

ÚJ KORSZAK A CSILLAGÁSZATBAN – A JAMES WEBB ŰRTÁVCSŐ ELSŐ NÉHÁNY HÓNAPJA

Pszota Gábor 

egyetemi docens, Miskolci Egyetem GÉIK, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Fizikai Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: fizpszo@uni-miskolc.hu

Absztrakt

Már a Hubble űrtávcső felbocsátásakor megvoltak a tervek egy továbbfejlesztett és még nagyobb teljesítményű űrtávcső megépítésére. Az elmúlt év decemberében végre megvalósultak ezek a tervek, és felbocsátották a Hubble utódjának szánt James Webb űrtávcsövet. Az új távcső nagyobb méretének és a közép-infravörösig terjedő érzékenységi tartományának köszönhetően számos előnnyel rendelkezik az elődjéhez képest, a műszaki paramétereit eleve úgy választották meg, hogy azok a lehető legjobban megfeleljenek a tudományos célkitűzéseknek. Ezek többek között a legkorábbi galaxisok és csillagok megfigyelését és elemzését, a csillagok és naprendszerek keletkezésének és fejlődésének tanulmányozását, valamint az exobolygók direkt megfigyelését, illetve légkörük elemzését, és ezzel az élet kialakulásának kutatását foglalják magukba. Ezeken kívül természetesen még számos területen bizonyul majd hasznosnak az új űrtávcső, legyen szó például a saját naprendszerünk objektumainak megfigyeléséről az infravörös tartományban. A fél éves beüzemelési procedúrát követően mindjárt meg is figyeltek néhány előre meghatározott célpontot, és az ezekről felvett adatokat július közepén megosztották a nagyközönséggel. Az eddigi eredmények minden várakozást felülmúlnak, számos galaxist észleltek az eddigiektől sokkal korábbról, megkérdőjelezve a galaxisok fejlődését leíró jelenlegi modellünket, sikeresen elemezték exobolygók légkörét, kimutatva különféle vegyületek jelenlétét, és nem utolsósorban, soha nem látott szépségű új felvételek jelentek meg néhány ismert űrbéli objektumról.

Kulcsszavak: csillagászat, kozmológia, exobolygó, James Webb űrtávcső

Abstract

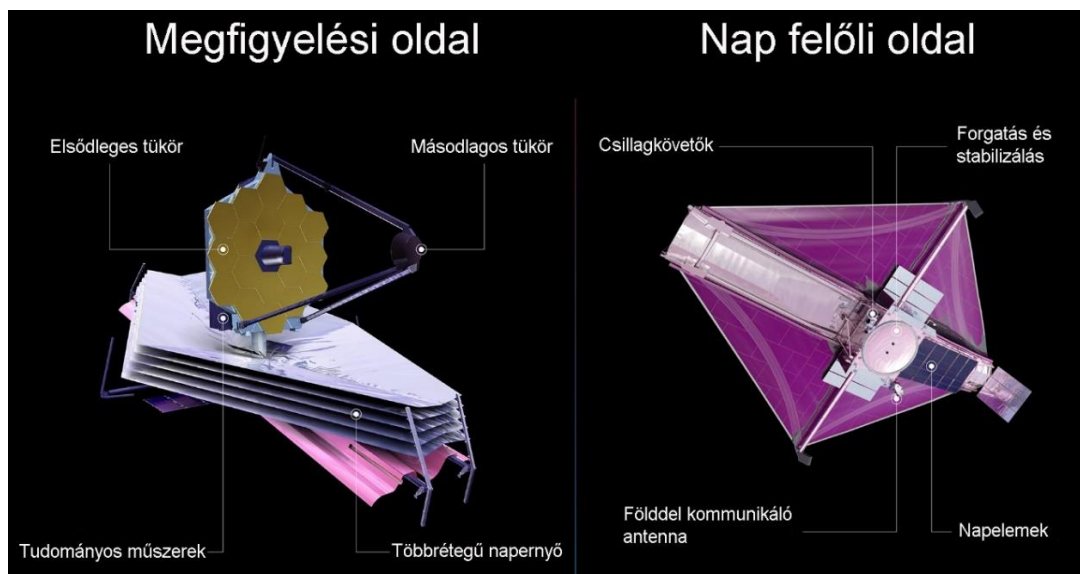
Already when the Hubble Space Telescope was launched, there were plans to build an improved and even more powerful space telescope. In December of last year, these plans finally came to fruition and the James Webb Space Telescope, which had been intended as the successor to Hubble, was launched. Due to its larger size and sensitivity range up to the mid-infrared, the new telescope has many advantages compared to its predecessor, and its technical parameters were chosen from the outset to best meet the scientific objectives. These include, among other things, the observation and analysis of the earliest galaxies and stars, the study of the formation and development of stars and solar systems, as well as the direct observation of exoplanets and the analysis of their atmospheres, thus research into the development of life. Naturally, in addition to these, the new space telescope will prove to be useful in many other areas, for example, we can mention the observation of objects in our own solar system in the infrared range. After the six-month commissioning procedure, some predefined targets were immediately observed, and the data collected on them were shared with the general public in mid-July. The results so far exceed all expectations, many galaxies have been detected from much earlier times than

before, questioning our current model describing the evolution of galaxies, the atmospheres of exoplanets have been successfully analyzed, showing the presence of various compounds, and last but not least, new images of previously unseen beauty have been published, showing some already known objects in space.

Keywords: astronomy, cosmology, exoplanet, James Webb Space Telescope

1. Bevezetés

A nagyjából 30 évet magába foglaló tervezési és megvalósítási fázist követően, majdnem tíz éves késséssel, 2021 december 25-én végre magasba emelkedett a James Webb űrtávcsövet (JWST) szállító hordozórakéta. A távcső ezután megkezdte útját az 1,5 millió kilométer távolságban lévő L2 Lagrange pont felé, és kezdetét vette a 6 hónapos beüzemelési procedúra. Annak érdekében, hogy a távcső által kisugárzott infravörös sugárzás ne zavarja az infravörös tartományban zajló méréseket, a távcső tükréit és műszereit 50K hőmérséklet (Pontoppidan et al., 2022) alá kell hűteni. Ennek megvalósításához a távcsövet egy többrétegű ernyővel védik a Nap sugaraitól (1. ábra). Az űrtávcső 4 fő tudományos műszerrel rendelkezik (Pontoppidan et al., 2022). A NIRCам a közeli infravörös tartományban működő kamera, amely 29 különböző szűrővel használható a 0,6-5 μ m tartományban (jwst-docs.stsci.edu), így különböző hullámhossz tartományokról készíthető felvétel. Ezáltal egy bizonyos mértékig spektrális információ is nyerhető az objektumról készült felvételekből.



1. ábra. A James Webb űrtávcső főbb összetevői. Eredeti angol nyelvű kép forrása: NASA, ESA, CSA, Joyce Kang (STScI)

Emellett a NIRCам eszköz 5 darab koronagráffal is rendelkezik, amelyek például egy központi csillag fényének kitarására szolgálnak, hogy a körülötte keringő bolygó láthatóvá váljon. Két koronagráf használható a rövid hullámhossz tartományban (0,6-2,3 μ m), három pedig a hosszabb hullámhossz tartományban (2,4-5 μ m). A rövid hullámhossz detektorai 0,031 ívmásodperces (2 μ m hullámhossznál), a hosszabb hullámhossz detektorai pedig 0,063 ívmásodperces felbontással (4 μ m hullámhossznál) rendelkeznek, a diffrakció miatti felbontási határ pedig 0,03 és 0,162 ívmásodperc között változik a 0,6-

