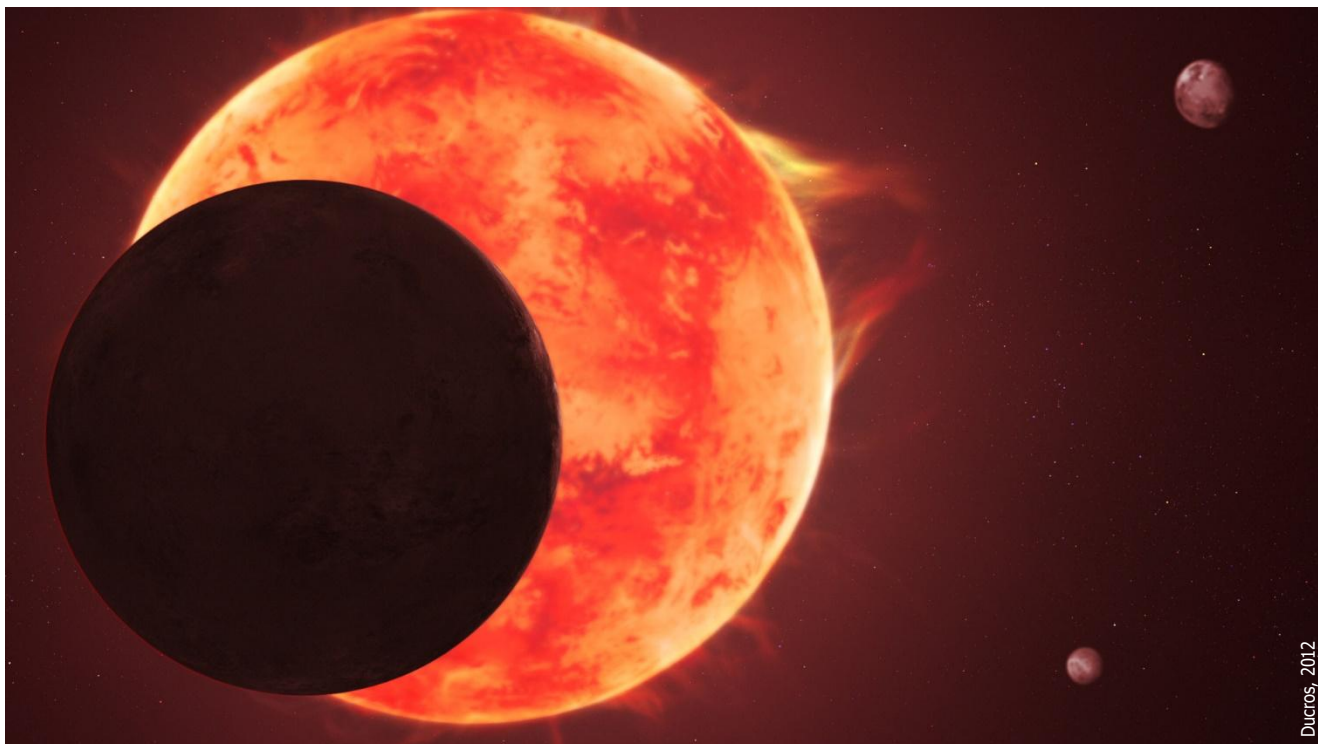


tanítsunk a világűrrel!

→ KOZMOGEOLOGIA

Az a kevés (látszó) anyag, ami nem plazma a Világegyetemben





7

↑ Művészi illusztráció a Trappist-1d exobolygó saját csillagának fedéséről.

Tanári útmutató

Alapadatok	4. oldal
A tevékenységek áttekintése	5. oldal
Bevezetés	6. oldal
Háttérinformációk	7. oldal
1. tevékenység: Kémiai elemek a Világegyetemben	16. oldal
2. tevékenység: Ismerkedés az űrtávcsövekkel!	17. oldal
3. tevékenység: Exobolygó-játék – Exobolygók ásványtani kártyái	20. oldal
Tanulói munkalapok	22. oldal
Linkek	26. oldal
Mellékletek	27. oldal

tanítsunk a világűrrel! – Kozmogeológia | Q22

www.esa.int/education

**Az Európai Űrügynökség (ESA) Oktatási Irodája örömmel fogadja a
visszajelzéseket és észrevételeket
teachers@esa.int**

**Az Európai Űrügynökség oktatási programja az Európai Űrügynökség Oktatási
Erőforrás Iroda (ESERO) Nordic-kal együttműködésben
Szerzői jogok 2025 © Európai Űrügynökség**

→ KOZMOGEOLOGIA

Az a kevés (látszó) anyag, ami nem plazma a Világegyetemben

ALAPADATOK

Tantárgy: geológia, fizika

Korosztály: 14–16 év

Nehézségi fok: közepes

Tanári felkészülési idő: 1 óra

Tanítási idő: összesen 2 óra 30 perc

Költség: alacsony (0–10 euró)

Helyszín: tanterem és a szabadban

Kulcsszavak: geológia, fizika, exobolygók, infravörös hullámhossz-tartomány, bolygóközi por, úrcsillagászat, úrtávcsövek, mérési módszerek.

Rövid ismertetés

Elsőként a kémiai elemek Világegyetemi eredetét mutatjuk be, majd megismerkedünk a kozmogeológia/asztrogeológia fogalmával. Felfrissítjük a naprendszerbeli égitestek fajtáit. Bemutatunk néhány úrtávcsövet, és azok hasznosítását. Egy keveset foglalkozunk a csillagközi porral, majd áttérünk az exobolygók kutatására.

Ezzel kapcsolatban egy játékot is bemutatunk, ami fiktív, de elképzelhető bolygókat mutat be, a tanulóknak a megismert módszerek alapján „használva az űreszközöket” meg kell állapítaniuk az exobolygók tulajdonságait és döntést kell hozniuk az egyes exobolygók jellegéről.

Tanulási célok

- Megismerkedünk a kémiai elemek eredetével.
- Megtanuljuk az asztrogeológia és a kozmogeológia fogalmát és tartalmát.
- Bemutatunk néhány kozmogeológiai módszert és a légkörön túli csillagászat alapeszközait.
- Megismerkedünk a csillagközi por és az exobolygók fogalmával, bevezetjük az exobolygókkal kapcsolatos módszerek alapjait.
- Az exobolygókkal kapcsolatban játékos gyakorlat során mélyítjük el az ismereteket.

→ A tevékenységek áttekintése

A tevékenységek áttekintése					
	Cím	Leírás	Eredmény	Szükséges előzmények	Időtartam
1	Kémiai elemek a Világegyetemben	A tanulóknak bemutatjuk, hogy a kémiai elemek hol és mikor keletkeztek a Világegyetemben.	A tanulók meg tudják különböztetni az egyes elemcsoportokat (ősi elemek, a csillagokban keletkezők, szupernova-eredetűek, mesterségesek).	Nincs	15 perc
2	Ismerkedés az űrtávcsövekkel	Bemutatjuk azt a technológiát, amivel a csillagközi port és az exobolygókat kutatni lehet	A diákok különféle fizikai jelenségeket, megfigyelési eredményeket ismernek meg	Az 1. tevékenység elvégzése.	20 perc
3	Exobolygók	A hallgatók megismerkednek az adott időszaknak az exobolygókról szóló ismereteivel, a felfedezett exobolygók számával, eloszlásával és magukkal a legérdekesebb exobolygókkal.	Ismereteik keletkeznek az egyes exobolygó-csoportok sajátosságairól, és implicit rájönnek arra, hogy a Föld mennyire optimálisak a földi körülmények az élet számára.	A2. tevékenység elvégzése.	40 perc
4	Exobolygó-játék – Exobolygók ásványtani kártyái	A diákok a tanár vezetésével különféle fiktív, de a valóságon alapuló exobolygókat vizsgálnak a különféle szempontok szerint. A játékszabályok mentén ismereteiket kell szereznük egyes exobolygókról (kutatás-metodika), és érvelnek a döntésük mellett.	A diákok exobolygó-kártyák segítségével, játékosan tudják összehasonlítani a különféle sajátosságú exobolygókat, érvelnek a geológiai tulajdonságok, felszínborítás, tömeg, méret tekintetében, és a több szempont egyszerre való alkalmazását is megtanulják.	A3. tevékenység elvégzése.	50 perc

→ Bevezetés

A **kozmogeológia** (cosmogeology vagy cosmic geology) vagy másképpen, részben átfedően az **asztrogeológia** (vagy exogeológia) többféle fogalmat is takarhat. A geológia maga a legszélesebb értelemben a szilárd anyagok (ritkábban fluidumok) vizsgálatával, összetételük, keletkezési körülményeik és fejlődéstörténetük meghatározásával foglalkozik. Ennek függvényében bár az astrogeológia elnevezés elterjedt, érezhetjük, hogy a csillagokhoz csak áttételesen kapcsolódik, míg a kozmogeológia jobban leírja azt, hogy a kozmoszban (vagyis a Földön kívül) megtalálható szilárd anyagok állnak a fókuszában.

Vegyünk is mindjárt három definíciót az astrogeológiára:

IAU (International Astronomical Union, Nemzetközi Csillagászati Unió) definíciója: Az astrogeológia a bolygók, holdak, aszteroidák, üstökösök és meteoritok geológiájának tanulmányozásával foglalkozik.

USGS Astrogeology Science Center (a USGS, US Geology Survey – Amerikai Geológiai Szolgálat – 1960-as években alapított részlege): A tudományág integrálja a bolygótudományt és a geológiát a bolygók felszínének, felszín alatti rétegeinek és belsejének megértése érdekében.

Általános megfogalmazás: A földönkívüli anyagok, tájak, tektonika, vulkanizmus és becsapódási folyamatok fizikai és kémiai tulajdonságait vizsgáló tudományág.

Láthatjuk, hogy a definíciók alapján a tágan értelmezett kozmogeológiát – lényegében kényszerűségből – feloszthatjuk két kategóriára: a **naprendszerbeli kozmogeológiára** (azaz a fenti definíciók közül kettő szerint is ez az astrogeológia) és a Naprendszeren kívüli anyagok felderítésére, tanulmányozására. A definíciók alapján, vagyis szűkebb értelemben tekinthetjük az utóbbit kozmogeológiának. A kettéválasztás kényszerűségét a módszertan különbözősége is adja: a naprendszerbeli objektumokat részben akár meg is mintázhatjuk, ha az adott szilárd égitestet meglátogatjuk, de biztosan tudunk róluk különböző távolságokból távérzékelés segítségével képeket készíteni, ezért térképezhetjük őket, formakincsüket feltárhatjuk (néha természetesen csak több évtizednyi fokozatossággal).

