkább egy forgási ellipszoidhoz hasonlít, mint gömbhöz¹⁹. A légkör összetétele is eltér a korábban említett bolygókhoz képest. Nagyon kevés vizet találtak, viszont a magas CO és CH₄ mennyiség alapján méltán képviselhetné a „szén bolygók” csoportját²⁰.

A Hubble által végzett tranzit spektrumok alapján elmondhatjuk, hogy a forró Jupiterok sok aeroszolt tartalmaznak légkörükben, ugyanis a különböző ködökből, felhőkből, vagy porszemcsékből álló anyagok jelei tisztán megjelentek a spektrumokon. Szeretnénk megismerni az óriásbolygókon feltételezett ködök és felhők természetét is. Érdekesképpen csatolok egy ábrát, hogy nézhet ki ezeken a planétákon a naplemente²¹ (8. ábra). A méretarányos képen kékes-zöld szín a nátrium elnyelésnek, a vöröses szín a szilikát szemcsék szórásának, míg a szürkésfehér a nagyobb részecskéknek köszönhető.



8. ábra „Naplementék” három exobolygóról (HD 209458b, HD 189733b és WASP-12b) és a Földről nézve (méretarányos kép)²¹

4.2 Forró Neptunuszok

Az ún. „forró Neptunuszok” csillagukhoz viszonylag közel keringő Neptunusz-szerű égitestek, amelyek nagy számban fordulnak elő a lehetséges, és a már bizonyítást nyert exobolygók között, sőt a tranzit módszerrel felfedezett planéták többségét alkotják. A Naprendszer égitesteihez képest hőmérsékletük magasabb (köszönhetően a csillaghoz közeli keringésnek), jellemzően 400 K feletti. Hasonlóan az Uránuszhoz és a Neptunuszhoz, kialakulásukkor a nem elég hatékony növekedés miatt azt várjuk, hogy összetételük nehezebb elemekben gazdagabb, kevesebb H₂ és He-mal, mint az akár a Jupiter tömegének többszörösét kitevő óriásbolygóké. Egy átlagos csillagnál 10-10000-szer nagyobb fémességgel a forró Neptunuszok légkör összetétele érdekes átmenetet képez a Neptunusz hidrogén dominálta és a Vénusz jórészt CO₂ tartalmú atmoszférája között. Az elméleti számítások és a gyakorlati eredmények is azt mutatják, hogy nagyon változatos bolygókról beszélhetünk, amelyet befolyásol a hőmérséklet és a C/O arány is. Vizes, CO, CO₂, de még akár O₂ dominálta légkör is előfordulhat, sőt forró fém, vagy szilikát felhők sem elképzelhetetlenek a kialakulástól, beeső sugárzástól, bolygótömegtől függően. Méretüket tekintve sugaruk Földéhez képest 2-6 szoros.

Ebben a kategóriában elsőként a GJ436b nevű bolygót fedezték fel radális sebesség módszerrel²². Tömege 1,4 M_{Nep}, sugara 1,1 R_{Nep}, így kissé nagyobb, mint a Neptunusz. Egy M-típusú törpecsillag körül kering, attól átlagosan 0,03 CSE távolságra, viszonylag nagy excentricitással (e=0,16). A közelségből adódóan a GJ 436b is igen erős sugárzásnak van kitéve. Habár sűrűsége nagyobb, mint a Neptunuszé ($\rho=1,2 \rho_{Nep}$), mégsem lehetséges tisztán

sziklás felszín, vagy „vízi világ”, tartalmaznia kell nem elhanyagolható mennyiségű könnyű elemet, pl. H_2/He -ot is. Az elméleti modellek dús metán és víz atmoszférát jósoltak, azonban a Spitzer teleszkóp másodlagos fogyatkozási mérései szerint, előbbiből szinte semmi nem található, míg a víz mennyisége is mérsékelt. Ezzel szemben döntően CO (és feltehetőleg CO_2) molekulát találtak²³. Ennek oka egyes modellek²⁴ szerint a magasabb fémesség lehet (230-2000-szer nagyobb, mint a csillagé), amire a bolygó tömegéből és méretéből következtetni lehet, de ennek eldöntéséhez még további vizsgálatokra lesz szükség.