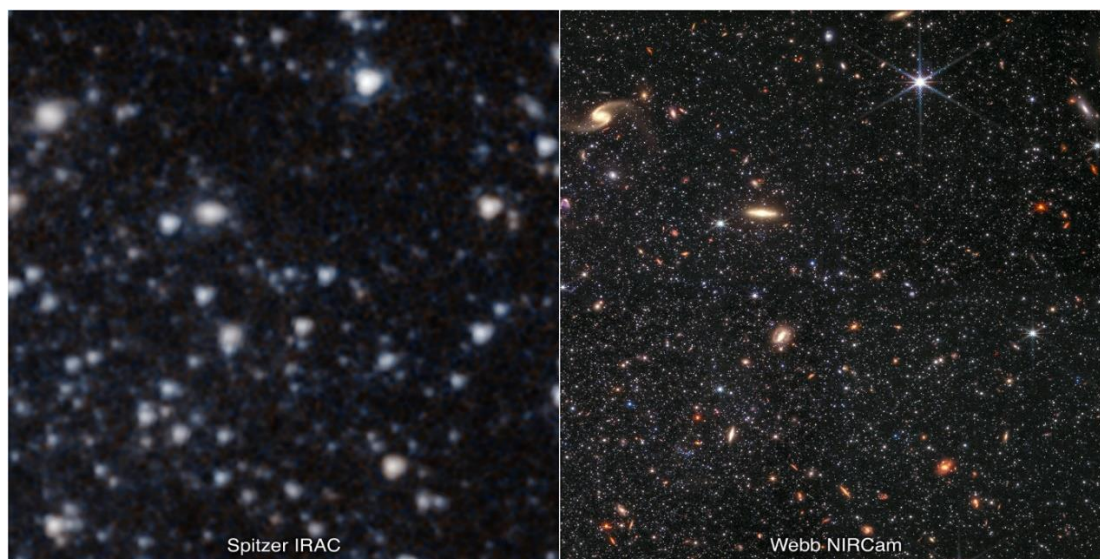
5 μ m hullámhossz tartományban. A NIRISS képalkotó eszköz szintén a közeli infravörös tartományban működik, és a nagy kontrasztos felvételek mellett rés nélküli spektroszkópiára is használható 3 darab rácsos prizma és 12 darab szűrő segítségével. Az egyetlen objektumos rés nélküli spektroszkópia üzemmódban $R = \lambda/\Delta\lambda = 700$ (1,4 μ m hullámhossznál) spektrális felbontással lehetséges a színeképek felvétele. Itt $\Delta\lambda$ az a legkisebb hullámhossz-különbség a λ hullámhossznál, amely még megkülönböztethető az eszközzel. Az egyetlen objektumos üzemmódban kizárólag egy fényes pontszerű forrásból érkező fény kerül elkülönítésre spektroszkópia céljából. A NIRSpec egy közeli infravörös tartományban működő spektroszkóp, amely 4 különböző üzemmódban használható $R = 100$, 1000, vagy 2700 spektrális felbontással. Ezek között van a több objektumos és az egyetlen objektumos spektroszkópia. A több objektumos spektroszkópia esetében a látómező különböző helyein lévő források fénye különíthető el apró rekeszek sokaságának segítségével, és ez a fény használható összesítve a spektroszkópiához. A MIRI a közép-infravörös (4,9-28,1 μ m) tartományban tesz lehetővé képalkotást és spektroszkópiát. A MIRI szintén fel van szerelve koronagráffal, hogy a meleg exobolygók saját sugárzása megfigyelhető legyen. Az eszköz nagyjából 0,1 ívmásodperces felbontásra képes, és 9 darab szűrővel választhatók ki különböző hullámhossz tartományok. Lehetőség van alacsony spektrális felbontású (kb. $R = 100$ az 1,4 μ m hullámhossznál) réses vagy rés nélküli spektroszkópiára, vagy közepes felbontású ($R = 1550$ -3250) spektroszkópiára. Az elsődleges tükör 6,5 méter átmérőjű, amely jelentős előrelépés a Hubble űrtávcső (HST) 2,4 méteres átmérőjéhez (hubblesite.org) vagy a Spitzer űrtávcső (SST) 0,85 méteres (spitzer.caltech.edu) átmérőjéhez képest. A Hubble érzékenységi tartománya 0,115-1,7 μ m, tehát az ultraibolya, látható és a közeli infravörös tartományokat fedi le. A JWST detektorai ennél jóval nagyobb hullámhosszt is tudnak detektálni, így képesek jobban átlátni a csillagok közötti por- és gázfelhőkön (2. ábra).



2. ábra. Részlet a Hubble űrtávcső (bal) és a James Webb űrtávcső (jobb) által a Teremtés oszlopairól készített képekből. A Hubble képe a látható tartományban, míg a James Webb képe a közeli infravörösben készült. Forrás: NASA, ESA, CSA, STScI, Hubble Heritage Project (STScI, AURA). Képek előállítás: Joseph DePasquale (STScI), Anton M. Koekemoer (STScI), Alyssa Pagan (STScI)

Az SST esetében a tükör jóval kisebb méretéből adódó kisebb érzékenység és felbontás jelenti a hátrányt a JWST-vel szemben. A Spitzer érzékenysége ugyanis a 3-180 μ m tartományra terjed ki, az optikai felbontása azonban csak 1,5 ívmásodperc 6,5 μ m hullámhossznál. Ez jól látszódik a 3. ábrán, amely egy törpegalaxis részletét mutatja az egyik, illetve másik űrtávcső által megörökítve.

A beüzemelési időszak alatt végzett tesztek alapján (Pontoppidan et al., 2022; Giardino et al., 2022; Labiano et al., 2021; Girard et al., 2022) kiderült, hogy az űrtávcső valamennyi műszere az előzetes elvárásoknak megfelelően, vagy attól lényegesen jobban működik.



3. ábra. A Wolf–Lundmark–Melotte törpegalaxis egy részletéről a közeli infravörös tartományban rögzített képek a Spitzer (bal) és a James Webb (jobb) űrtávcsövek által. Forrás: NASA, ESA, CSA, IPAC, Kristen McQuinn (RU). Képek előállítás: Zolt G. Levay (STScI), Alyssa Pagan (STScI)

A várakozásoknál pontosabb felbocsátás eredményeként kevesebb üzemanyagot kellett felhasználni a pályakorrekciókhoz, így az űrtávcső várható üzemideje jóval meghaladhatja a 20 évet. Így minden adott ahhoz, hogy a fő tudományos célkitűzést teljesíteni lehessen. Ez a galaxisok, csillagok és bolygórendszerek kialakulásának és fejlődésének jobb megértése. Az űrtávcső készenállását demonstrálva 2022. július 12-én a nagyközönség elé tárták az elsőként rögzített korai kiadású megfigyelések (Early Release Observations – ERO) adatait (Pontoppidan et al., 2022). A célpontok a következők voltak: Carina-csillagköd, SMACS J0723.3-7327 galaxis klaszter és annak gravitációs lencsehatása által eltorzított és felnagyított távolabbi galaxisok, Stephan-ötös galaxiscsoport, Déli gyűrű csillagköd, és a WASP-96 b exobolygó, amely a csillagja előtt időnként elhaladó forró, Jupiter-szerű gázóriás.