Ezzel szemben a Naprendszeren kívüli objektumokról csak gravitációs hatásuk és a róluk a Földre (esetleg valamely űrtávcsőbe) érkező elektromágneses sugárzásuk (pl. fényük) alapján tudunk gondolkodni, és az ezzel kapcsolatos eredmények bár megfigyeléseken alapulnak, mégis legtöbbször különféle feltevéseken alapuló modellezésekből jönnek létre. Természetesen mindezek a – sokszor spekulatív – eredmények a földi megfigyeléseken, elemzéseken alapulnak, és kisebb részben pedig a (naprendszerbeli) bolygótudomány megállapításait is figyelembe veszik.

A jelen tananyag tehát a szűkebben vett kozmogeológiára fókuszál, de ennek megértéséhez és a diákok számára történő megmagyarázásához szükséges a naprendszerbeli, de extraterresztrikus viszonyok, objektumok geológiáját is felhasználni, mivel ezek részben eleve ismertek lehetnek számukra, de ezek alapján mindenképpen könnyebben megértik.

→ Háttérinformációk

Az Univerzum, illetve a Galaxis összetétele

A földi környezetben a megszokott három halmazállapot a leggyakoribb: szilárd, folyékony és légnemű. A **plazmaállapot** vagy ritka (pl. a villámokban) vagy nincs a közvetlen környezetünkben (felsőléggör). A **Világegyetemben** pedig éppen fordítva van: a plazmaállapot a leggyakoribb, és amit mi szilárdnak vagy légneműnek gondolunk, az elég ritkábban fordul elő.

A másik fontos ismeret, hogy a földi környezetben, bár különböző mennyiségben, de 91 elemet megtalálunk, ez az elemösszetétel a Világegyetemre egyáltalán nem igaz. Praktikus okokból a továbbiakban a **Tejútrendszer**, a saját galaxisunkat fogjuk csak vizsgálni. (Kozmogeológiaiag távolabbról nagyon csekély ismeretünk van.)

Nos, a Tejútrendszer (tömeg%-ban kifejezve) 70-73%-ban hidrogén (H), 23-28%-ban hélium (He), és csak 1-2% jut az összes többi elemre. Ennek az az oka, hogy a csillagokban az ősrobbanást követően főleg H alakult ki, kisebb részben He, a csillagok energiatermelésének zöme (a csillag típusától és korától függően) a hidrogén héliummá való átalakulásából adódik, kisebb részben magasabb rendszámú elemek (oxigén, szén, nitrogén, stb.) is kialakulnak a csillagbelsőben, de normális körülmények között csak a vasig. Minden vasnál nagyobb rendszámú elem csak szupernovákban jöhetett létre, azaz a bolygónkon nagyon sok anyag egy vagy több szupernova-robbanásban keletkezett. Ezért írta Isaac Asimov, népszerű író az egyik ismeretterjesztő művében: *„Szupernovák gyermekei vagyunk.”*

Ez egyúttal azt is jelenti, hogy a kozmogeológia szupernovárokbanástermékei nélkül nem értelmezhető. Az eloszlást az eredet mellett még befolyásolja a gravitáció is: úgy találjuk, hogy Tejútrendszer közepében és a karok síkjában gyakoribbak a nagyobb rendszámú elemek.

Egy kis Naprendszer

A továbblépéshez értelmes annak összefoglalása, hogy a Naprendszerben milyen szilárdfázisú objektumokat találunk. Az első és meghatározó a 8 nagybolygó, ebből a Föld-típusú bolygóknál a szilárd fázist könnyen észleljük. A Jupiter-típusú bolygóknál ez már nem annyira egyértelmű, de különböző jelenségekből feltételezzük, hogy vastag gázburok alatt szilárd mag helyezkedik el. A bolygók holdjai, a törpebolygók és a kisbolygók esetében szintén megfigyelési tény a szilárd felszín. A Jupiter-típusú bolygók gyűrűi is különböző méretű szilárd darabokból állnak. Az üstökösök, az Oort-felhő és a Kuiper-öv égitestei bár vélhetően más összetételűek, mint a nagyobb objektumok (mert több bennük a jég), mégis az a feltételezés, hogy szilárdak, és ebben változás csak akkor következik be, ha valamilyen perturbáció folytán a Nap közelébe kerülnek, és elkezdenek anyagot veszíteni. Meg kell emlékeznünk még a naprendszerbeli porról is, ilyen – viszonylag jól megfigyelhető – az állatövi fény eredetét képező állatövi bolygóközi por is. Kevésbé (és nem túl rég óta) ismert, hogy a Merkúrnak is van csóvája, vélhetően ez is szilárd halmazállapotú szemcsékből áll.

A Naprendszer felsorolt objektumairól korábbi ESERO-anyagokban részletesen információkat találunk. Itt azért említettük meg őket felsorolásszerűen, mert általános feltételezés, hogy más naprendszerekben is hasonló objektumok fordulnak elő, talán más pályákon és más eloszlásban. (Itt is emlékeztetünk arra, hogy a csillagok jelentős része kettős, hármas vagy többes rendszert alkot, ezekben a rendszerekben a bolygó-, üstökös- és egyéb objektumpályák, ezek térbeli eloszlása sokkal bonyolultabb lehet, mint a Naprendszerben.)

A kozmogeológia vizsgálati módszertana

Elméleti alapon tehát megfontolhatjuk, hogy a Naprendszeren kívüli térségben milyen szilárd halmazállapotú objektumokat fedezhetünk fel, és ezeknek milyen tulajdonságait állapíthatjuk meg.

Magától értetődik, hogy azon objektumok, amelyek túl kicsik, és a Naprendszerben is problémás a felfedezésük vagy térképezésük (ilyenek pl. az üstökösmagok, az egészen kis kisbolygók és részben a bolygóközi por), a Naprendszeren kívül sem detektálhatók könnyen. Csak olyan objektumok jönnek számításba, amelyek önmagukban valamiféle fizikai hatással vannak a környezetükre, vagy a környezetük sugárzásviszonyait meg tudják változtatni, és ebből tudunk a jelenlétükre következtetni.

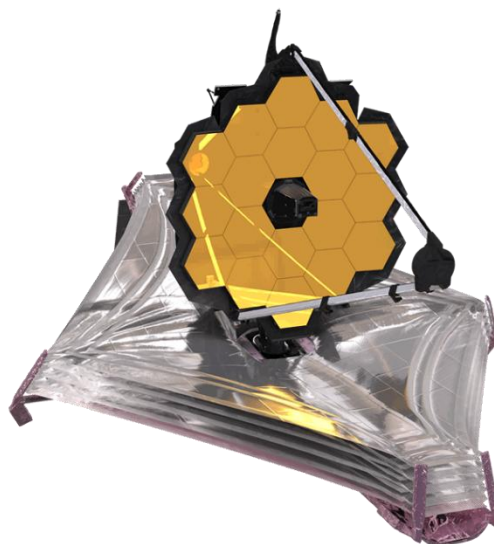
Jelenleg két ilyen nagyjából vagy túlnyomórészt szilárd halmazállapotú csoportot ismerünk, az ún. exobolygókat (Naprendszeren kívüli bolygókat), illetve a csillagközi port (interstellar medium, ISM). A következőkben e két objektumtípus kutatási módszereit mutatjuk be, kisebb részben a csillagközi port, és – mivel általában az érdeklődés középpontjában állnak – az exobolygókat.

Spektrális (főként infravörös (IR)) légkörön túli módszerek

Mivel közvetlen tanulmányozásra nincs lehetőség, az egyik lehetőség a távolból érkező sugárzás igen alapos vizsgálata időben és spektrálisan. Az elektromágneses sugárzás igen távolról és közlelről is érkezik hozzánk, mi innen az összes hatás eredőjét látjuk: egyrészt ennek van egy eredeti forrása, az objektum, ami kibocsátotta vagy visszaverte, annak a spektrális sajátosságaival együtt. Ehhez jönnek azok a hatások, melyek a kibocsátás és a földi észlelés között érik és módosítják a jelet. A kozmogeológia mindkét jelenséget használhatja: az eredeti forrás jele is lehet a vizsgálat tárgya, és még gyakrabban a módosító hatás.

Utóbbi igen gyakran az infravörös tartományban történik. Mivel a földi légkör nem teljesen engedi át az elektromágneses tartomány minden hullámhosszát, ezért a **légkörön túli csillagászat** eszközei ma már elengedhetetlenek a kutatásban.

A légkörön túli csillagászat lényege, hogy az észlelő eszközöket a Föld légkörén kívülre juttatjuk, így elkerülhető a **légkör elnyelő, szóró és torzító hatása**, ami különösen az ultraibolya, röntgen, gamma és az infravörös tartomány nagy részét érinti. Az infravörös csillagászat az elektromágneses spektrum azon tartományára koncentrál, amely nagyjából 1 mikrométertől a néhány száz mikrométeres hullámhosszig terjed, és főként a hidegebb égitestek, poros régiók és távoli galaxisok megfigyelésére alkalmas.



↑ A James Webb Űrteleszkóp működési elrendezésben.

Emellett a légkör és a **távcső saját hősugárzása** erős zajt okoz az infravörösben, amit csak kriogén hűtéssel (például folyékony héliummal) és légkörön kívüli, hideg környezettel lehet elfogadható szintre csökkenteni. Az űrbeli pályák folyamatos, hosszú, megszakítás nélküli megfigyelést tesznek lehetővé ugyanazon objektumról (változócsillagok, exobolygó-fedések, szupernóvák időbeli megfigyelése).

Korábban nagy magasságú ballonos és magaslégköri platformokat használtak, (pl. a repülőgépes SOFIA (Stratospheric Observatory For Infrared Astronomy, NASA–DLR) rendszer), főként közép–

távoli IR tartományban működtek.

A szög- és az időbeli felbontás növelésére műholdas űrtávcsöveket vezettek be. Előbb ezek földköri pályákon mozogtak. Az European Space Agency már az 1980-as évektől részt vesz ezekben a kísérletekben, és több fontos űrtávcső üzemeltetőjeként is szerepet vállalt a missziók egy részében. Az alábbi táblázat a legfontosabbakat foglalja össze.