A Földszerű kőzetbolygók és a Jupiter méretű gázbolygók között átmeneti tartományban található exo-Neptunuszoknak gyakran lapos spektrumuk van a közeli infravörös tartományokban. Ennek egyik példája a GJ 3470b is. Mérete alapján inkább az Uránuszra hasonlít. Kb. $14 M_{Föld}$ tömegű, sugara a Földének kb. 4,8-szerese. Sűrűsége alacsonyabb, mint a Naprendszer jégbolygóié, azoknak csaknem a fele. A sík infra elnyelést nagy magasságú ködök magyarázhatják²⁵, azonban a mérések során ellentmondó eredményeket kaptak. Egy kutatócsoport a kérdés tisztázására kiterjesztette a kísérleteket az 1,1 és 1,7 μm közötti tartományra a Hubble teleszkóp WFC3 kamerájával. Legvalószínűbb scenáriónak hidrogén gazdag, felhős atmoszférát tartották, nyomokban vízzel kiegészítve²⁶.

Egy kutatócsoportnak sikerült vízpárát kimutatni egy, a mi Neptunuszunkkal összemérhető exobolygó légkörében²⁷. A HAT-P-11b-et (kb. négyszeres Föld sugár méretű) egyszerre vizsgálták a Kepler és a Spitzer űrteleszkóp segítségével, valamint a HST széles látószögű kamerájával (WFC3). A párhuzamosan végzett precíz mérések során kiderült, hogy csillagfoltok (a napfolt megfelelője más csillag esetében) is megfigyelhetők voltak. Azonban ezek túl forrónak bizonyultak ahhoz, hogy utánozhassák a bolygó vízpára elnyelését. Fémessége kb. 700-szor nagyobb csillagánál, kb. 10,2 g/mol molekula tömeggel 10 mbar nyomás mellett. A modellek alapján ritka, hidrogén dús légköre van, de valószínűsíthető egy vékony felhőzet is.

4.3 Szuperföldek

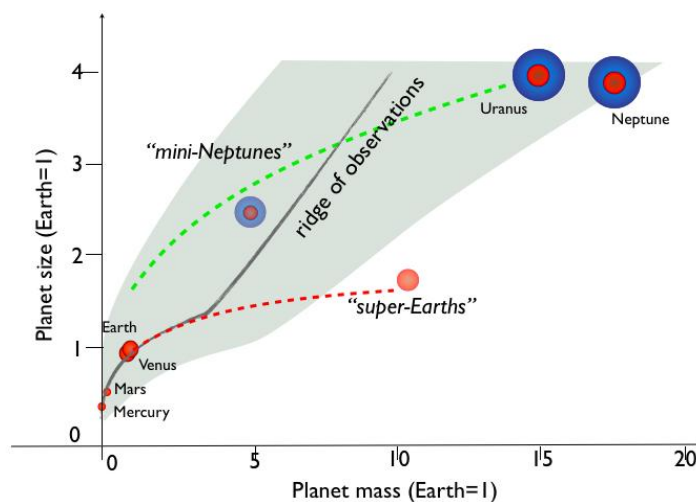
Ebbe a kategóriába a Földünkénél nagyobb tömegű bolygókat soroljuk. Az eddigi felfedezések alapján jellemzően 5-10 földtömegnyi égitestek sorolhatók ebbe a körbe. Figyelembe véve, hogy a Neptunusz tömege kb. 17, az Uránuszé kb. 14 szerese a Földének, felmerül a kérdés, melyik égitestcsoporthoz soroljuk ezeket az exobolygókat? A modellek három lehetséges struktúrát javasolnak²⁸:

1. A Neptunusz, vagy az Uránusz mini változatai hidrogénnel/héliummal borítva

2. A Ganümédész és az Európa holdak óriás kiadása vastag jégréteggel és víz légkörrrel
3. Szülőbolygónk óriás változatai vasmaggal és sziklás felszínnel

A legkönnyebb mód ennek megállapítására, ha megmérjük a bolygók méretét és tömegét, amiből kiszámítjuk sűrűségüket. Ez alapján pedig következtethetünk az összetételre. A Kepler missziónak hála sok bolygó méretét ismerjük, de a tömeg becslése nehezebb feladat. Erre két módszert használnak, a radiális sebesség mérését és a tranzit idő módszert. Ez utóbbinál az átvonulások váltakozásait vizsgálják, hogy ebből következtethessenek az aktuális bolygó(k)-csillag rendszer gravitációs viszonyaira, ebből pedig a tömegére.

Weiss és Marcy²⁹ 65 db, négyszeres földszagárnál kisebb bolygót tanulmányozott ebből a szempontból. Az eredmények azt mutatják, hogy inkább mini-Neptunusz-szerű bolygókról beszélhetünk. Túl nagyok, hogy csak nehéz elemekből álljanak, valószínűleg vastag hidrogén/hélium atmoszféra veszi körül őket. Sziklás bolygóként ekkora tömeg esetén sokkal kisebb átmérővel kellene rendelkezniük, lásd a 9. ábrán.