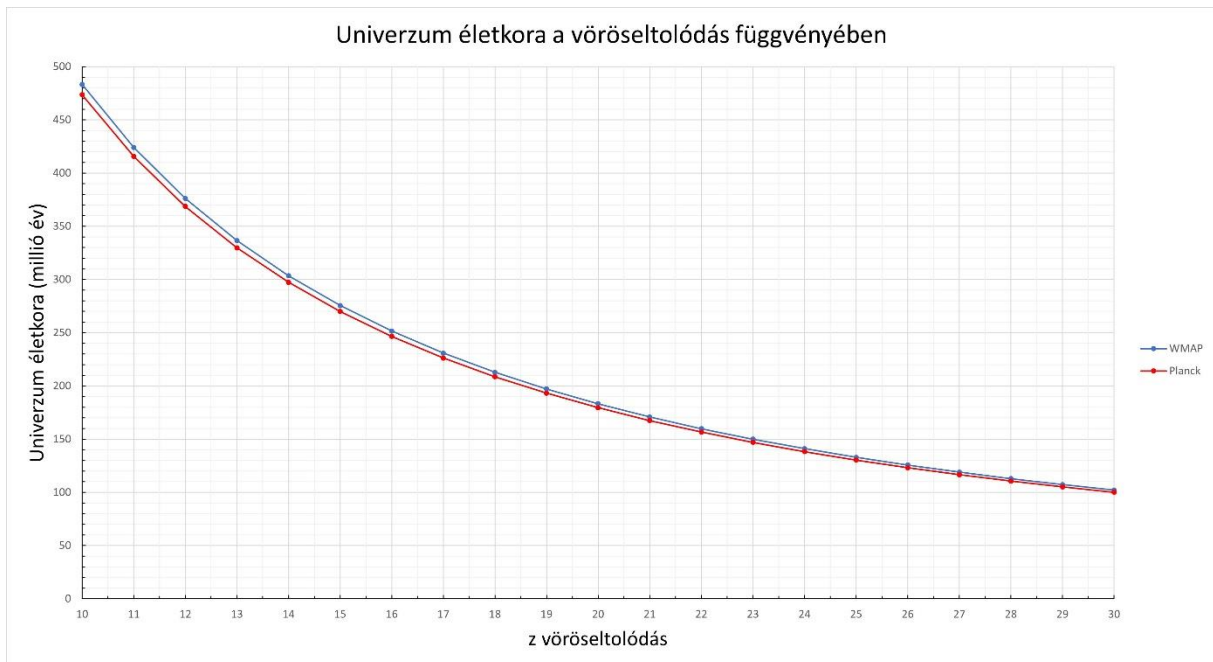
Ahhoz, hogy az űrtávcső képes legyen detektálni azokat a galaxisokat, amelyek az univerzum első néhány százmillió évében léteztek, elengedhetetlen a minél nagyobb érzékenység, tehát a minél nagyobb méretű tükör, valamint a közép-infravörösbe nyúló működési tartomány. Az univerzum tágulása miatt ugyanis a korai csillagok ultraibolya és látható tartományban kisugárzott fénye eltolódott a nagyobb hullámhosszok felé. Ez a vöröseltolódás jelensége:

$$z = \frac{\lambda_{\text{megfigyelt}}}{\lambda_{\text{kisugárzott}}} - 1. \quad (1)$$

Az univerzum első 1 milliárd évén belül, tehát relatíve nagy z értékekre, amikor a sugárzás fölött már, a sötét energia fölött pedig még az anyag dominált, a vöröseltolódás és az univerzum életkora között a következő összefüggés érvényes (Bergström and Goobar, 2006):

$$t(z) \approx \frac{2}{3H_0\Omega_m^{1/2}(1+z)^{3/2}}, \quad (2)$$

ahol H_0 az univerzum jelenlegi tágulási ütemét megadó Hubble állandó, Ω_m pedig az anyag és sötét anyag sűrűsége az univerzum kritikus sűrűségéhez viszonyítva ($\Omega_m = \rho_m/\rho_{krit}$). Ez a kritikus sűrűség az a határérték, amely esetén a kezdeti tágulás idővel megáll, és zsugorodásba vált át. Ezek a paraméterek a kozmikus háttérsugárzás elemzése alapján a WMAP műhold eredményei (Bennett et al., 2013) szerint $H_0 = 70 \frac{km/s}{Mpc}$, $\Omega_m = 0,279$, a Planck műhold 2018-as eredményei (Aghanim et al., 2020) szerint pedig $H_0 = 67,7 \frac{km/s}{Mpc}$, $\Omega_m = 0,3106$ értékeket vesznek fel. Az ezek segítségével számított életkorok a 4. ábrán láthatók a vöröseltolódás függvényében.



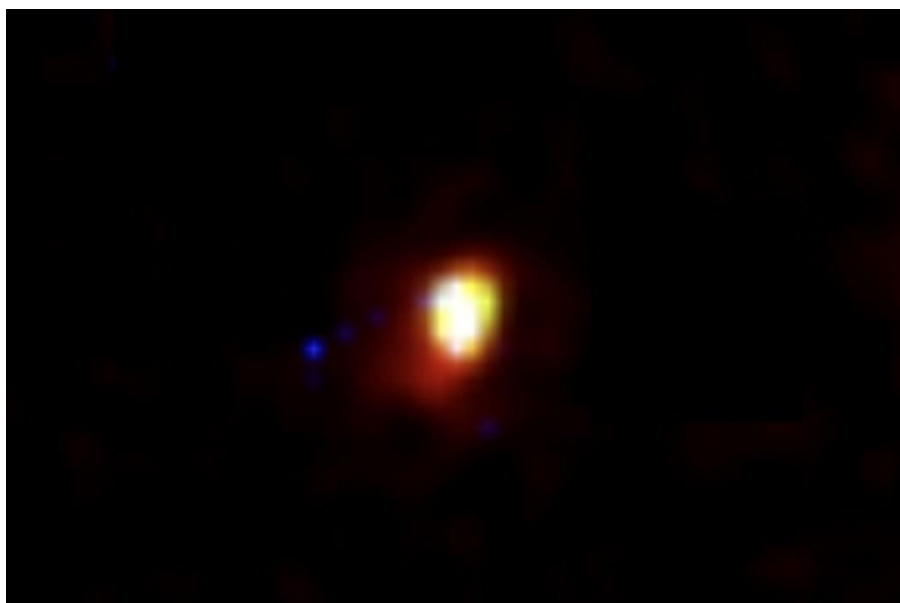
4. ábra. Az univerzum életkora az észlelt galaxisok vöröseltolódásának függvényében. A kék görbe a WMAP műhold eredményei, a piros görbe pedig a Planck műhold eredményei alapján lett számolva.

Amint az megfigyelhető, nagyjából 10 millió év különbség van a két görbe között $z = 10$ értéknél, azaz 500 millió év környékén, nagyobb z értékeknél ez mindössze néhány millió évre csökken.

2. Korai galaxisok és csillagok

A JWST üzembe helyezése előtt felfedezett legkorábbi galaxis a Hubble űrtávcsőhöz köthető (Oesch et al., 2016). A galaxisra $z = 11,1$ vöröseltolódást mértek, ami azt jelenti, hogy nagyjából 400 millió évvel az ősrobbanás után létezett. Ez az időszak különösen érdekes az univerzum fejlődése szempontjából,

ugyanis a kozmikus hajnal kezdetén, vagyis az első csillagok és galaxisok megjelenésekor, amelyet kb. 50 millió évvel az ősrobbanás utánra tesznek, az általuk kibocsátott fotonok újra ionizálták az univerzumot kitöltő semleges anyagot, többnyire hidrogént. Ez azt is jelentette, hogy véget ért az addig tartó sötét korszak. A galaxisra mért rendkívül nagy UV-fényesség és tömeg arra engedett következtetni, hogy ebben az időszakban már javában zajlott a galaxisok kialakulása és fejlődése. Ennél tehát jóval messzebbre, vagyis korábbra kell visszaneézni, hogy az első csillagokat és galaxisokat megfigyelhessük, de a James Webb űrtávcsövet pontosan erre tervezték. A JWST korai kiadású tudományos programjai (GLASS, CEERS) keretében végzett mélyűri megfigyelések (egy látszólag üres látómező megfigyelése hosszú expozíciós idővel, amelynek köszönhetően nagyon távoli és nagyon halvány objektumok jelennek meg a felvételen), és a SMACS J0723.3-7327 galaxis klaszteréről kiadott adatok elemzésével Donnan és szerzőtársai 45 galaxisjelöltet azonosítottak $z = 8,5$ vöröseltolódás fölött (Donnan et al., 2022). Ezek közül 6 galaxisnak a vöröseltolódására $z \geq 12$ érték adódott az adatok illesztése alapján. A legkorábbi galaxis vöröseltolódására pedig $z = 16,4$ értéket kaptak, ami azt jelenti, hogy ez a galaxis nagyjából 250 millió évvel az ősrobbanás után már létezett (5. ábra). Castellano és szerzőtársai (Castellano et al., 2022) szintén a JWST-GLASS korai kiadású tudományos program adatainak elemzésével azonosítottak $9 \leq z \leq 15$ vöröseltolódással rendelkező galaxisokat. A szerzők kiemelik, hogy a két fényes galaxis észlelése $z \approx 10,6$ és $z \approx 12,2$ értékkel váratlan fejlemény az átvizsgált terület mérete alapján.