1. táblázat. A legfontosabb infravörös űrtávcsövek adatai

Név	Üzemidő (közelítőleg)	Üzemeltető / fő partner	Fő tartomány	Fő feladat/rövid leírás
IRAS	1983	NASA, ESA, Hollandia	infravörös (12–100 μm)	Teljes égbolt infravörös felmérése, poros galaxisok, csillagkeletkezési régiók
ISO (Infrared Space Observatory)	1995–1998	ESA	közép–távoli IR	Spektroszkópia és képalkotás csillagközi por, molekulák, galaxisok vizsgálatára.
Spitzer Space Telescope	2003–2020 körül	NASA	közeli– közép IR	Exobolygók, galaxisok, poros korongok vizsgálata; kriogén fázis után korlátozottan működött
Akari	2006–2007 (2011)	JAXA	közeli, közép és távoli IR	Célja a teljes égbolt IR felmérése, technikai problémák miatt 2008-tól csak közeli IR-ben dolgozott
WISE/NEOWISE (Wide-field Infrared Survey Explorer)	2009–	NASA	infravörös	Égbolt-felmérés, barna törpék és kisbolygók keresése, később főleg földközeli kisbolygók.
Herschel Space Observatory	2009–2013	ESA	távoli IR– szubmm	Hideg Univerzum: csillagkeletkezés, hideg por és molekulafelhők, galaxisfejlődés.
Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS)	2018–2020 (primary) 2020–2022 (1st extended) 2022– (2nd extended)	NASA, MIT	600–1000 nm	Közeli, 12-nél fényesebb látszó magnitúdójú G-, K- és M-típusú csillagok, az egész égbolton talál- ható 1000 legközelebbi vörös törpe és tranzitáló exobolygó-jelöltek.
James Webb Space Telescope (JWST)	2021/2022–	NASA, ESA, CSA	Közeli– közép IR	Nagy vöröseltolódású galaxisok, exobolygók légkörei, csillagkeletkezés, korai Univerzum

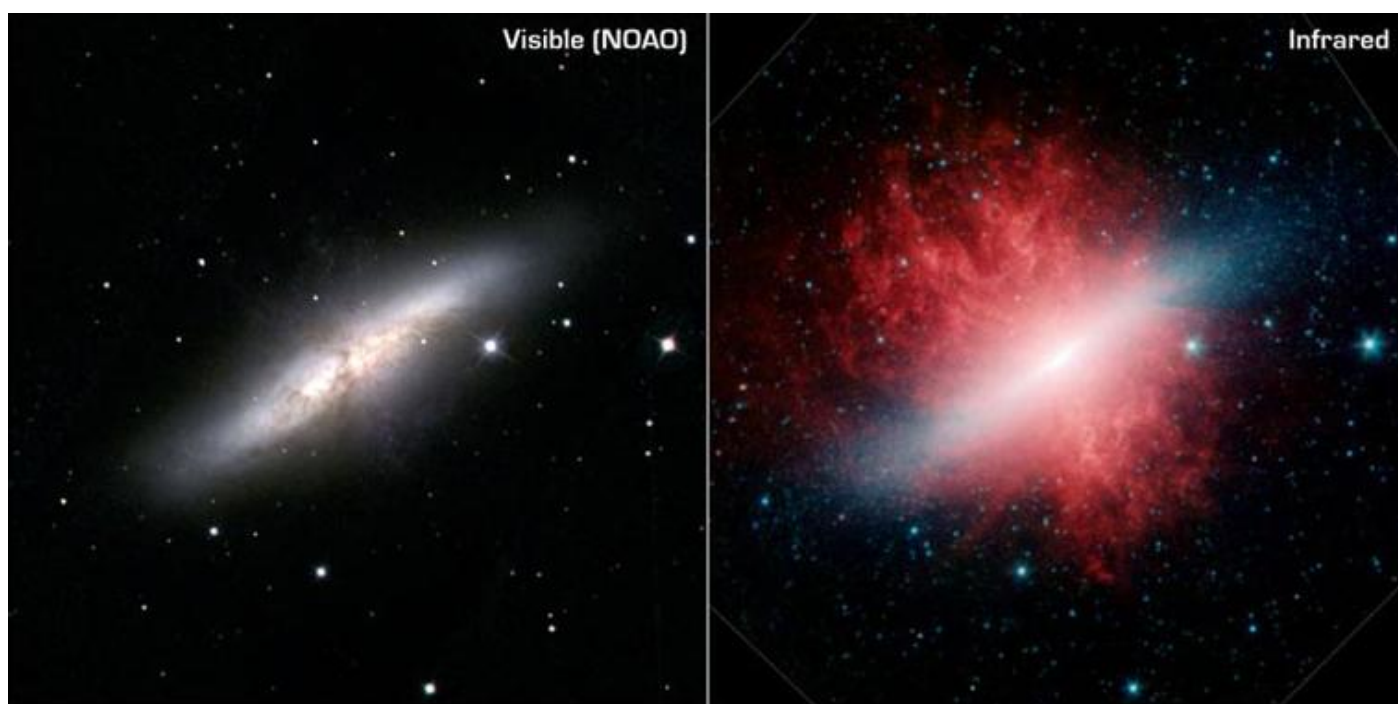
A kozmogeológia által leginkább vizsgált objektumok

Ahogy a fentiekben is említettük, a szűkebb értelemben vett kozmogeológia jelenleg két objektumcsoportot tud vizsgálni: a **csillagközi port** és az **exobolygókat**. Az előbbi az egész Galaxist átfogó vizsgálati térséget tudhat magáénak, míg az exobolygók vizsgálatához előbb meg kell találni azokat a potenciális csillagokat, amelyek körül bolygók keringhetnek, és ráadásul ezek jelenlétét valamilyen (sok esetben csak kombinált) módszerrel ki lehet mutatni. Fontos megjegyezni, hogy mindkét esetben az ún. kiválasztási effektus komoly szerepet játszik: az objektum elhelyezkedése és a Föld (vagy az űrtávcső) pozíciójának relatív helyzete sok objektumot kizár a vizsgálatból, pl. egy távolabbi exobolygó esetén, amikor olyan a látószög, hogy a bolygó pályájára „felülről” látunk rá, fedés nem várható.

Nézzük hát a vizsgált objektumainkat.

A csillagközi por

A csillagközi por apró szilárd szemcsékből áll (néhány tized nm-től mm-ig terjedő méretűek, de általában nm– μ m tartományban vannak), amelyek a Galaxis gázfázisában szóródnak szét. A por szabályozza a háttérből érkező fény abszorpcióját és vörösödését, katalizálja a kémiai folyamatokat (különösen a H_2 képződését), dominál a távoli infravörös/szubmilliméteres sugárzásban, polarizálja a csillagfényt, és szabályozza a hőegyensúlyt és a csillagkeletkezés fizikáját. Fő alkotóelemei a szilikátok, a szénelapú anyagok (amorf szén, policiklusos aromás szénhidrogének (PAH-ok)), a sűrű felhőkben található jég és kisebb mennyiségű fém/szulfid fázisok; a meteorokban preszolár refraktáló szemcsék (szilícium-karbid (SiC), grafit, nanogyémántok) találhatók. A por csillagokból kiáramló anyagban és szupernóvákban keletkezik, a csillagközi anyagban alakul át (porlasztás, szétzúzás, koaguláció, köpenynövekedés), és részben megsemmisül a lökéshullámok hatására – így folyamatos por-életciklus jön létre. A megfigyelési diagnosztika kiterjed az UV–optikai extinkcióra, a spektroszkópos jellemzőkre (szilikátsávok 9,7/18 μ m-en, PAH-sávok), a termikus emisszióra (közép-IR–mm), a polarizációra és az in situ mintavételre. A modellek (MRN, THEMIS, Draine & Li) paraméterezik a szemcseméret-eloszlást és az optikai tulajdonságokat; a Spitzer, Herschel, Planck, ALMA és JWST modern adatai finomítják őket.



↑ Az Messier–82 köd a Spitzer Űrteleszkópjának felvételén: balra látható fényben, jobbra hamisszínes infravörös képen. (NASA/JPL-Caltech/R. Kennicutt (Cambridge, University of Arizona) and the SINGS team)

Exobolygók

Exobolygóknak nevezzük azokat a többnyire szilárdnak feltételezett égitesteket, amelyek más csillag vagy csillagok körül keringenek. (Itt jegyezzük meg, hogy a csillagok jelentős része kettős vagy többes rendszert alkot.) Az exobolygók kutatása nagyon fiatal szakterület, csak néhány évtizedes, mivel a szükséges méréstechnológia (és részben az elméleti háttér) korábban nem állt rendelkezésre.

Az első exobolygókat lényegében a kettőscsillagok kutatási módszertana alapján találták meg, ezek kifejezetten nagy tömegűnek és méretűnek gondolt égitestek. Ezeket a módszereket finomították, és bizonyos modellfeltételekkel továbbfejlesztették.

A legjobban mérhető exoplanetáris mennyiségek a **pályaparaméterek**, a **sugár** (átmenetekből), a **tömeg** (radiális sebességből (RV) vagy az fedések időtartamából), valamint a bolygók egy részének **légmörének spektruma** (átvilágítás, emisszió, visszaverődés). Ezekből következtetünk a **sűrűsége**, a valószínűsíthető belső rétegződésre, a légkör összetételére, és – bizonyos körülményekkel – az aktív geológiai jelekre (pl. vulkanizmus) a közvetett légköri jelek vagy a hőmérsékleti változékonyság alapján. A JWST és a közelgő missziók (ARIEL) drámai módon javították és javítani fogják az exobolygó-légkörök jellemzésének képességeit, de továbbra is fennállnak jelentős modellezési nehézségek (tömeg–sugár összetétel ekvivalencia, spektrumok felhők/köd általi eltakarása, halvány gazdacsillag – nagy méretű bolygó összetévesztés), amelyek korlátozzák a kőzet-exobolygók részletes felszíni geológiai jellemzésének következtetéseit.