9. ábra. Bolygóméret a bolygótömeg függvényében (a szürke sáv a megfigyelt bolygók hozzávetőleges eloszlása, a piros vonal pedig a várt szuper-Földek valószínű méret-tömeg görbéje)²⁹

Ebben a kategóriában az eddig legjobban tanulmányozott bolygó a GJ1214b, mely körülbelül 6-szor nagyobb tömeggel rendelkezik, mint a Föld. Azonban alacsony sűrűsége miatt az összetétele inkább a Neptunuszhoz áll közelebb. Hullámhossz függő tranzit mélysége közel állandó, amely két dolgot jelezhet: vagy vastag H₂ felhőréteg borítja a felszínt, vagy kompakt, vízben dús atmoszférával rendelkezik³⁰. A transzmissziós spektrum is kizárja a felhőmentes légkört. Több vizsgálat is történt a témában, ugyanis a mérések és a modellek

ellentmondani látszanak egymással. Egy kutatócsoport³¹ az első lehetőség feltételezése alapján kutatott. Két típust feltételeztek: kondenzált felhőket, vagy fotokémiai ködöt. Azonban a fénygörbék egyik elméletet sem erősítették meg. A bizonyításhoz még további vizsgálatokra lesz szükség.

A Kepler távcsőnek köszönhetően sikerült egy olyan planétát is találni, amely összetételét tekintve a kőzetbolygókhoz állhat közel, ez a HD 97658b. A tranzit mérések alapján mérete a Földének kb. 2,34-szerese. Ahhoz, hogy eldöntsék, hogy zömmel gázból, vagy szilárd komponensből áll, szükség volt tömegének becslésére is. Ezeket a vizsgálatokat Kanada első űrtávcsövét, a MOST-ot használták. A radiális sebesség mérések szerint kevesebb, mint nyolcszor nehezebb, mint Földünk. Ebből a sűrűsége kb. $3,44 \text{ g/cm}^3$ -t kaptak. Ez alapján valószínűleg sziklás magja van, a felszínén illékony összetevőkből álló légkörrel. Ahhoz kicsi a sűrűsége, hogy csak tisztán kőből és vasból álljon. A csillagától kb. 0,08 CSE-re található, keringési ideje 9,5 nap. A közelség miatt feltehetőleg felszíne túl meleg az élet fenntartásához³².

Az előzőnél is nagyobb sűrűséggel rendelkezik az 55 Cnc e, egy öttagú rendszer legkisebb tagja. Sugara duplája a Földének, tömege nyolcszorosa, így sűrűsége kb. $5,86 \text{ g/cm}^3$. Magas széntartalma miatt megkapta „gyémánt bolygó” elnevezést. Belsejét feltehetően vas, szilikát és szén alkotja³³. Hőmérséklete rendkívül forró, kb. 2360 K annak köszönhetően, hogy csillagához nagyon közel, mindössze 0,01 CSE-re kering. Egy év ezen a bolygón kevesebb, mint 18 óra! Légköre, ha van egyáltalán, valószínűleg CO, vagy CO₂-ot tartalmazhat, a C/O aránytól függően³⁴.

5. A exolégkör kutatáshoz alkalmazott berendezések

A exobolygók légkörének kutatásának „igáslovai” jelenleg a Hubble és Spitzer űrtávcsövek. Az egyes atmoszférák karakterizálását, atomok, molekulák azonosítását, a hőterképeket is jórészt ezen eszközök mérési adataiból állították össze, így jogosnak érzem bemutatásukat.

5.1 A Hubble űrtávcső (Hubble Space Telescope)

Az idén 25. születésnapját ünneplő készülék méltán írta be magát az emberiség történetébe. Látványos űrfelvételei milliókkal szeretették meg a csillagászatot szerte a világon. A csillagászati műhold a Nagy obszervatóriumok sorozat első tagja, amely közeli infravörös, látható fény és ultraibolya tartományban végez észleléseket. Nevét Edwin Hubble huszadik századi csillagászról kapta, aki az elsők között érvelt amellett, hogy a távoli galaxisok vöröseltolódását a világegyetem tágulása okozza. Fő alkatrésze egy 2,4 méter átmérőjű Ritchey–Chrétien-távcső, mely négy, a távcső élettartama alatt többször cserélt műszerbe továbbítja az összegyűjtött fényt. A népszerű teleszkóp képét láthatjuk a 10. ábrán.