5. ábra. Hamis színes kép a NIRCam által detektált korai galaxisról. Forrás: Donnan és társai (Donnan et al., 2022)

Szintén egy meglepően fényes és nagy tömegű korai galaxisról számoltak be Naidu és szerzőtársai $z \approx 17$ értékkel, amely mindössze 230 millió éves életkort jelent az univerzumra nézve (Naidu et al., 2022). Itt viszont az adatok illesztése alapján nem lehetett teljesen kizárni a $z \approx 5$ értéket sem, ha a galaxis nagy mennyiségű ionizált gázt vagy poros csillagképződési régiókat tartalmaz. Harikane és szerzőtársai 25 galaxist találtak a $9 \leq z \leq 17$ tartományban a korai kiadású tudományos (ERS) programok és a korai kiadású megfigyelések (ERO) adatait elemezve (Harikane et al., 2022). Ezekből 6 fényes és nagy tömegű galaxist a $12 \leq z \leq 17$ tartományban azonosítottak, és két jelölt esetében $z \approx 16,45$ és $z \approx 16,66$

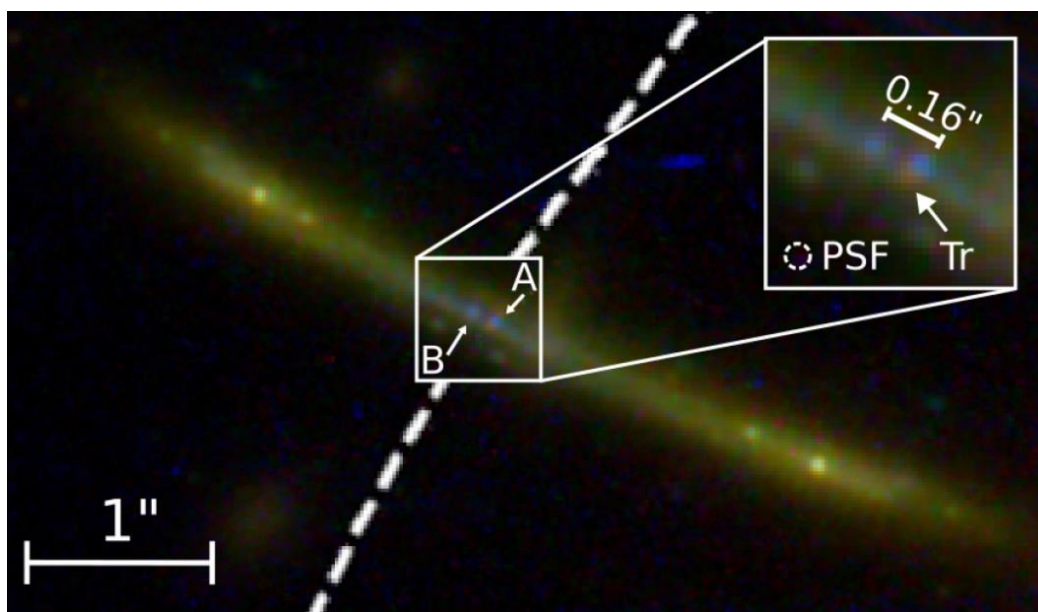
értékeket mértek. A legnagyobb z értékkel rendelkező galaxis jelöltről Yan és szerzőtársai számoltak be a SMACS J0723.3-7327 galaxis klaszteréről felvett korai kiadású adatok elemzése alapján (Yan et al., 2022). A látómezőnek a klasztertől távol eső területeit elemezték, ahol a gravitációs lencsehatás nem befolyásolta az adatokat. Összesen 88 galaxis jelöltet azonosítottak $z \approx 11$ fölött, a legnagyobb vöröseltolódásra pedig $z \approx 20$ értéket kaptak. Ez azt jelentené, hogy az univerzum ekkor még csak 180 millió éves volt. A korai univerzumban eddig felfedezett rendkívül fényes és nagy tömeggel rendelkező galaxisok már most megkérdőjelezik a jelenleg érvényesnek gondolt Λ CDM (lambda hideg sötét anyag) modellt és/vagy a galaxisok fejlődését leíró modelleket. A szimulációk futtatásával kapott galaxisok ugyanis egy nagyságrenddel kisebb csillagtömeget tartalmaznak, mint a megfigyelések alapján számított csillagtömegek (Haslbauer et al., 2022). Ezek szerint a csillagok képződése és a struktúrák kialakulása jóval intenzívebben és hamarabb zajlott, mint ahogyan azt eddig képzelték. A kérdés megválaszolásához további mélyűri megfigyelésekre és pontosabb spektroszkópiai eredményekre lesz szükség. A korai galaxisok észlelésében és elemzésében segítséget nyújthatnak az előtérben elhelyezkedő nagy tömegű galaxis klaszterek, amelyek erős gravitációs hatásukkal lencseként viselkednek a mögöttük elhelyezkedő galaxisokra nézve. Atek és szerzőtársai (Atek et al., 2022) a SMACS J0723.3-7327 galaxis klaszter adatainak elemzése során kihasználták ki a klaszter gravitációs lencsehatását, kimondottan a klaszter közelében kutattak felnagyított és felerősített fényű galaxisok után. Két jelöltet sikerült azonosítaniuk $z \approx 16$ értékkel, és számos galaxist $z \approx 10$ fölött. A SMACS J0723.3-7327 galaxis klaszter az első olyan erős gravitációs lencse, amelyet a JWST megfigyelt.



6. ábra. JWST-NIRCam felvétel a MACS0647-JD nevű, háromszorosan megjelenő galaxisról. A képen látható, hogy valójában nem egy galaxisról van szó, hanem éppen összeolvadó galaxisokról.

Forrás: Hsiao és szerzőtársai (Hsiao et al., 2022)