1. Az alapvető megfigyelhető jelenségek és elsődleges következtetések

1.1 Amit közvetlenül mérhetünk

- Keringési idő, átvonulási/fedési intenzitáscsökkenés és időtartam, radiális sebességgörbe → bolygó sugara (R_p), pálya félnagy tengelye (a) és bolygó tömege (M_p), ha RV (Radial Velocity) adatok vagy TTV (Transit Timing Variation) adatok állnak rendelkezésre.
- A csillagparaméterek (spektrális típus, sugár, luminozitás) döntő fontosságúak: az összes bolygó tulajdonságát a gazdacsillaghoz viszonyítva határozzák meg.
- Az átvonulás/fedés közben mért spektrum, illetve spektrofotometriás vizsgálat (transzmissziós spektroszkópia), a másodlagos napfogyatkozás (emissziós spektrum) és a fázisgörbék hullámhossz-függő információkat adhatnak a bolygó légköréről és a nappali/éjszakai oldal fényességéről. A közvetlen képalkotás és a nagy felbontású spektroszkópia spektrumokat adhat az egymástól távol eső bolygók esetén.

1.2 Elsődleges következtetések

- Térfogatsűrűség ($\rho = M/R^3$) → durva osztályozás: gázszerű (alacsony sűrűség), jégben gazdag (a Föld sűrűségénél kisebb sűrűség) vagy kőzetbolygó (nagy sűrűség). De különböző belső összetételek is megfelelhetnek ugyanannak a ρ értéknek (ekvivalencia). A modern tömeg–sugár vizsgálatok számszerűsítik ezeket az ekvivalenciákat és meghatározzák a valószínűségi összetétel osztályokat, de az $M-R$ értékekből önmagukban nem lehet egyértelműen meghatározni az ásványtani összetételt.
- A csillagfluxus és az albedó alapján számított egyensúlyi hőmérséklet (T_{eq}) → meghatározza, hogy mely illékony anyagok létezhetnek (pl. kőzet, olvadt anyag, gőz), és információt ad a felszín/légkör kémiai összetételéről és fázisairól.

2. Légkörök távérzékelése: az exobolygók geológiájának legfontosabb ablaka

A légkörök a távoli világok legkönnyebben hozzáférhető „geológiai” ujjlenyomatai. Az olyan folyamatok, mint a vulkáni gázkibocsátás, a mállás, a légköri szivárgás, sőt a felszíni ásványtan (a gáz-kőzet kölcsönhatások révén) spektroszkópos nyomokat hagyhatnak maguk után.

2.1 Technika

- Transzmissziós spektroszkópia (átmenet során): a csillagfény az exobolygók légkörén keresztül szűrődik, és az atomok, molekulák és aeroszolok (felhők/ködök) által okozott, skálamagasság súlyozott abszorpciót mér. Érzékeny a nyomgázokra, de a felhők/ködök csökkentik a diagnosztikai

tulajdonságokat. A JWST forradalmasította ezt a technikát széles hullámhossz-lefedettséggel és nagy pontossággal.

- Másodlagos napfogyatkozás és emissziós spektroszkópia: a nappali oldalról érkező hőemisszió (és esetenként a visszavert fény) mérése; hasznos a hőszerkezet és a molekuláris sávok (CO, CO₂, H₂O, CH₄) vizsgálatához. A fázisgörbék ezt kiterjesztik a hosszúsági térképezésre (nappal–éjszaka kontraszt).
- Nagy felbontású földi spektroszkópia / keresztkorreláció: szűk molekuláris vonalak és Doppler-eltolódások felbontása, a bolygó jelének elválasztása a csillagtól (jól működik forró Jupiter-típusú bolygók és közvetlenül leképezett óriások esetében).
- Közvetlen képalkotás: térben elválasztja a bolygó fényét (ez könnyebb a fiatal, saját fényű óriásbolygók esetében), és lehetővé teszi a csillagfénytől nem zavart spektroszkópiát, ami szükséges a jövőbeli felszíni spektrális térképezéshez.

2.2 Mit árulnak el a légköri spektrumok a geológiáról?

- Molekuláris leltár (H₂O, CO₂, CO, CH₄, NH₃, SO₂, H₂S, fémek): korlátozza a illékony anyagok tárolóhelyeit, a fotokémiát és a lehetséges vulkáni gázkibocsátást. Például a SO₂ kimutatása egy kőzetbolygó légkörében aktív kén-kibocsátásra (mint az Io/Vénusz esetében) vagy fotokémiai forrásokra utalhat. A JWST referencia spektrumokat szolgáltatott, amelyek H₂O, CO és CO₂ jelenlétét mutatták ki több exobolygón, növelve ezzel a légköri visszakeresések megbízhatóságát.
- Hőmérséklet-nyomás (T - p) profil: az emissziós spektrumok és fázisgörbék korlátozzák a termikus szerkezetet; a termikus inverziók és a forrópontok utalhatnak a légköri dinamikára és a hő újraeloszlására (amelyeket a felszín/óceán vagy a vulkáni melegítés befolyásol a földi világokban).
- Aeroszolkok (felhők/ködök): megfigyelések szerint elnyomják a spektrális jellemzőket; az aeroszolkok összetételének modellezése segít a kondenzátumok és esetlegesen a felszín–légkör közötti csere feltételezésében (pl. a szilikátfelhők szuperforró felszíneket, a fotokémiai ködök pedig gazdag szerves anyagokat jelezhetnek).
- Időbeli változékonyság (TTV): a spektrális vonalak vagy a kontinuum időbeli változásai (pl. átmeneti SO₂ növekedés) epizodikus vulkanizmust vagy légköri behatásokat jelezhetnek. Az ilyen jelek modellezése és kutatása aktív kutatási terület. Számos közelmúltbeli tanulmány tárgyalja a vulkanizmus átmeneti légköri SO₂ vagy hőjelek segítségével történő észlelésének kilátásait és kűszöbértékeit.

3. Következtetések a belső szerkezetre a tömeg, a sugár és a spektrumok alapján

3.1 Belső modellek

- Az előrejelző modellek a feltételezett öves összetétel (vasmag, szilikátköpeny, illékony rétegek, H/He légkör) sugarát számolják ki az állapotegyenletek segítségével; az inverz problémák a tömeg és a sugár alapján próbálják meg meghatározni az összetétel valószínűségi eloszlását. Ugyanazt az M - R párost azonban létrehozhatja egy sűrű, vasban gazdag bolygó, vagy egy kisebb mag, amelynek nagy nyomású jégrétege van – az ekvivalencia-jelenség továbbra is fennáll. A statisztikai módszerek és a populációs trendek segítenek (pl. átmenet $\sim 1,6 R_{\text{Föld}}$ között a kőzetek és az illékony anyagok által dominált bolygók között).

3.2 A kőzetbolygók felszíni összetétele

- A kis kőzet-exobolygók felszínének közvetlen spektroszkópiája ma még rendkívül nehéz feladat; a termikus IR másodlagos napfogyatkozás és a visszavert fény spektrumai elvileg megmutathatják az ásványi anyagok (szilikátok, vasoxidok, jég) abszorpcióját, de ehhez nagyon magas jel/zaj arányra és a légköri jelek eltávolítására van szükség. A felszínnek feltérképezése (albedó-heterogenitás, óceánok csillogása) egy fejlődő terület, és a tanulmányok azt mutatják, hogy a fázisgörbék és a polarizált fény hogyan korlátozhatják a felszíneket (óceánok csillogása, érdesség) a kedvező közeli bolygók esetében.
- Közvetett következtetések: a légkör összetétele (pl. nagy mennyiségű CO_2 és alacsony H_2O) és az egyensúlyi hőmérséklet kőzeldomináns felületeket jelezhet; a gázok (SO_2 , H_2S) aktív vulkanizmust és a kéreg összetételét sugallhatják.

4. Geológiai aktivitás keresése: vulkanizmus, tektonika és óceánok

4.1 Vulkanizmus

- Megfigyelhető jelek: vulkáni gázok (SO_2 , H_2S) átmeneti növekedése, hőmérsékleti hotspotok a közép-infravörös tartományban, a felsőlégkörbe juttatott részecske-aeroszolok és időben változó visszavert fény. Számos modellezési tanulmány kimutatja, hogy kedvező esetekben (közeli, fényes rendszerek, intenzív kitörések) nagy vulkáni események is észlelhetők, és a JWST/következő generációs távcsövek célja ezeknek az átmeneti jeleknek a vizsgálata.
- Kihívások: a gazdacsillagok változékonysága, a fotokémiai maszkolás és a gyakori megfigyelés szükségessége az átmeneti események észlelése érdekében megnehezítik a megbízható észlelést.

4.2 Tektonika és mágneses terek

- Tektonika észlelése: még nem létezik közvetlen módszer a lemezek feltérképezésére az exobolygókon. Közvetett mutatók közé tartoznak a hőemissziókból következtetett felszíni hőáramlás, vagy a hosszú távú CO_2 -ciklusnak megfelelő globális légköri tulajdonságok. A tektonika távoli bizonyítása rendkívül nehéz.
- Mágneses terek: közvetett módon megfigyelhetők a csillag–bolygó kölcsönhatás jelei, íves lökéshullámok vagy rádióemisszió (a kutatások folyamatban vannak) alapján. A bolygó mágneses terének kimutatása jelentősen korlátozná a belső konvekciót és hűtést – és így a belső geológiát –, de a kimutatásuk ritka és ma még komoly kihívást jelentenek.