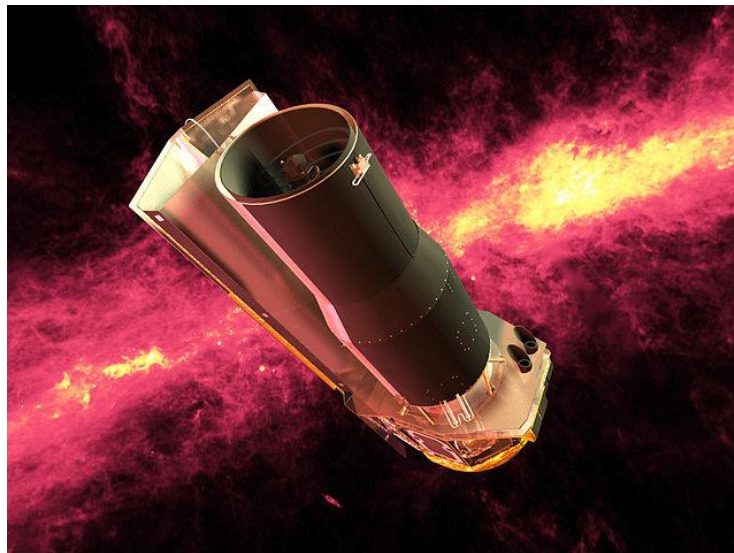
10. ábra. A Hubble teleszkópról készült fénykép³⁵

1990. 04. 24-én a Kennedy Űrközpontól indított Discovery űrrepülőgép bocsátotta útjára. Indulási tömege 11110 kg volt. Pályaadatai: pályamagassága 569 km, inklináció 28,5° és 96 perc alatt kerüli meg a földet. Eddigi működése során öt szerviz küldetést hajtottak végre rajta, az utolsót 2009. május 11-én. Ekkor szerelték rá a Wide Field Camera 3 (a továbbiakban WFC3) és a Cosmic Origins Spectrograph eszközöket, melyek azóta már többször bizonyítottak, az előzőről már említést tettem jelen dolgozatban. Ezen kívül áramköri szinten javították az Advanced Camera for Surveys és a Space Telescope Imaging Spectrograph-t,

továbbá kicserélték a műholdat működtető akkumulátorokat is. Az itt felsorolt eszközökön kívül fontos szerepe van az exobolygó kutatásban a Near Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer mérőberendezésnek is, mely az infravörös tartományban szolgáltatja adatait. A Hubble az elektromágneses spektrum 115-2500 nm közötti tartományát képes észlelni. A jelenlegi tervek szerint a távcső 2018-ban fejezi be sikeres pályafutását, ekkor a légkörbe belépve megsemmisül, roncsai a Csendes-óceánba fognak érkezni³⁵.

5.2 A Spitzer űrtávcső (Spitzer Space Telescope)

A Spitzer űrtávcső egy infravörös tartományban működő csillagászati műhold, az amerikai Nagy Obszervatóriumok sorozat negyedik, egyben utolsó tagja. Indítás után kapta a Spitzer nevet Lyman Spitzerről, a 20. század egyik nagy tudósáról, aki először foglalkozott egy űrtávcső gondolatával. A teleszkópot ábrázoló képet láthatjuk a 11. ábrán:



11. ábra. A Spitzer űrteleszkópról készült fantázia rajz³⁶

A teleszkópot 2003. augusztus 25-én indították Cape Canaveral-ből egy Delta-2 hordozórakétával. A 950 kg tömegű eszköz Föld-követő pályán kering, 0,1 CSE/év sebességgel távolodva a Földtől. A távcső berilliumból készült főtükrenek átmérője 85 cm. Fedélzetén három műszert helyeztek el: egy infravörös kamerát (Infrared Array Camera, IRAC), egy infravörös spektrométert (Infrared Spectrograph, IRS) és egy fotométert (Multiband Imaging Photometer for Spitzer, MIPS). A megfigyelési hullámhossz tartomány 3-tól 180 mikrométerig terjed. Működésében két szakaszt különíthetünk el. Az első, 2009 nyaráig datálható, amíg rendelkezésre állt a folyékony He hűtőközeg, amely lehetővé tette az infravörös kamera négy csatornájának üzemelését. Ennek elfogytával a berendezés hőmérséklete 30 K-re melegedett, azóta csak a két legrövidebb hullámhosszon működő

csatorna üzemel. Így azonban jelentős gépidő szabadult fel, amelyet az exobolygó kutatásra fordíthattak. Jelenleg is egyik legfontosabb feladata a Kepler űrtávcsővel felfedezett exobolygó jelöltek megerősítése és vizsgálata³⁶.