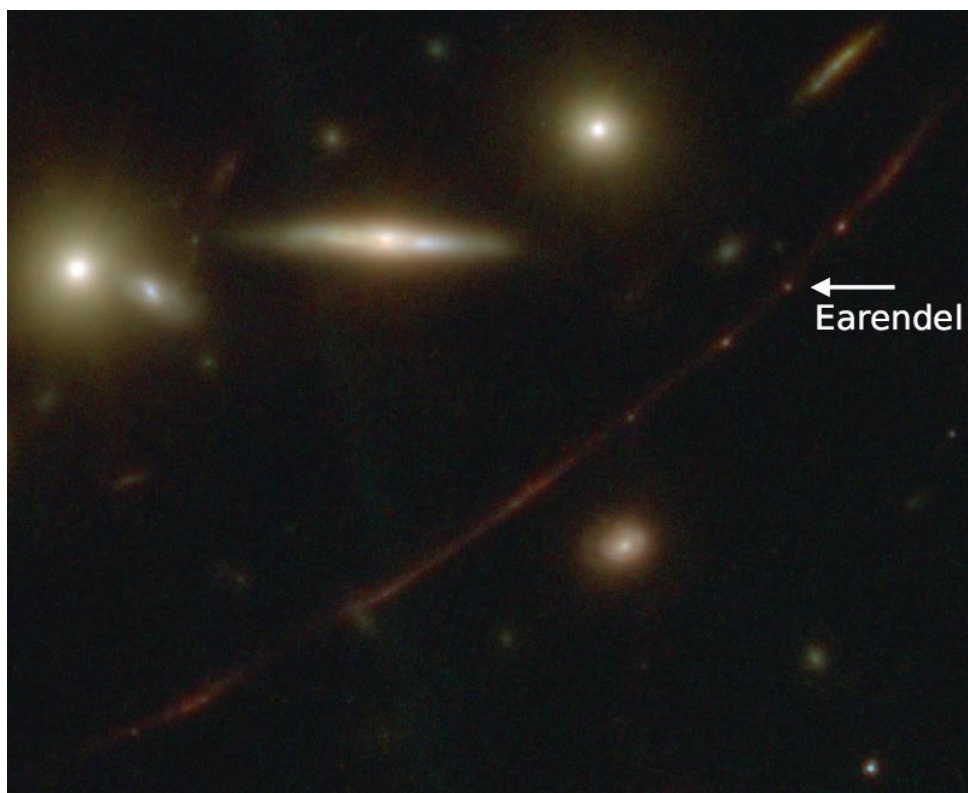
A lencséről készített modell, amely a torzított és meg többszörözött háttérbeli galaxisok elemzése alapján igyekszik a sötét anyag eloszlását meghatározni, az egyik galaxisra $|\mu| = 9,5$ nagyítás értéket adott (Caminha et al., 2022). Mivel szerencsés elhelyezkedés esetében az ilyen klaszterek által okozott nagyítás akár 100-1000 is lehet, ez lehetőséget teremt a korai galaxisok belső szerkezetének vizsgálatára. Ezt a lencsehatást használták ki Bradley és szerzőtársai (Bradley et al., 2022) is, amikor a WHL0137-08 galaxis klaszter adatait elemezve egy $z \approx 9$ vöröseltolódással rendelkező galaxist $|\mu| \approx 8$ nagyítással figyeltek meg. Ennek következtében a galaxison belül 30 parszek méretű struktúrákat sikerült azonosítaniuk, amelyekben intenzív csillagképződés folyik. Hsiao és szerzőtársai (Hsiao et al., 2022) a Hubble által felfedezett, MACS0647-JD nevű galaxisról felvett JWST adatokat elemezték. Ez a galaxis a gravitációs lencsehatás miatt három különböző helyen jelenik meg a képen (6. ábra). Kiderült, hogy valójában két összeolvadó galaxisról van szó. A SMACS J0723.3-7327 klaszterről készített mélyűri JWST felvétel elemzésével Pascale és szerzőtársai 14 darab többszörösen megjelenő galaxist azonosítottak (Pascale et al., 2022). A klaszter gravitációja által meghatározott kritikus vonal közelében a háttérbeli galaxisok képe fényes ívekké torzul. Egy ilyen galaxis esetében a kritikus vonal éppen a benne lévő két fényes csomó között halad el, így azok $|\mu| \approx 750$ nagyítással jelennek meg a képen (7. ábra). Igazán szerencsés elhelyezkedés esetén még az is elképzelhető, hogy különálló csillagok figyelhetők meg. Egy ilyen csillag a $z \approx 6,2$ értékkel rendelkező WHL0137-LS, amely az Earendel becenevet kapta. Az eredetileg a Hubble által felfedezett csillag a JWST által készített képen is kimutatható.



7. ábra. A háttérbeli galaxis két fényes csomója között elhaladó kritikus vonalnak köszönhetően az erős gravitációs lencsehatás ezekre $|\mu| \approx 750$ nagyítást okoz. Forrás: Pascale és szerzőtársai (Pascale et al., 2022)

Welch és szerzőtársai (Welch et al., 2022) elemzése alapján a pontszerű forrásként megjelenő csillagra a nagyítás alsó határa 4000, az objektum mérete pedig 0,02 pc, vagyis 4000 CSE értékénél kisebb (8. ábra). A különböző szűrőkkel előállított alacsony felbontású spektrum alapján egyelőre fennáll a lehetősége annak is, hogy a sugárzást két különböző hőmérsékletű csillag bocsátja ki, ha például egy kettősrendszerrel van szó. Ezt a kérdést a későbbi részletes spektrométeres vizsgálat alapján lehet majd

eldönteni. Ez az eredmény természetesen felveti annak a lehetőségét, hogy az ehhez hasonló extrém gravitációs lencsehatást kihasználva esetleg a fémektől mentes kezdeti univerzumban elsőként kialakuló csillagok közül is megfigyelhető néhány a JWST segítségével (Bovill et al., 2022). Ezek a kezdeti csillagok a III-as populációba tartoznak, és a napjainkban megfigyelhető csillagoktól jóval nagyobb tömeggel és sokkal rövidebb élettartammal rendelkeztek. A jelenleg használt Λ CDM modell alapján a legkorábban kialakult ilyen csillagok $z > 30$ vöröseltolódással rendelkeznek, tehát valamikor az univerzum első 100 millió évében keletkeztek. Pontosán azonban még nem ismert, hogy az első csillagok mikor ragyogtak fel, mekkora tömeggel rendelkeztek, és mikor váltották fel őket a nehezebb elemekben gazdagabb II-es populációba tartozó csillagok, amelyek az eddig észlelt korai galaxisokban figyelhetők meg. Amennyiben az ilyen csillagokból álló klaszterek észlelhetővé válnak, akkor a fényességük alapján megbecsülhető majd a tömegeloszlásuk.



8. ábra. Az erős gravitációs lencsehatásnak köszönhetően $|\mu| > 4000$ nagyítással megjelenő különálló csillag $z \approx 6,2$ vöröseltolódással. Ekkor az univerzum 900 millió évnél is fiatalabb volt.

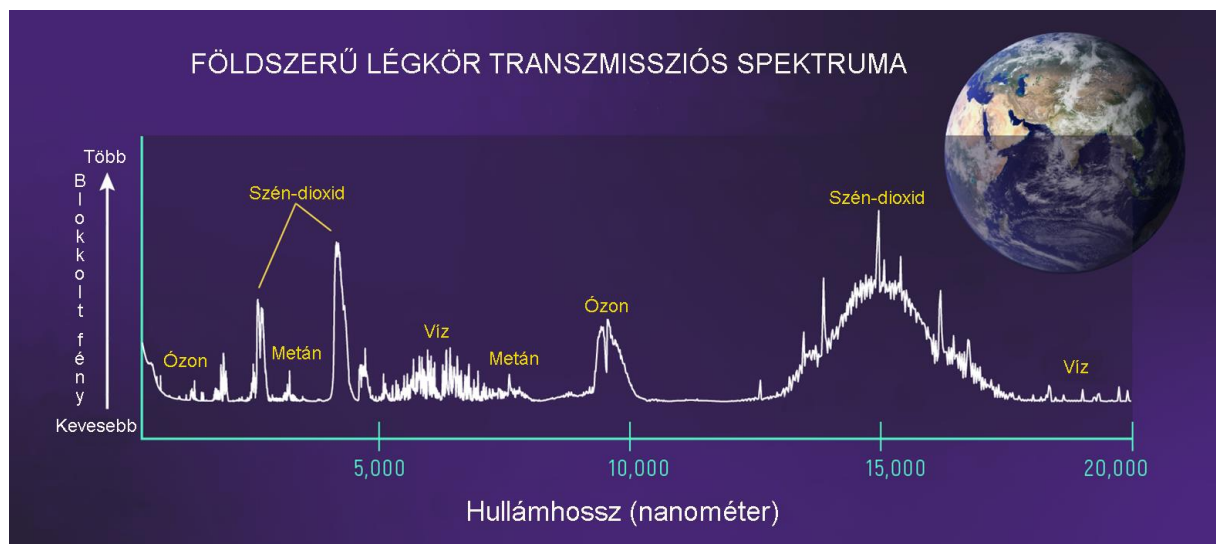
Forrás: Welch és szerzőtársai (Welch et al., 2022)

Minél kisebb tömeggel rendelkezik egy csillag, annál lassabban használja el a rendelkezésére álló hidrogént, tehát annál hosszabb az élettartama. Egyes modellek szerint a III-as populációba tartozó csillagok kezdeti tömege akár a Nap tömegének ezerszerese is lehetett, de vannak olyan modellek is, amelyek a Nap tömegéhez hasonló tömeget is megengednek. Ebben az esetben akár később is megfigyelhetők lehetnek az ilyen csillagokból álló klaszterek a JWST segítségével, főleg akkor, ha egy előtérben elhelyezkedő nagy tömegű galaxis klaszter gravitációs lencsehatását is sikerül kihasználni. A másik lehetőség az ilyen csillagok szupernóva robbanásainak megfigyelése (Whalen et al., 2013), amelyre a