4.3 Óceánok és lakhatóság

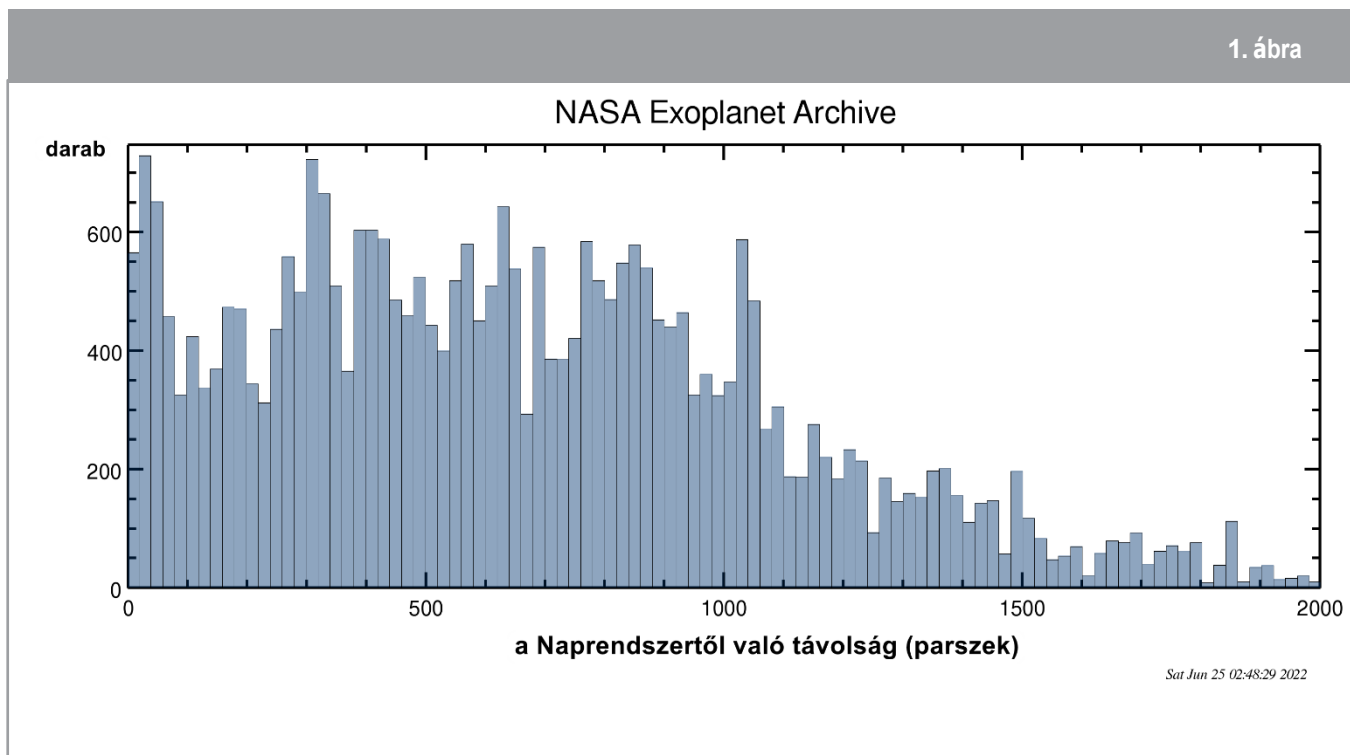
- Óceánok észlelési módszerei:
 - Visszaverődő fényben megjelenő csillogás (fázisgörbék) – közvetlen képalkotást igényel látható/NIR tartományban és kedvező geometriát.
 - Légköri vízgőz + folyékony vízzel összhangban lévő felszíni hőmérséklet – hőemissziós/másodlagos napfogyatkozási spektrumokból következtetve.

A módszer korlátai: a felhők utánozhatják vagy elrejtik a csillogást; vízgőz jelen lehet atmoszférában is, stabil felszíni víz nélkül.

4. Egy kis exobolygó-statisztika, példákkal

2025. december 18-i állapot szerint 6065 megerősített exobolygó létezik 4518 bolygórendszerben, melyek közül 1025 rendszerben egynél több bolygó található.

Ha a felfedezett exobolygó-rendszereknek a Naprendsztől való távolságát tekintjük, akkor kb. 1000 parszekig (3260 fényév) kisebb fluktuációkkal közel egyenletes a megtalált rendszerek eloszlása, innen értelemszerűen lassan csökken a darabszám, hiszen a felfedezés módszertanának alkalmazása a távolsággal egyre nehezebb, így a siker valószínűsége is csökken. Jelenleg kb. 2000 parszek (6520 fényév) a felfedezés határa.



↑ Az exobolygó-rendszerek térbeli eloszlása a Naprendsztől való távolság függvényében (2022 júniusi adatok).

A legfontosabb exobolygók kategóriái közül kiemelkedő példák a következők, amelyek felfedezésük óta kulcsszerepet játszanak a csillagászatban, különösen a lakhatóság és a bolygóformák megértésében.

Az első exobolygó

- **51 Pegasi b** (felfedezés: 1995): Michel Mayor és Didier Queloz radális sebesség módszerrel találták meg, ami forradalmasította az exobolygó-kutatást – Nobel-díjat is értek érte. Ez egy forró Jupiter típusú gázóriás, anyacsillagja körül nagyon közeli pályán kering (4 napos periódus), ami megkérdőjelezte a bolygóképződés addigi elméleteit.

A legnagyobb ismert exobolygó

- **HAT-P-67 b** (felfedezés: 2017): Átmérője körülbelül kétszerese a Jupiterének, tömege viszont alacsonyabb, így "foszlado" vagy "habos" szerkezetű lehet, ami új betekintést ad a hatalmas gázbolygók inflációba került fejlődésébe. A Kepler-űrtávcső adatai alapján azonosították, és érdekes, mert anyacsillaga közelében keringve folyamatosan veszít anyagból.

Legfontosabb potenciálisan lakható exobolygó

- **Proxima Centauri b** (felfedezés: 2016): A legközelebbi exobolygó a Földhöz (4,2 fényév), a legközelebbi csillag lakhatósági zónájában kering, ahol folyékony víz létezhet. Vörös törpe

csillag körül pályázza, ami flare-ek miatt kihívást jelent az életre, de holdjai vagy felszíne alatti óceánok miatt prioritás a JWST megfigyeléseiben.

Vizes vagy óceánbolygó jellegű exobolygó

- **TOI-1452 b** (felfedezés: 2022): Szuperföld méretű (kb. 70% vízösszetételű becslés szerint), valószínűleg óceán borítja teljesen, anyacsillagjának lakhatósági zónájában helyezkedik el. A TESS küldetés fedési adataiból fedezték fel, és infravörös megfigyelések alapján vízgőz jelenlétét valószínűsítik a légkörben, ami ideális a víz alapú élet kutatására.

További kiemelkedő példák

- **TRAPPIST-1 e** (felfedezés: 2017): Hét Föld-méretű bolygó rendszeréből a leglakhatóbb, erős jelzések utalnak vízre és lehetséges légkörre; JWST-vel vizsgálják.
- **K2-18 b** (felfedezés: 2015): Hycean bolygó (hidrogénben gazdag óceáni világ), ahol vízpára és esetleg dimetil-szulfidot mutattak ki, ami biológiai eredetű lehet.

→ 1. tevékenység: Kémiai elemek a Világegyetemben

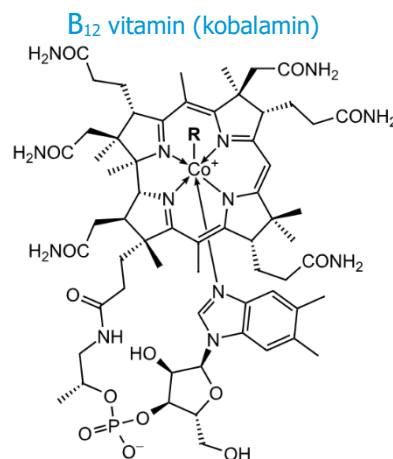
Az alábbi tevékenység keretében a tanulók megértik az elemek szerepét és eredetét a Világegyetemben.

Eszközök

- Kinyomtatott tanulói munkalapok (benne szürke, kiszínezhető periódusos rendszer (tanulónként 1 db)
- Színes ceruzák

Gyakorlat

A háttéranyag alapján magyarázzuk el, hogy a ${}^1\text{H}$ (és részben a ${}^2\text{He}$) az ősrobbanás után alakult ki (${}^2\text{He}$ folyamatosan keletkezik a csillagokban, például a Napban is), a He-nál magasabb rendszámú elemek, egészen a vasig (${}^{26}\text{Fe}$) alárendelten keletkeznek a csillagokban, pl. a Napban működik a szintén energiatermelő CNO-ciklus (bár a ${}^6\text{C}$, ${}^7\text{N}$, ${}^8\text{O}$ csak katalizátor, jelen kell legyenek). Ugyanakkor a ${}^{26}\text{Fe}$ -nél magasabb rendszámú elemek az uránig (${}^{92}\text{U}$) (kivéve a technéciumot (${}^{43}\text{Tc}$), ami a természetben nem fordul elő) csak szupernova-robbanásokban jönnek létre. Idézzük a híres író, Isaac ASIMOV-ot: „Szupernovák gyermekei vagyunk.” Vehetjük példának a B₁₂ vitamint (másnéven kobalamin), amiben a központi helyen egy ${}^{27}\text{Co}$ (kobalt) atom helyezkedik el, és a ${}^{27}\text{Co}$ a ${}^{26}\text{Fe}$ utáni elem, tehát szupernova-termék. Hozhatjuk izgalmas példaként az aranyat, az ezüstöt is: minden arany (nagyon-nagyon kevés mesterségesen előállított aranyat kivéve) és minden ezüst szintén valamikor egy szupernova-robbanásban keletkezett.



Színeztessük ki a periódusos rendszert úgy, hogy az ősi elemek kékek, a csillagokban keletkezők zöldek (${}^3\text{Li}$ - ${}^{26}\text{Fe}$), a szupernovákban keletkezettek (${}^{27}\text{Co}$ - ${}^{92}\text{U}$) sárgák legyenek, a mesterségesen előállítottak (${}^{43}\text{Tc}$ és a transzurán elemek) maradjanak fehéren.

1 H																	2 He	
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
55 Cs	56 Ba	57 La	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89 Ac	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
			*	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
			**	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	