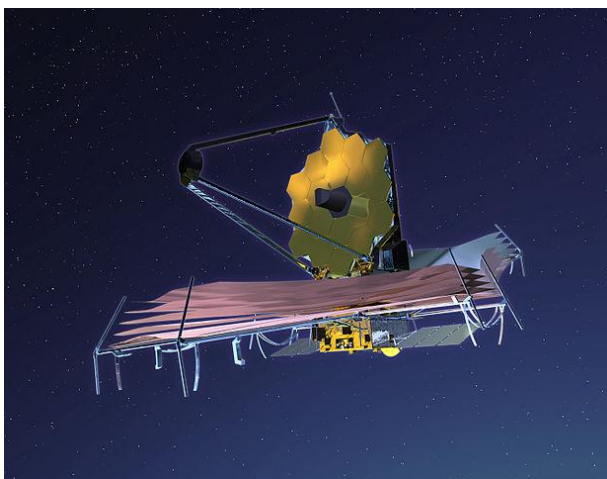
Ezen kívül földi telepítésű obszervatóriumokkal is végeznek vizsgálatokat, azonban ilyenkor mindig valamilyen adaptív optika szükséges a földi légkör zavaró hatásainak kiszűréséhez.

5.3 A jövő űrobszervatóriuma: James Webb Space Telescope (JWST)

Fontos pár szót említeni a várhatóan 2018 októberében induló új űreszközzel is. A JWST-t a Hubble utódjának szánják, azonban előbbi nem a látható tartományban, hanem az infravörös spektrumban fog dolgozni. Nevét James E. Webbről, a NASA második igazgatójáról kapta. A 6,2 tonnás teleszkóp nemzetközi együttműködésben készül, a NASA-n kívül az Európai Űrügynökség (ESA) és a Kanadai űrhivatal is részt vesz az építésben. A fellövés után a Nap-Föld rendszer L_2 Lagrange pontjában működik majd, a Földtől 1,5 millió km távolságra. A körülbelül fél éves tesztperiódus után minimum 5 évig fog szolgálni. 6,5 m átmérőjű főtükre lesz, amely 18 darab hatszögletű szegmensből áll. Négy tudományos műszert helyeznek el a fedélzetén, ezek a következők, működési tartományaikkal³⁷:

- NIRCam (Near Infrared Camera): 0,6 – 5 μm ,
- NIRSpec (Near Infrared Spectrograph): 0,6 – 5 μm ,
- MIRI (Mid-Infrared Instrument): 5 – 28 μm ,
- FGS/NIRISS (Fine Guidance Sensor/Near InfraRed Imager and Slitless Spectrograph): 0,8 – 5 μm

A JWST-ről készült művészi ábrázolást láthatjuk a 12. ábrán. Valószínűleg a tranzitos bolygók vizsgálatának leghatékonyabb eszköze lesz az elkövetkező évtizedben. Egyelőre csak ettől a távcsőtől várhatjuk a mérsékelt éghajlatú, föld típusú exobolygók légkörének részletes megismerését³⁸.



12. ábra. A James Webb űrteleszkópról készült fantázia rajz³⁷

6. Műholdak felhasználhatósága az exobolygók légkörének kutatásában

A következőkben saját gondolataimat írom le a föld megfigyelő műholdak felhasználhatóságához az exobolygók légkörének kutatásában, majd néhány működő űreszközt mutatok be, mint lehetséges kutató potenciált. A bevezetőben említettem, hogy a tudományos igényű légkörkutatás már a 19. században elkezdődött, azonban a nagy lökést bolygónk atmoszférájának feltérképezésében a műholdak elterjedése jelentett. A meteorológiai műholdak adatai felhasználásának több évtizedes múltja van. Korábban csak az időjárás előrejelzése volt fontos, manapság azonban nagy szerepet kapnak ezen eszközök a mezőgazdaságban is. A megművelt parcellák nyilvántartásához, a várható termés becsléséhez is ma már műholdas adatokat használnak. Környezetünk pusztulása, éghajlatunk változása miatt ma már előtérbe kerültek a Föld éghajlatát, a szennyező anyagok koncentrációját, annak változását vizsgáló berendezések is. Gondoljunk csak a trópusi ciklonokra. Dinamikájuk, várható erősségük előre jelzése emberéletek ezreit mentheti meg.