JWST képes lehet (Hartwig et al., 2018). Ezek az ősi pár-instabilitás szupernóvák (PISN) az I-es és a II-es típusú szupernóvák fényességét akár százszorosán is meghaladhatják. Az ilyen robbanásra akkor kerülhet sor, ha a 130-260 M_{\odot} kezdeti tömeggel rendelkező csillag magja annyira forróvá válik, hogy abban elektron-pozitron párok keletkeznek, amit a mag összeroskadása és robbanásszerű oxigén fúzió követ, teljesen megsemmisítve a csillagot. A valamivel kisebb kezdeti tömegű (95-130 M_{\odot}) csillagok számos nem végzetes pár-instabilitási perióduson mehetnek keresztül, melyek során újra és újra tömeget veszítenek a végső összeroskadás előtt. Az egymást követő pulzációk során kidobott anyaghéjak ütközése miatt a csillag többször felfénylik, és a végső összeroskadáskor kilökött anyag szintén kölcsönhatásba lép ezekkel a héjakkal. Az ilyen pulzációs pár-instabilitás szupernóvák (PPISN) emiatt hosszú ideig nagyon fényesen ragyoghatnak. Számos olyan szupernóvát detektáltak már, amelyeket szokatlan fotometriai vagy spektrális tulajdonságuk miatt ez utóbbi típusba soroltak (Gomez et al., 2019).

3. Exobolygók vizsgálata

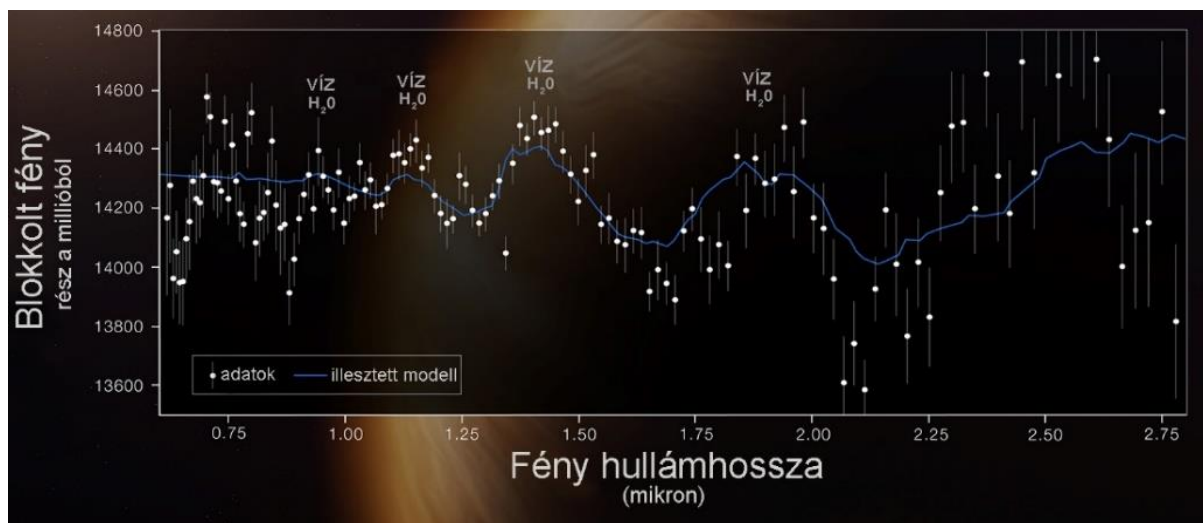
Az exobolygók vizsgálatára több lehetőség is van: transzmissziós spektrumok felvétele, amikor a bolygó elhalad a csillag előtt, visszavert vagy kisugárzott fény spektrumának felvétele másodlagos fogyatkozás során, amikor a bolygó eltűnik a csillag mögött, vagy a közvetlen megfigyelés. Amikor a bolygó pályájuk párhuzamos a látósíkunkkal, és a bolygó időnként elhalad a csillagja előtt, akkor olyan esetekben is lehetőség van a bolygó észlelésére és tulajdonságainak meghatározására, ha a rendszer nagy távolsága, a bolygónak a csillaghoz való közelsége és a csillag rendkívül nagy fényessége miatt a közvetlen megfigyelésre jelenleg még nincs lehetőség. Ilyenkor még kimondottan kedvező is, ha a bolygó viszonylag közel kering a csillaghoz, mert akkor annál gyakrabban figyelhető meg az átvonulás (tranzit) jelensége. Minden ilyen alkalommal a csillag fényében egy periodikusan ismétlődő apró halványodás figyelhető meg, amelynek mértéke a bolygó méretére enged következtetni.



9. ábra: Egy földszerű bolygó légkörének transzmissziós modell spektruma (Kaltenegger and Lin, 2021) a különböző vegyületekre jellemző abszorpciós csúcsokkal a JWST által vizsgálható hullámhossz tartományban.

Eredeti angol nyelvű ábra forrása: NASA, ESA, Leah Hustak (STScI)

Megfelelően érzékeny spektrométerrel pedig a bolygó légkörének transzmissziós spektruma is vizsgálható (9. ábra), hiszen a légkörben lévő vegyületek (pl. szén-hidrogének, víz, szén-dioxid) a rájuk jellemző hullámhossz értékeknél elnyelik a csillag fényét. Ezeknél a hullámhosszoknál az elhalványulás mértéke, vagyis a blokkolt fény mennyisége nagyobb lesz. A szimulációk alapján a JWST műszerei képesek lesznek detektálni a főbb szénhidrogén vegyületeket akár földszerű exobolygók légkörében is (Gasman et al, 2022), amennyiben azok elegendően nagy koncentrációban vannak jelen, és a törpecsillagok körül keringő földszerű bolygóknál (pl. TRAPPIST-1) a sztratoszférában elhelyezkedő felhőréteg sem fogja kimutatható mértékben befolyásolni az eredményeket (Doshi et al., 2022). A korai kiadású megfigyelések egyik célpontját jelentő WASP-96 b exobolygó adatait elemezve, mindjárt sikerült is víz jelenlétét kimutatni annak légkörében (nasa.gov). Amint az a 10. ábrán látható, több olyan csúcs is jelen van a transzmissziós spektrumban, amelyek a víz abszorpciójához köthetők.

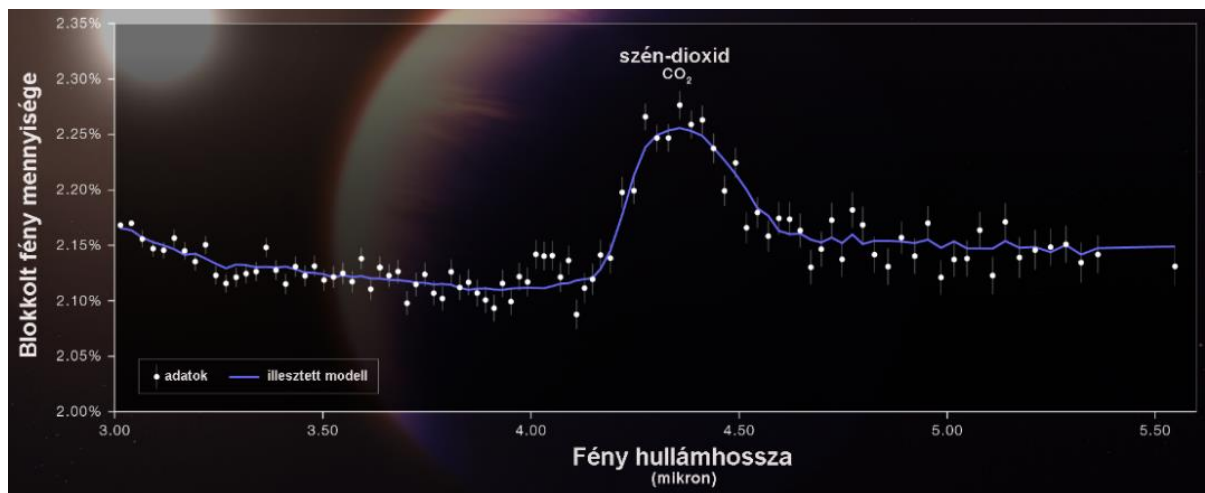


10. ábra. A NIRISS műszer által felvett transzmissziós spektrum a WASP-96 b exobolygó légköréről. A kiemelt hullámhossz tartomány több olyan csúcsot is tartalmaz, amely víz jelenlétére utal.
Eredeti angol diagram forrása: NASA, ESA, CSA, és STScI