→ 2. tevékenység: Ismerkedés az űrtávcsövekkel

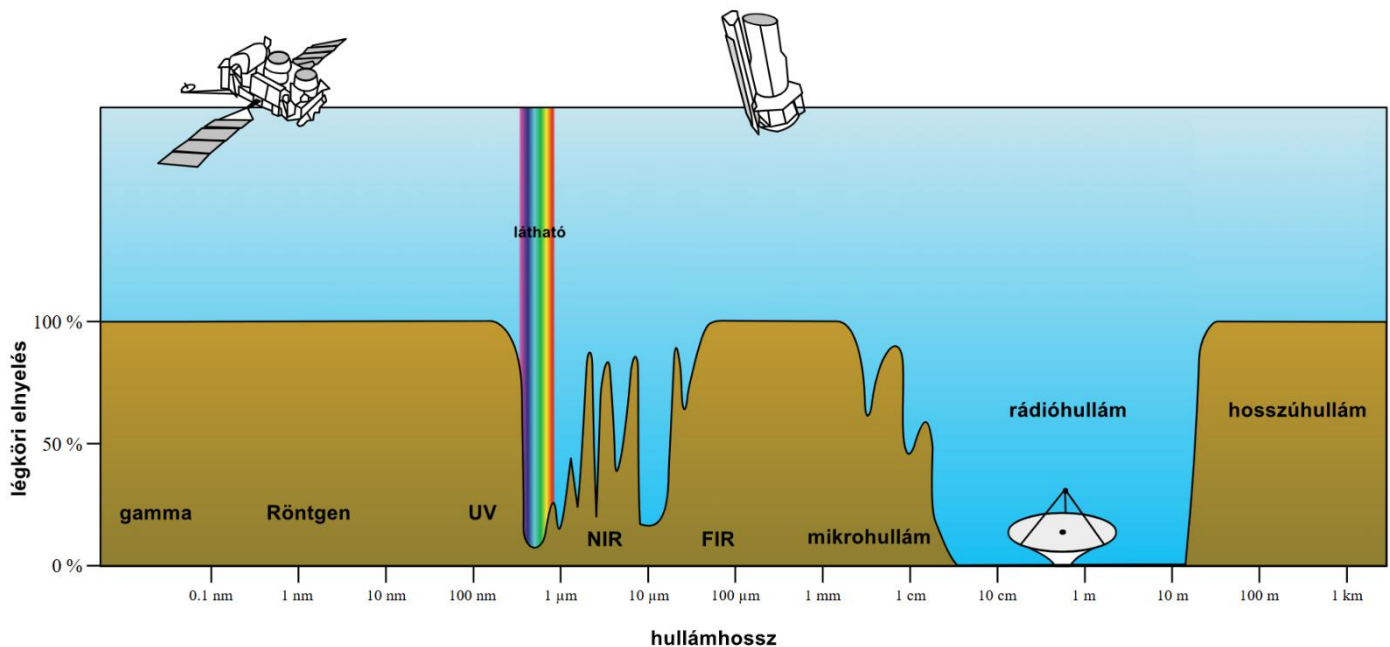
Az alábbi tevékenység keretében a tanulók megismerkednek a légkör elektromágneses hullámokra gyakorolt szűrőhatásával. Ennek kapcsán megértik, hogy miért van szükség űrcsillagászatra. Ugyanebben a tevékenységben ismerkednek meg a csillagközi por mibenlétével és jelentőségével.

Eszközök

- Kinyomtatott tanulói munkalapok (tanulónként 1 db)
- Színes ceruzák, írószer

Miért kellenek az űrtávcsövek?

Ismertessük meg a diákokat a légkörnek az elektromágneses hullámokra gyakorolt hatásával. A munkalapon jelöltessük be az ábrán, hogy mely hullámhossz-tartományokban nem, vagy csak részben hatol át a sugárzás a légkörön.



A munkalapon jelöltessük be az ábrán, hogy mely hullámhossz-tartományokban nem, vagy csak részben hatol át a sugárzás a légkörön.

A háttéranyag alapján magyarázzuk el a tanulóknak, hogy az űrcsillagászatra miért van szükség. A táblázatból válasszunk ki néhány fontos űrtávcsövet (a Herschel és a JWST mindenképpen legyen benne) és ismertessük a tulajdonságaikat, és azt, hogy mi (volt) a misszió célja.

A csillagközi por bemutatása

Ennél a tevékenységnél mutassuk be a csillagközi por jelenségét, hívjuk fel a figyelmet arra, hogy mi a jelentősége a csillagkeletkezésben, illetve hogy a (szilárd) szemcsék felszíne fontos helyszíne lehet a különféle gázok megtapadásának, és ezzel az anyag fejlődéséhez is hozzájárulnak.

Mutassuk be, hogy az űrtávcsövek milyen szerepet játszanak a csillagközi por feltérképezésében a különböző hullámhossz-tartományokban.

→ 3. tevékenység: Exobolygók

Az alábbi tevékenység keretében a tanulók részletesen megismerkednek az exobolygókkal, az exobolygók kutatásával, és megértik, hogy a Naprendszer 8 bolygója is eléggé különbözik egymástól, de a viszonylagos közelünkben (néhány ezer fényév) még ennél is furcsább, különbözőbb bolygók léteznek.

Exobolygók kutatása

A tanár a segédanyagok alapján bemutatja az exobolygó kutatási módszereket, ügyelve arra, hogy a fókuszban mindig a „miért?” kérdése legyen, azaz az exobolygó-felfedezés, és az egyes tulajdonságok meghatározása (tömeg, sűrűség, a gazdacsillagtól való távolság, a felszínborítás, az esetleges légkör, a felszín hőmérséklete, stb.) álljon a középpontban. Ez azért is szükséges, hogy a következőkben a diákok maguk tudják, hogy hogyan kell felderíteni ezeket a tulajdonságokat.

Exobolygó példák

Az alábbiakban valós exobolygókat sorolunk fel, de egyszerűsítve. Attól függően, hogy mennyi idő van rá, illetve a tanár mennyire szeretné a konkrét példákat elmélyíteni, kikerestetheti az adatbázisból vagy az angol Wikipédiából, hogy az adott pillanatban mit tudunk pontosabban az adott exobolygókról. Ha nem akarjuk elmélyíteni, akkor használhatjuk ezt az egyszerűsített listát is.

1. Kepler-452b

- Típus: szuperföld
- Csillag: Nap-szerű
- Hőmérséklet: mérsékelt
- Előny: stabil lakhatósági zóna
- Hátrány: nagy gravitáció

2. WASP-12b

- Típus: forró Jupiter
- 2500 °C
- Előny: rendkívül látványos légköri jelenségek
- Hátrány: extrém árapályfűtés

3. TRAPPIST-1e

- Típus: kőzetbolygó
- Csillag: vörös törpe
- Előny: felszíni víz lehet
- Hátrány: gyakori kitörések

4. 55 Cancri e

- Típus: gyémántbolygó (valószínű)
- 2000 °C
- Előny: egzotikus összetétel (C-domináns)
- Hátrány: extrém hőség

5. GJ 1214b

- Típus: vízvilág
- Előny: vastag vízburkolat
- Hátrány: szuperkritikus óceán

6. HD 189733b

- Típus: forró Jupiter
- Előny: jól kutatott

- Hátrány: üvegszerű mikroszemcse-eső

7. Kepler-22b

- Típus: vízben gazdag szuperföld
 - Előny: stabil éghajlat
 - Hátrány: mélytengerek → kevés kontinentális folyamat

8. K2-141b

- Típus: lávabolygó
- 3000 °C nappali oldal
- Előny: lávaóceán
- Hátrány: atmoszféra elpárolog

9. Proxima b

- Típus: kőzetbolygó
- Előny: közeli
- Hátrány: erős részecskesugárzás

10. Kepler-438b

- Típus: Föld-szerű
- Előny: jó besorolás
- Hátrány: változó csillag

→ 4. tevékenység: Exobolygó-játék – Exobolygók ásványtani kártyái

A tevékenység keretében a tanulók játékosan sajátítják el a kutatási módszereket, megtanulják az exobolygók legfontosabb sajátosságait és kutatási módszertanról dönthetnek, hogy hogyan vizsgálják meg az adott „felfedezett” exobolygókat.

A JÁTÉK DIDAKTIKAI CÉLJA

A tanulók:

- megértsék az **ásványtan – geokémia – planetológia** kapcsolatát,
- következtetéseket vonjanak le **környezeti feltételekből** (T , p , légkör),
- gyakorolják a **modellezést és hipotézisalkotást**,
- felismerjék, hogy **nem minden bolygó „Föld-szerű”**.

TANÁRI ÖSSZEFOGLALÓ ÚTMUTATÓ

Az **1. mellékletben** találunk 20 db fiktív exobolygó leírását (és az egyszerűség kedvéért vizsgálati módszereket, kérdésfeltevéseket. Természetesen ez utóbbiakat a diákoknak kiadandó kártyákról le kell venni. Az exobolygók fiktívek, de valós fizikai és geokémiai elvek alapján lettek megalkotva, továbbá figyelembe vettük a didaktikai célt is, nevezetesen, hogy kutatómetodikailag viszonylag egyszerűen meg lehessen oldani a feladatot.

Ajánlott óraszervezés

- 3–4 fős csoportok
- Minden csoport 2–3 bolygó-kártyát kap
- Feladat: **értelmezés, összehasonlítás, következtetés**

Kulcskérdések tanárnak

- Milyen környezeti tényezők határozzák meg az ásványos összetételt?
- Mi hiányzik ezekről a bolygókról a Földhöz képest?
- Hol lenne esély geológiai aktivitásra? Életre?

Ez az anyag kiválóan alkalmas:

- „Honnan tudjuk?” típusú órákhoz
- projektalapú tanuláshoz
- pályaorientációhoz (asztrofizika, földtudomány, adatfeldolgozás)

A diákok nem adatokat tanulnak, hanem: megfigyelés → modell → következtetés logikát követik.

A tanár dönti el, hogy a kártyáknak mely adatait adja oda a csoportoknak. Az egyik játszási technika szerint előbb csak kevesebb információt kapnak, és három „megfigyelési” kört lehet rendezni, mindegyik körben megkapják azt az információt, amilyen módszert alkalmaztak, és a végén kell bemutatniuk, hogy szerintük milyen az addig megszerzett információ alapján a kérdéses exobolygó.

ÉRTÉKELÉSI JAVASLAT

Kritérium	Pont
Logikus következtetés	0–2
Tudományos nyelvezet	0–2
Kreativitás	0–2
Csoportmunka	0–2

Max: **8 pont**

A tanulók számára egyértelművé kell, hogy váljon, hogy milyen módszereket alkalmaznak az exobolygó-kutatásban, az egyes módszerek a bolygók mely sajátosságait képesek meghatározni, és a szükséges kéttel közelítsék meg a problémát, nevezetesen, hogy a végkövetkeztések hibásak is lehetnek.

JÁTÉKALTERNATÍVA

Amennyiben rövidebb és kevésbé bonyolult játékot szeretnénk (pl. fiatalabb diákok számára) alternatívát kínál a következő játék:

Az exobolygó-kártyákat (fedve) kiosztjuk, és körönként (előre) ki kell választani egy kategóriát:

- hőmérséklet
- lakhatóság
- összetétel érdekesség
- geológiai aktivitás
- bányászhatóság
- légkör különlegessége
- víz jelenléte, mennyisége és formája (tengervíz/édesvíz, fagyott/folyékony)
- potenciális tudományos érték

Ezt vagy a tanár mondja meg, vagy (ha már gyakorlottak a diákok) az előző kör nyertese (esetleg az, aki(k)nek a legkevesebb kártyája van (utóbbi kiegyenlítőbb)).

A diákok „csatáznak”: beadnak a körbe egy kártyát, nyitva az asztalra teszik, amiről elmondják, hogy miért jobb az adott bolygó geológiai szempontból (30 másodperc).

A tanár vagy a csoport szavaz → 1 pont a győztesnek.