Ezek a műholdak egyaránt vizsgálják az elektromágneses spektrum látható, infravörös és mikrohullámú tartományait. Lényegében hasonló eszközökkel, melyek a világűr távoli szegleteit kémlelő űrtávcsöveken is megtalálhatók. Ugyanúgy tartalmazznak a fényintenzitás mérésére fotométereket, vagy a molekulák, atomok detektálásához alkalmas spektrográfokat. Felvetődhet a kérdés, alkalmasak lennének-e exobolygók légkörének vizsgálatára is? A kérdés jogosságát több szempont is igazolja. A kisebb, szuperföldek, vagy a Földhöz hasonló nagyságú égitestek légkörének vizsgálatára a mai földi obszervatóriumok nem elégségesek. Bolygónk légkörének zavaró hatását ki kell küszöbölni, azonkívül a hőtérképek, vagy az infra elnyeléssel rendelkező molekulák detektálhatóságának korlátot szab a földfelszín hő kibocsátása. A műholdak esetében egyik zavaró effektussal sem kell számolnunk. Hidegebb környezetben működnek, így csökken a hőhátteréből eredő zaj is a 3 μm -nél nagyobb hullámhosszakon. A jelenleg működő űrtávcsöveket pedig – mint korábban említettem – eredetileg nem az exobolygók légkörének kutatására tervezték. Viszont légkörfigyelő műholdjainknak pontosan ez a feladata. Ezen kívül a Spitzer működésének végéhez közeledik. Finanszírozása 2016-ig megoldott, a program hosszabbítása kétséges. Ha mégis kap tovább támogatást, kb. 2018-ig lesznek képesek a földi irányítók kapcsolatot tartani a készülékkel³⁹. A jövő nagy reménye a James Webb űrteleszkóp (James Webb Space Telescope, JWST). Azonban tervezett fellövése leghamarabb 2018 októberében lesz. Így a jelenlegi földmegfigyelő műholdak másik előnye, hogy már működnek, használhatók.

Az egyik lehetséges űreszköz a NASA EOS (Earth Observing System) műholdjai közül a AURA. 2004-ben indították és a mai napig működik. 709 km-es magasságban, inklinációja 98,2°, a Földet 98,8 perc alatt kerüli meg. Fedélzetén helyezték el TES (Tropospheric Emission Spectrometer) berendezést, mely nevéből eredően a troposzféra vizsgálatára alkalmas. Ez a 10-12 km magasságig húzódó réteg tartalmazza légkör tömegének 80 %-át, a víz 99 %-át. Az eszköz a 3,2-15,4 μm -es tartományban dolgozik $1,9 \times 10^{-4}$ μm spektrális felbontással. Jel-zaj aránya 30-600:1. Olyan szennyező anyagok kimutatására tervezték, mint NO_x gázok, ózon, metán, CFC, HNO_3 , amelyek az emberi tevékenység bizonyítékai. Többek között a vízpára mérésére is alkalmas. OMI (Ozone Monitoring Instrument) a légkör ózon tartalmát méri 270-500 nm méteres tartományban, 0,5 nm-es spektrális felbontással⁴⁰. A műholdról készült kép látható a 13. ábrán:



13. ábra. Az AURA műholdról készült fantázia rajz⁴⁰

Az EOS család másik tagja az AQUA műhold⁴¹. 2002.05.04-én bocsátották fel egy Delta-2 rakétával a Vandenberg légi bázisról. Tervezett 6 éves működési idejét bőven felülmúlva ma is kifogástalanul működik. 6 műszerével a Föld víz körforgását figyeli, legyen az folyékony, szilárd, vagy pára állapotban. Ezen kívül vizsgálja a sugárzó energia fluxusát, aeroszolókat, a földi vegetációt, az óceáni fitoplanktonokat és oldott szerves anyagokat. Továbbá a levegő, víz és a talaj hőmérsékletét is méri. A berendezései közül az egyik legfontosabb lehet az exolégkör kutatásban az Atmospheric Infrared Sounder (AIRS). Nagy spektrális felbontású spektrométer 2378 infra csatornával a légköri hőmérséklet profilt méri, 4 látható és közeli infra csatornája pedig a felhők karakterizálására és a felszín nagyfelbontású feltérképezésére alkalmazható. Mérési tartománya 3,74 – 15,4 μm infrában, 0,4 – 0,94 μm látható és közeli infra tartományban. Spektrális felbontása $1200 \lambda/\Delta\lambda$. A hőmérséklet mérését

0,1 – 0,5 K bizonytalansággal végzi. E hasznos műhold nagy eséllyel 2020-ig is működhet, a róla készült fényképet láthatjuk a 14. ábrán⁴²:



14. ábra. Az AQUA műholdról készült fénykép⁴²

A légkör CO₂ tartalmát méri OCO-2 (Orbiting Carbon Observatory-2) műhold⁴³. 709 km-es, 98°-os inklinációjú pályán. A cél, hogy feltérképezzék a CO₂, mint üvegházhatású gáz forrásait (mind természetes, mind mesterséges) és elnyelődési helyeit. Mindezt nagy térbeli felbontással végzi. Műszere három, egyenként szűk tartományban mér, ezáltal nagyon precíz adatokhoz jutunk. Az első 760 nm körül a légköri O₂-t vizsgálja, a másik két csatorna a CO₂ elnyelést, 1,61 és 2,06 μm körül. Az itt nyert adatokat a klímaváltozás kutatásában hasznosítják. Sok exobolygó esetében nincs még pontos adat légkörük C/O arányára, amiből következtetni lehetne összetételükre. Talán ez a műhold ebben is a kutatók segítségére lehetne. A berendezésről készített képet láthatjuk a 15. ábrán:



15. ábra. Az OCO-2 műholdról készült fantázia rajz⁴³

A légkör folyamatainak előrejelzésében játszott/játszik szerepet a GOES műholdsorozat⁴⁴, mely a National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) nevéhez fűződik. A geostacionárius pályán keringő eszközök párban keringenek, a Föld két oldalát figyelve. Jelenleg a 11-es és 12-es számú működik, azonban már felbocsátásra kerültek az új fejlesztésű példányok (GOES-13, -14, -15), ezek egyelőre tartalék üzemmódban vannak. A légkör vizsgálatát Imager és Sounder műszereik végzik. Folyamatosan monitorozzák a felhőzetet, a földfelszín és a vizek hőmérsékletét, valamint a légkör vertikális hő és pára eloszlását. A Sounder 19 csatornájával (1 látható, 18 infravörös) többek között a légköri ózon mérésére is alkalmas. Habár pályájuk okán folyamatosan a Föld egy adott oldala felé figyelnek, a NOAA öt évtizedes tapasztalata felhasználható lenne az exolégkörök karakterizálásában. A GOES-13-as számú műhold képe látható a 16. ábrán, még indítás előtt.



16. ábra. A GOES-13 műholdról készült fénykép⁴⁴

7. Összefoglalás, kitekintés

Az exobolygó kutatás napjaink egyik legnépszerűbb és legizgalmasabb csillagászati területe, amely mindig tartogat meglepetéseket. A bolygók felfedezésével együtt fejlődik az exolégkör kutatás is, amely rendkívül sokat köszönhet az elmúlt másfélszáz év naprendszerbeli égitesteken végzett vizsgálatainak és a spektroszkópiai módszerek fejlődésének. Az itt megszerzett tudást próbálják felhasználni az új modellek kialakításakor, illetve a megfigyelések magyarázatára. A terület még nagy fejlődés előtt áll, a legnagyobb felfedezések még bizonyára ezután várhatók, köszönhetően a jövőben telepítendő fejlett műszereknek. Itt elsősorban a várhatóan 2018-2020 körül felbocsátandó James Webb űrteleszkópra gondolok és az ezt kiegészítő földi projektekre (pl. E-ELT).

Jelenlegi munkám során igyekeztem rövid bepillantást engedni az exobolygó légkörök világába. A naprendszerbeli légkörök rövid ismertetése után, leírtam a jelenleg alkalmazott módszereket az exobolygók atmoszférájának megismeréséhez. Szót ejtettem a téma két megkerülhetetlen eszközéről, a Hubble és Spitzer űrtávcsövekről. Végül elgondolkoztam azon, használhatnánk-e a jelenben is működő földmegfigyelő műholdakat az exolégkörök vizsgálatára, bemutatva néhányat közülük.

A dolgozatban említett 11 bolygó csak a jéghegy csúcsa. Eddig 1919 db Naprendszeren kívüli planétát fedeztek fel 1212 rendszerben (2015.05.08.)¹⁴ és számuk napról napra nő. Azonban részletesebb, és ami talán fontosabb: pontosabb eredmények a jövőben várhatók. Biztosan állíthatjuk, hogy számos nem várt felfedezés és még több új kérdés várta magára, addig még választ nem kapunk a legfontosabbra: egyedül vagyunk az Univerzumban?

Irodalomjegyzék

- 1 Webster D.L. 1927. Nature 120:879
- 2 Seager S., Deming D. 2010. „Exoplanet atmospheres, ARA&A, 48, 631-672
- 3 ELTE TTK Kozmikus Anyagokat Vizsgáló Űrkutató Csoport, 2012. „Bolygóléggörök atlasza”. Uniconstant, Budapest-Püspökladány
- 4 Boccaletti A. 10/2009. eprint arXiv:0910.4339
- 5 Web: <http://www.eso.org/public/news/eso1517/> 2015.04.22.
- 6 Web: <http://wfirst.gsfc.nasa.gov/about/> 2014.05.13.
- 7 Szatmáry Károly, 2003. „Bolygók más csillagok körül”, Csillagászati évkönyv
- 8 Heng K., Showman A.P. 2014. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, Volume 43.
- 9 Knutson H. A., Charbonneau D., Allen L.E., Fortney J.J., Agol E. et al. 2007. Nature 447:183
- 10 STScI-2014-28
- 11 Swain M.R. 2008. Nature 452:329
- 12 Web: www.spitzer.caltech.edu/images/1758-ssc2007-04d-Hot-Dry-and-Cloudy-Planet 2007.02.21
- 13 Vidal-Madjar A. és társai. 2003. „An extended upper atmosphere around the extrasolar planet HD209458b.” Nature 422. 143-146
- 14 Web: <http://exoplanet.eu/catalog/> 2015.05.08
- 15 Web: <http://www.exoclimes.com/topics/the-hot-jupiter-hd-209458-b/> 2012.01.12
- 16 Swain M.R., Line M.R., Deroo P. 2014. The Astrophysical Journal, Volume 784, Issue 2
- 17 Knutson H.A. 2007. Nature 447:183
- 18 Borucki W.J., Koch D. és társai 2010. Science 327, 977–980.