Ez a bolygó egy forró gázóriás, amely egy 1150 fényév távolságban lévő, a Naphoz hasonló csillag körül kering. Bár a bolygó átmérője 1,2-szerese a Jupiter átmérőjének, tömege mindössze fele akkora. A gázóriás azért ennyire puffadt, mert nagyon közel kering a központi csillaghoz, mindössze 3,5 nap keringési idővel. Ennek következtében a hőmérséklete 500 °C felett van. A nagy mérete, puffadt légköre és rövid keringési ideje ideális célponttá tette ezt a bolygót a JWST teljesítményének demonstrálásához. Az adatokat ugyanis egyetlen átvonulás ideje alatt sikerült rögzíteni, nagyjából 6,4 óra alatt.

A korai kiadású tudományos program keretében egy másik forró gázóriás megfigyelésére is sor került 2022. július 10-én. A WASP-39 b exobolygó légkörének transzmissziós spektrumában (11. ábra) a szén-dioxid egyértelmű jelét sikerült azonosítani (Hall, 2022) egyetlen, kicsivel több mint 8 óráig tartó átvonulás megfigyelésével. A WASP-39 b exobolygó egy Naphoz hasonló csillag körül kering 700 fényévre a Földtől. A csillagját 4 nap alatt kerüli meg, mindössze egyhuszad csillagászati egység (Nap és Föld átlagos távolsága, vagyis kb. 149,6 millió kilométer) távolságban. A szén-dioxid megfigyelése egy bolygó légkörében fontos lépés afelé, hogy az élet jeleire találjunk a Földön kívül. A tudósok szerint ugyanis a szén-dioxid és metán együttes kimutatása az élet jelenlétére utalhat.

Az exobolygók közvetlen megfigyelése roppant nehéz feladat. Egyszerre van szükség rendkívül nagy érzékenységre, szögfelbontásra és a központi csillag pontos kitakarására, hiszen a csillag akár többmilliárdszor fényesebb lehet, mint a közvetlenül mellette elhelyezkedő bolygó. Ez utóbbi probléma koronagráf segítségével küszöbölhető ki. Ha azt vesszük, hogy 1 parszek (3,26 fényév) az a távolság, ahonnan a Föld és a Nap átlagos távolsága 1 ívmásodperc szögben látszódik, és hogy a legközelebbi csillag kb. 1,3 parszek távolságban van tőlünk, mindjárt láthatjuk, hogy még a szomszédos csillagok exobolygóinak megfigyeléséhez is tized ívmásodperces szögfelbontásra van szükség.

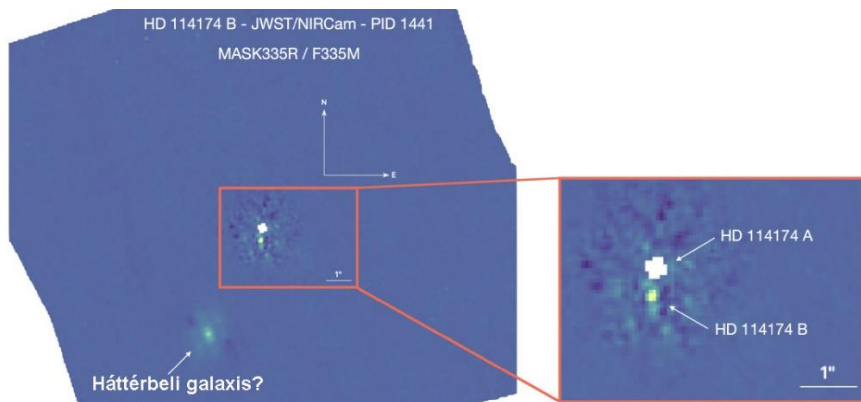


11. ábra. A NIRISS műszer által felvett transzmissziós spektrum a WASP-39 b exobolygó légköréről. A jól megfigyelhető csúcs szén-dioxid jelenlétére utal.

Eredeti angol diagram forrása: NASA, ESA, CSA, Leah Hustak (STScI), Joseph Olmsted (STScI)

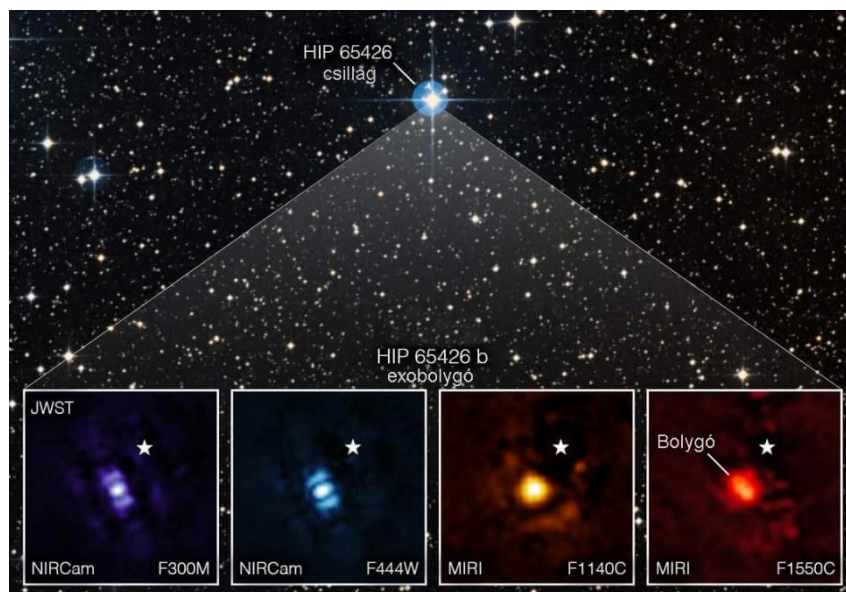
Ráadásul a csillag fényét is ilyen nagy pontossággal kell tudni kitakarni. A JWST tervezésekor pontosan ezeket a kívánalmakat tartották szem előtt, a közeli- és közép-infravörös tartományban végzett megfigyelések pedig további előnyt jelentenek, hiszen így a bolygó saját hőmérsékleti sugárzásának csúcsa is detektálható, nem csak a csillag bolygóról visszavert fénye. A beüzemelés időszakában végrehajtott tesztek része volt a HD 114174 jelű csillag megfigyelése (Girard et al., 2022). Ennek a csillagnak kb. 0,5 ívmásodperc távolságban van egy fehér törpe társa, amely tízezerszer halványabb a fő csillagtól. Amint az a 12. ábrán látható, a NIRCам probléma nélkül meg tudta jeleníteni a B-vel jelzett fehér törpét.