A bedobott kártyákat a kör nyertese magához veszi, és a többi körben felhasználhatja. Játshatjuk úgy is, hogy a kör nyertesének egy vagy több lapot le kell tenni a talonba, és akinek elfogyott a lapja, onnan húzhat. (Ez utóbbi kicsit lassítja, kiegyenlíti a játékot.)

Az nyer, akinek 5 pontja összegyűlik.

Az a kevés (látszó) anyag, ami nem plazma a Világegyetemben

→ 1. tevékenység: Kémiai elemek a Világegyetemben

Az különböző kémiai elemek különbözőképpen és különböző időpontokban jelentek meg a Világegyetemben. A tanári útmutatás alapján színezd ki a periódusos rendszert úgy, hogy az igazán ősi elemeket kézzel, a Napban és más csillagokban keletkezőket zölddel, a csak szupernóva-robbanásban keletkezőket sárgával színezd. A mesterségesen előállított elemeket hagyd fehérén.

1 H																	2 He	
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
55 Cs	56 Ba	57 La	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89 Ac	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
			*	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
			**	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	

A híres író, Isaac Asimov (1920–1992) a szupernóvákról írott könyvében ezt írja: „*Szupernóvák gyermekei vagyunk.*” Vajon miért írta ezt?

.....

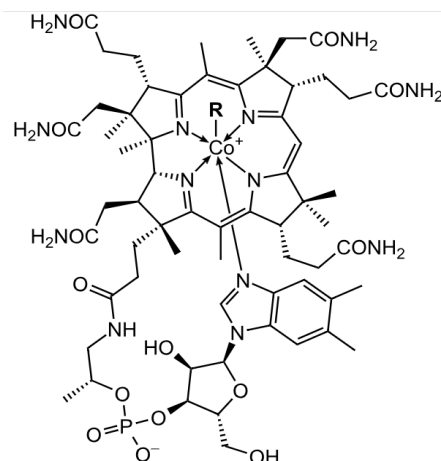
.....

.....

.....

Minden B₁₂ vitamin molekulájának közepén egy kobaltatom (²⁷Co) helyezkedik el. Ez azért érdekes, mert a kobaltnak nagyobb a rendszáma, mint a vasnak (²⁶Fe) vagyis csak szupernóvákban keletkezhet.

A B₁₂ vitamin molekulája, felül középen a kobaltatommal. →



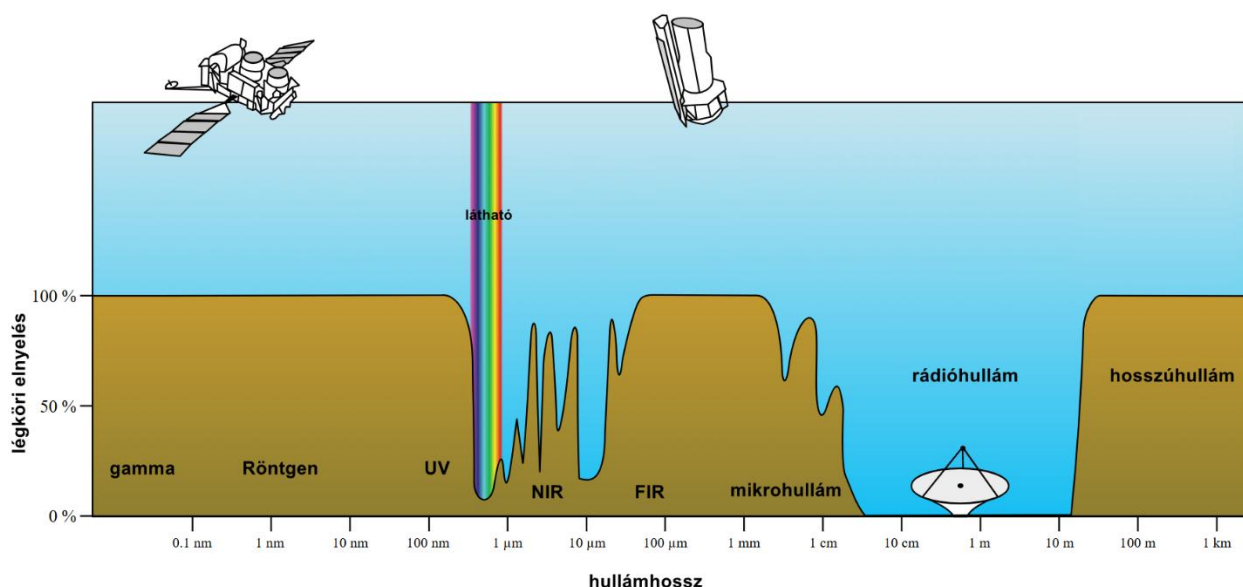
R = 5'-deoxyadenosyl, CH₃, OH, CN

Tudtad?

→ 2. tevékenység: Ismerkedés az űrtávcsövekkel

A légköri hullámhossz-ablakok

A Föld légköre az elektromágneses sugárzás nem minden hullámhosszát engedi át. Jelöld be az ábrán, hogy melyek azok a hullámhossz tartományok, ahol a sugárzás 100%-át kiszűri a légkör!



Miért kell az űrbe telepítenünk a távcsöveinket, ha közeli (NIR), közép- vagy távoli (FIR) infravörös hullámhossz-tartományban szeretnénk észlelni?

.....

.....

.....

.....

A tanár által bemutatott űrtávcsövek adataival töltsük ki a táblázatot!

Űreszköz neve	Kb. mikor működött?	Mi (volt) a feladata?	Megj.

→ 3. tevékenység: Ismerkedés az exobolygókkal

A tanári bemutató során számos módszer elhangzott, ami az exobolygók egyes tulajdonságainak megállapítására szolgál. Készíts táblázatot, ami ezeket összefoglalja:

Az exobolygó melyik tulajdonságát határozzuk meg?	Mi a módszer, amivel ezt meg tudjuk állapítani?	Milyen korlátai vannak a módszernek?

A tanári bemutató tartalmazott néhány felfedezett exobolygót és azok tulajdonságait. Készíts feljegyzést **három exobolygóról**, hogy számodra az adott exobolygó miért volt érdekes, melyik tulajdonsága ragadta meg a fantáziádat (mérete? forró felszíne? hatalmas óceán? vastag jégkéreg? talán sok gyémántot rejt a mélye? esetleg lakható?).

1. exobolygó neve: Szerinted fontos tulajdonsága(i):
 Miért tartod érdekesnek ezt az exobolygót?

2. exobolygó neve: Szerinted fontos tulajdonsága(i):
 Miért tartod érdekesnek ezt az exobolygót?

3. exobolygó neve: Szerinted fontos tulajdonsága(i):
 Miért tartod érdekesnek ezt az exobolygót?

→ 4. tevékenység: Exobolygó-játék

1. A DIÁKOK MEGFIGYELÉSI NAPLÓJA – SABLON

A tanuló vagy a csapat neve: _____

Exobolygó neve: _____

Csoport: _____

Megfigyelési időszak: _____

A. Alapadatok

- Sugár ($R_{\oplus}$):
- Tömeg ($M_{\oplus}$):
- Keringési idő:

B. Megfigyelési módszerek hányadik megfigyelési kör: [1][2][3]

- ☐ Tranzit
- ☐ Radiális sebesség
- ☐ Spektroszkópia
- ☐ Fázisgörbe

C. Mit árulnak el az adatok?*(szöveges magyarázat)*

→ **Linkek**

Az Európai Űrügynökség segédanyagai

Holdtábor-kihívás

esa.int/oktatás/mooncamp

Animációk arról, hogyan juthatunk el a Holdra

esa.int/Education/Moon_Camp/Travelling_to_the_Moon

Oktatási segédanyagok

esa.int/Education/Classroom_resources

Az Európai Űrügynökség űrprojektjei

SMART-1

<http://sci.esa.int/smart-1>

HERACLES

esa.int/Our_Activities/Human_Spaceflight/Exploration/Landing_on_the_Moon_and_returning_home_Heracles

További információk

Az Európai Űrügynökség interaktív Hold-útikalauza

<http://lunarexploration.esa.int/#/intro>

→ 1. MELLÉKLET

A 4. tevékenységhez: A fiktív exobolygók leírása

A fiktív exobolygók leírása: ásványtani kártyák és kutatásmetodikai javaslatok.

1. HELION-4 – ultra-forró lávabolygó

Fizikai paraméterek

- Sugár: $1,3 R_{\oplus}$
- Tömeg: $2,1 M_{\oplus}$
- Átlagos sűrűség: $\sim 6,8 \text{ g/cm}^3$
- Felszínborítás:
 - 60% aktív lávatenger
 - 40% kristályosodó bazaltkéreg

Pálya

- Fél nagytengely: 0,018 AU
- Periódus: 1,2 nap
- Excentricitás: ~ 0 (tidálisan körpálya)
- Tidal locking: igen

Felszíni változás

- Árapályfűtés → állandó vulkanizmus
- A nappali oldalon lávafolyók, éjszakai oldalon megszilárdulás

Megfigyelések

- **Tranzitfotometria (TESS)** → sugár
- **Radiális sebesség (ESPRESSO)** → tömeg
- **JWST NIRSpec emissziós spektrum** → SiO, Na gőz
- **Fázisgörbe-elemzés** → nappali-éjszakai hőmérséklet-különbség

2. CERUS PRIME – száraz szilikátbolygó

Fizikai paraméterek

- Sugár: $1,05 R_{\oplus}$
- Tömeg: $1,1 M_{\oplus}$
- Sűrűség: $\sim 5,5 \text{ g/cm}^3$
- Felszín:
 - kontinensszerű szilikátkéreg
 - nincsenek óceánok

Pálya

- Fél nagytengely: 0,9 AU
- Periódus: 340 nap
- Excentricitás: 0,05

Felszíni változás

- Lassú mállás, porviharok
- Nincs aktív vulkanizmus

Megfigyelések

- **Tranzit + RV**
 - **JWST reflektancia-spektrum** → kvarc/földpát albedó
 - **Fénygörbe hosszútávon** → nincs szezonális változás
-

3. GLACIA-9 – jég-kőzet világ

Fizikai paraméterek

- Sugár: $1,4 R_{\oplus}$
- Tömeg: $2,5 M_{\oplus}$
- Sűrűség: $\sim 4,1 \text{ g/cm}^3$
- Felszín:
 - globális jég
 - alatta sós óceán