-
- 19 Shu-lin Li, N. Miller, Douglas, N. C. Lin 2010, Nature 463, 1054-1056
- 20 Madhusudhan S. 2011, Nature, Volume 469, Issue 7328, 64-67
- 21 Web: <http://www.exoclimes.com/news/recent-results/exoplanet-transit-spectra-with-the-hubble-space-telescope/#prettyPhoto> 2014.12.10
- 22 Butler R. P. és társai 2004. The Astrophysical Journal, 617, 580
- 23 Stevenson K. B. és társai 2010. Nature 464, 1161
- 24 Moses J. I. és társai 2013. The Astrophysical Journal, Volume 777, Issue 1, article id. 34, 23
- 25 Nashimbeli V. és társai 2013. A&A 559, 32
- 26 Ehrenreich D. és társai 2014. Astronomy & Astrophysics, Volume 570, id.A89, 24
- 27 Jonathan Fraine, Drake Deming, Björn Beneke, Heather Knutson et al. 2014. Nature 513, 526-529
- 28 Frédéric Pont, 2014.08.11. „The nature of Super-Earth: mini-Neptunes or giant-Earth?”. <http://www.exoclimes.com/>
- 29 Weiss Lauren M., Marcy Geoffrey W. 2014. The Astrophysical Journal Letters, Volume 783.
- 30 Knutson H.A. 2014, Physics Today 66 (7), 64 (2013)
- 31 Miller Ricci, Kempton Eliza; The Astrophysical Journal, Volume 745, Issue 1, article id. 3, 13 (2012)
- 32 Dragomir Diana és társai 2013. The Astrophysical Journal Letters, Volume 772, Issue 1, article id. L2, 6
- 33 Madhusudhan S. és társai 2012. The Astrophysical Journal Letters, Volume 759, Issue 2, article id. L40, 5
- 34 Teske, Johanna K. 2013. The Astrophysical Journal, Volume 778, Issue 2, article id. 132, 9
- 35 Web: http://hu.wikipedia.org/wiki/Hubble_%C5%B1rt%C3%A1vcs%C5%91 2015.04.10
- 36 Web: http://hu.wikipedia.org/wiki/Spitzer_%C5%B1rt%C3%A1vcs%C5%91 2014.10.27.
- 37 Web: <http://jwst.nasa.gov/> 2015.05.08.

-
- 38 Cowan N. B., Green T. és társai 2015.03. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, Volume 127, issue 949, 311-327
- 39 Web: http://www.urvilag.hu/amerika_es_az_urcsillagaszat/20140727_meg_ket_ev_a_spitzernek 2014.04.27.
- 40 Web: <http://eosps0.gsfc.nasa.gov/missions/aura> 2013.01.24
- 41 Web: <http://aqua.nasa.gov/> 2015.05.01
- 42 Web: [http://en.wikipedia.org/wiki/Aqua_\(satellite\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Aqua_(satellite)) 2014.11.10
- 43 Web: http://www.jpl.nasa.gov/news/press_kits/oco2-launch-press-kit.pdf 2014.07
- 44 Web: <http://www.ospo.noaa.gov/Operations/GOES/index.html> 2014.04.07

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném Dr. Szatmáry Károlynak megköszönni szakmai segítségét és a lehetőséget, hogy a vezetésével elkészíthettem e szép témában dolgozatomat.

Ezen kívül köszönöm feleségemnek és munkahelyi vezetőmnek, hogy nagyfokú türelmet tanúsítottak Fizika BSc tanulmányaim során.

Nyilatkozat

Alulírott Dávid Tamás (DATJAAT.SZE), fizika BSc szakos hallgató, kijelentem, hogy a diplomadolgozatban foglaltak saját munkám eredményei, és csak a hivatkozott forrásokat (szakirodalom, eszközök, stb.) használtam fel.

Tudomásul veszem azt, hogy szakdolgozatomat a Szegedi Tudományegyetem könyvtárában, a kölcsönözhető könyvek között helyezik el.

Szeged, 2015. 05. 15.

.....

Dávid Tamás