Pálya

- Fél nagytengely: 3,2 AU
- Periódus: 5,8 év
- Excentricitás: 0,2

Felszíni változás

- Periasztron környékén **kriovulkanizmus**
- Jégtörések, időszakos gejzírek

Megfigyelések

- **Tranzit-időzítési eltérések (TTV)** → belső óceán
 - **JWST jégabszorpciós sávok**
 - **Időbeli spektrumváltozás** → gejzírek
-

4. FERRUM-X – vasmag-domináns szuperföld

Fizikai paraméterek

- Sugár: $0,95 R_{\oplus}$
- Tömeg: $2,3 M_{\oplus}$
- Sűrűség: $\sim 8,5 \text{ g/cm}^3$
- Felszín:
 - vékony szilikátkéreg
 - vasoxid-mezők

Pálya

- Fél nagytengely: 0,4 AU
- Periódus: 90 nap

Felszíni változás

- Nincs lemeztektonika
- Erős mágneses tér

Megfigyelések

- **RV + tranzit** → extrém sűrűség
- **Csillagszél–bolygó kölcsönhatás** (rádió) → mágneses tér

5. PYROS-7 – Io-szerű vulkáni bolygó

Fizikai paraméterek

- Sugár: $1,2 R_{\oplus}$
- Tömeg: $1,8 M_{\oplus}$
- Sűrűség: $5,9 \text{ g/cm}^3$
- Felszín:
 - bazalt
 - kiterjedt lávamezők

Pálya

- Fél nagytengely: 0,06 AU
- Periódus: 5,5 nap
- Excentricitás: 0,15

Felszíni változás

- Hetes–hónapos vulkáni ciklusok

Megfigyelések

- **Időben változó emissziós spektrum**
- **IR fénygörbe-ingadozás** → kitörések

6. AERIS-3 – karbonátos, sűrű légkörű bolygó

Fizikai paraméterek

- Sugár: $1,1 R_{\oplus}$
- Tömeg: $1,4 M_{\oplus}$
- Sűrűség: $5,2 \text{ g/cm}^3$
- Felszín: karbonátos kőzetek

Pálya

- Fél nagytengely: 0,7 AU

Felszíni változás

- Erős üvegházhatás
- Időszakos karbonát-kicsapódás

Megfigyelések

- **JWST transzmissziós spektrum** → CO₂
- **Fázisgörbe** → vastag atmoszféra

7. NOX-12 – szulfidbolygó

- Sugár: 1,1 R_⊕
- Tömeg: 1,9 M_⊕
- Sűrűség: 6,3 g/cm³
- Felszín: szulfidos kéreg (pirítmezők)
- Pálya: 0,3 AU; P = 65 nap
- Felszíni változás: oxidációs frontok vándorlása
- Megfigyelés:
 - JWST: SO₂ abszorpció
 - Spektrális vörösödés → fém-szulfidok

Elvárt következtetések:

- A nagy sűrűség + szulfidos spektrum → **redukált kémiai környezet**
- Oxigénszegény formálódás (belső bolygó, korai csillagkörnyezet)
- Oxidációs frontok → felszíni-atmoszférikus kölcsönhatás

Megfigyelési logika:

- SO₂ és fém-szulfid spektrumok csak **IR-ben** látszanak
- Időbeli spektrális változás → aktív kémiai átalakulás

8. AQUA-MUNDUS – óceánbolygó

- Sugár: 1,8 R_⊕
- Tömeg: 4,5 M_⊕
- Sűrűség: 3,1 g/cm³
- Felszín: globális óceán
- Pálya: 1,1 AU
- Felszíni változás: árapály által hajtott áramlások
- Megfigyelés:
 - Fázisgörbe kisimultsága
 - H₂O spektrális sávok

Elvárt következtetések:

- Alacsony sűrűség + nagy sugár → jelentős víztartalom
- Egységes felszín → **kontinensek hiánya**
- Stabil klíma → vastag óceán + hőkapacitás

Megfigyelési logika:

- Simított fázisgörbe = nincs nagy albedó-különbség
 - H₂O abszorpció több hullámhosszon → globális vízborítás
-

9. SILICIA-5 – SiC-világ

- Sugár: 1,2 R $\oplus$
- Tömeg: 2,0 M $\oplus$
- Sűrűség: 6,0 g/cm³
- Felszín: szilícium-karbid
- Pálya: 0,15 AU
- Felszíni változás: minimális
- Megfigyelés:
 - Magas albedó
 - SiC emissziós jelek (JWST MIRI)

Elvárt következtetések:

- Magas albedó + hőálló ásványok → extrém száraz, forró környezet
- Oxigénhiányos protoplanetáris korong

Megfigyelési logika:

- MIRI emisszió → SiC ujjlenyomat
 - Stabil spektrum → geológiailag „halott” felszín
-

10. CARBOS-8 – karbonbolygó

- Sugár: 1,3 R $\oplus$
- Tömeg: 2,7 M $\oplus$
- Sűrűség: 5,7 g/cm³
- Felszín: grafit, gyémánt mélyben
- Pálya: 0,5 AU
- Felszíni változás: grafit-erózió
- Megfigyelés:
 - Lapított spektrum
 - Alacsony oxigén

Elvárt következtetések:

- Grafit/gyémánt → C/O arány > 1
- Szokatlan belső szerkezet a Földhöz képest

Megfigyelési logika:

- Lapított spektrum (kevés oxid)
 - Alacsony víz- és oxigénjel
-

11. MAGMA-DELTA – fiatal differenciálódó bolygó

- Sugár: 1,6 R $\oplus$

- Tömeg: $3,8 M_{\oplus}$
- Sűrűség: $4,8 \text{ g/cm}^3$
- Felszín: részben olvadt
- Pálya: $0,08 \text{ AU}$
- Megfigyelés:
 - IR-fénygörbe ingadozás
 - Erős hőkibocsátás

Elvárt következtetések:

- Inhomogén felszín → aktív belső fejlődés
- Részleges olvadás → magas belső hő

Megfigyelési logika:

- IR-fénygörbe fluktuáció → mozgó lávamezők
- Rövid időskálás változások = nem stabil kéreg

12. SALTARA – evaporitvilág

- Sugár: $1,0 R_{\oplus}$
- Tömeg: $1,0 M_{\oplus}$
- Sűrűség: $5,4 \text{ g/cm}^3$
- Felszín: evaporitmezők
- Pálya: $0,9 \text{ AU}$
- Megfigyelés:
 - Magas reflektancia
 - SO_4 abszorpció

Elvárt következtetések:

- Sók → egykori víz, majd párolgás
- Klimatikus instabilitás a múltban

Megfigyelési logika:

- Magas reflektancia
- Szulfát- és klorid-abszorpciós sávok

13. THALASSA-2 – jég alatti óceán

- Sugár: $1,4 R_{\oplus}$
- Tömeg: $2,2 M_{\oplus}$
- Sűrűség: $4,0 \text{ g/cm}^3$
- Felszín: vastag jég, alatta óceán
- Pálya: $2,5 \text{ AU}$
- Megfigyelés:
 - Időben változó jégsávok
 - TTV → belső folyadék

Elvárt következtetések:

- Jég + alacsony sűrűség → folyékony belső réteg
- TTV → deformálható belső szerkezet

Megfigyelési logika:

- Időben változó jégspektrum
- Transzit-időeltolódás

14. METALLON – fémvilág

- Sugár: $0,9 R_{\oplus}$
- Tömeg: $2,8 M_{\oplus}$
- Sűrűség: $9,2 \text{ g/cm}^3$
- Felszín: fémes
- Megfigyelés:
 - Extrém RV-amplitúdó
 - Kicsi sugár

Elvárt következtetések:

- Extrém sűrűség → köpenyvesztés
- Erős mágneses tér feltételezhető

Megfigyelési logika:

- RV dominancia
- Kicsi sugár nagy tömeggel

15. DUSTIA – porbolygó

- Sugár: $1,1 R_{\oplus}$
- Tömeg: $1,2 M_{\oplus}$
- Felszín: globális porréteg
- Megfigyelés:
 - Időben változó albedó
 - Szórt fény dominancia

Elvárt következtetések:

- Globális por → aktív erózió, szél
- Dinamikus felszín

Megfigyelési logika:

- Időben változó albedó
- Szórt fény dominancia

16. CRYO-FERRO – hideg vasas világ

- Sugár: $1,3 R_{\oplus}$

- Tömeg: $2,9 M_{\oplus}$
- Felszín: jég + vasoxid
- Megfigyelés:
 - Spektrális kettősség (jég + Fe)

Elvárt következtetések:

- Jég + vasoxid $\rightarrow$ oxidált, hideg környezet
- Vegyes spektrum $\rightarrow$ heterogén felszín

17. VOLATIS-9 – illékonyakban gazdag

- Sugár: $2,0 R_{\oplus}$
- Tömeg: $5,5 M_{\oplus}$
- Felszín: illékony jég
- Megfigyelés:
 - Metán, ammónia sávok

Elvárt következtetések:

- Nagy sugár, kis sűrűség $\rightarrow$ vastag illékony burok
- Nem Föld-analóg!

Megfigyelési logika:

- CH_4 , NH_3 dominancia
- Transzmissziós spektroszkópia

18. BASALTA-NOVA – stabil bazaltfelszín

- Sugár: $1,2 R_{\oplus}$
- Tömeg: $1,9 M_{\oplus}$
- Felszín: bazalt
- Megfigyelés:
 - Alacsony albedó

Stabil spektrum

Elvárt következtetések:

- Egységes bazalt $\rightarrow$ hosszú ideje stabil kéreg
- Alacsony albedó

19. TECTONIA – lemeztektonikus világ

- Sugár: $1,1 R_{\oplus}$
- Tömeg: $1,3 M_{\oplus}$
- Felszín: kontinensek + óceánok
- Megfigyelés:
 - Időbeli reflektancia-változás

- Hosszú távú stabilitás

Elvárt következtetések:

- Időbeli reflektancia-változás → kontinensek + óceánok
 - Hosszú távú stabil klíma
-

20. OBSIDIA – üveges felszín

- Sugár: $1,0 R_{\oplus}$
- Tömeg: $1,6 M_{\oplus}$
- Felszín: üveges
- Megfigyelés:
 - Speciális IR-reflexió
 - Amorf SiO_2 jelek

Elvárt következtetések:

- Gyors lehűlés → becsapódás vagy globális olvadás
- Amorf spektrum = nem kristályos szerkezet