Ennél persze jóval nehezebb feladat az exobolygók közvetlen megjelenítése. A beüzemelés alatt a koronagráfok részletes vizsgálatát Kammerer és szerzőtársai (Kammerer et al., 2022) végezték el. Az eredmények azt mutatták, hogy a 3-5 μ m tartományban a NIRISS esetében már 0,07 ívmásodperc távolságban is 7-8 magnitúdó kontraszt érhető el. Minden magnitúdó különbség kb. 2,512-es arányt jelent az intenzitásokra nézve, így ez az érték kb. 1500-nak felel meg. A NIRCам eszköznél a kontraszt 0,5 ívmásodperc távolságnál 13 magnitúdót (kb. 160 ezerszeres intenzitás csökkentés), 2 ívmásodpercnél pedig 15 magnitúdót (kb. 1 milliószoros intenzitás csökkentés) ért el. A MIRI koronagráfjai szintén a várakozásoknak megfelelően teljesítettek, a vizsgálatok alapján néhányszor tízezerszeres kontraszt érhető el már 1 ívmásodperces távolságon belül (Boccaletti et al., 2022). A NIRCам és a MIRI teljesítményét demonstrálják azok a képek, amelyeket Carter és szerzőtársai készítettek a HIP 65426 b jelű exobolygóról a 2-16 μ m hullámhossz tartományban (Carter et al., 2022).



12. ábra. A NIRCam koronagráfjának működését demonstráló felvétel a beüzemelés időszakában. Az A-val jelzett csillag B-vel jelzett fehér törpe társa 10 ezerszer halványabb 0,5 ívmásodperc távolságban. Forrás: Girard és munkatársai (Girard et al., 2022)

A korai kiadású tudományos program keretében megfigyelt szuper-Jupiter 0,82 ívmásodperc távolságra kering a csillagjától, ami 110 csillagászati egységet jelent a 120,5 parszek (385 fényév) távolságban lévő rendszer esetében. A bolygó tisztán látható volt mind a 7 szűrővel készített felvételen, ezekből 4 darab (3, 4,44, 11,4 és 15,5 μm) látható a 13. ábrán.



13. ábra. A HIP 65426 b exobolygó közvetlen megfigyelése négy különböző szűrővel (Carter et al., 2022).

Eredeti angol nyelvű kép forrása: NASA, ESA, CSA, Alyssa Pagan (STScI)

Szintén a korai kiadású tudományos program keretében került sor a VHS 1256 b jelű exobolygó közvetlen megfigyelésére a NIRSpc és MIRI műszerekkel a 0,97 - 28,1 μm hullámhossz tartományban. A bolygó egy kb. 20 Jupiter tömegű barna törpe, amely 8 ívmásodperc távolságban kering a központi csillag körül. A spektrum elemzéséből Miles és szerzőtársai (Miles et al., 2022) arra következtettek,

hogy a bolygó légkörében víz, metán, szén-monoxid, szén-dioxid, nátrium és kálium van jelen. Emellett még szilikát felhők detektálásáról is beszámoltak, amelyre korábban nem volt példa.

Amint az látható ezekből a példákból, a bolygók áthaladását elemző módszerrel ellentétben, a közvetlen megfigyelésnél éppen az a jó, ha a bolygó messze van a csillagjától és minél nagyobb. Emellett a vizsgált rendszernek közelebb kell lennie hozzánk, mint a tranzit megfigyelésénél. Ami viszont előny, hogy a pályasíknak nem kell a látósíkkal párhuzamosnak lennie, hiszen a bolygónak nem kell elhaladnia a csillag előtt.

4. Várakozások a következő hónapokra

Az eddigi kalibrációs és tudományos adatok alapján már látható, hogy a James Webb űrtávcső műszerei az előzetes elvárásoknak megfelelően, vagy azoknál is jobban működnek. A korai kiadású megfigyelések és tudományos programok adatainak elemzéséből kapott eredmények pedig azt is előrejelzik, hogy az űrtávcső számos új felfedezéssel fogja előbbre vinni az univerzum tanulmányozását. Az elkövetkező hónapok tervezett megfigyeléseit a Jóváhagyott Programok weboldalon (stsci.edu/.../approved-programs) lehet megtekinteni. Az 1-es ciklus elfogadott célpontjai többek között a következő kategóriákból kerültek ki: exobolygók és protoplanetáris korongok, galaxisok, galaxisközi anyag, nagyléptékű struktúrák az univerzumban, naprendszerünk objektumai, csillagok fejlődése és típusai, csillagpopulációk és csillagközi anyag, szupernagy tömegű fekete lyukak és aktív galaxismagok, barna törpék, galaxis klaszterek, mélyűri megfigyelések, exobolygók, és nagy vöröseltolódással rendelkező kvazárok. Ki kell emelni a korai kiadású adatok alapján azonosított, ultranagy vöröseltolódással ($z > 12$) rendelkező galaxis jelöltek tervezett újbóli megfigyelését, és azok vöröseltolódásainak megerősítését a róluk felvett nagy felbontású spektrumok alapján. Ezek a célpontok különleges fontosságuk miatt magas prioritást élveznek. A 2022. november 28-án véget érő 1-es ciklus megfigyelt objektumainak listája a JWST Heti Megfigyelési Ütemtervek weboldalon tekinthető meg heti bontásban (stsci.edu/.../observing-schedules).

A JWST első évében 76 exobolygót fog megfigyelni (Hall, 2022). Ezek közül 27 bolygó (Greene et al., 2019) időnként elhalad a központi csillagja előtt, így ezek légkörét a tranzitok és/vagy másodlagos fogyatkozások során lehet majd vizsgálni. Mostanáig 9 olyan bolygót fedeztek fel a tranzit módszerrel, amelyek nagyjából a Földdel megegyező méretűek (Morley et al., 2017) és kis tömegű M-törpe csillagok körül keringenek hozzánk viszonylag közel. A Naphoz hasonló méretű csillagok közelében csak Neptunusz méretű bolygók lennének tanulmányozhatók a JWST űrtávcsővel, a sokkal kisebb és halványabb M-törpék esetében viszont Föld méretű bolygók vizsgálata is lehetséges. Az ilyen csillagoknál a lakhatási zóna sokkal közelebb van, mint a Nap esetében, így a potenciálisan lakható bolygók közelebb helyezkednek el a csillaghoz, rövidebb a keringési idejük, ezáltal sűrűbben figyelhető meg a tranzit jelensége. A kilencből 7 bolygó a TRAPPIST-1 rendszerben található, a maradék kettő pedig a GJ 1132b és az LHS 1140b. A TRAPPIST-1b, vagyis a csillaghoz legközelebbi bolygó, és a GJ 1132b kiváló célpont az emissziós spektroszkópiához, de a TRAPPIST-1c légköre is elemezhető lehet ezzel a módszerrel 5-15 másodlagos fogyatkozást megfigyelve. A légköri modellek alapján a TRAPPIST-1d és TRAPPIST-1e bolygók esetében lehetséges folyékony víz a bolygó felszínén, és a lakhatóság szempontjából a TRAPPIST-1e a legkedvezőbb (Morley et al., 2017), (Lin and Kaltenegger, 2022). A TRAPPIST-1d és TRAPPIST-1e bolygók esetében a transzmissziós spektrumok felvételére lehet mód, ha legalább 13, illetve 4 tranzitot sikerül megfigyelni. A pontos szám nagyban függ a bolygók légkörének összetételétől és azok pontos tömegétől, tehát ezektől jóval több tranzitra lehet szükség. Mivel a TRAPPIST-1e távolsága a tőlünk 12,425 parszek távolságban lévő központi csillagtól 2,4 milli-ívmásodperc, a közvetlen

megfigyelés ki van zárva a JWST segítségével, és valószínűleg csak a transzmissziós spektrum elemzésére van mód. A légkör szimulációs modellje alapján viszont a 2027-re elkészülő földi ELT (Extremely Large Telescope - Extrém Nagy Távcső) képes lesz mind a transzmissziós, mind a reflexiós és emissziós spektrumot vizsgálni (Lin and Kaltenegger, 2022), és kimutatni az ózon, oxigén, víz, metán és széndioxid jelenlétét. A Proxima b exobolygó egy másik olyan célpont, amely a földönkívüli élet jeleinek keresése szempontjából kiemelt fontosságú lesz a közeljövőben. Ez a bolygó a hozzánk legközelebb eső csillag körül kering 11,2 napos keringési idővel, de nem halad el a csillag előtt, így nem is a tranzit módszerrel, hanem a csillag sebességében kimutatott periodikus változások alapján sikerült észlelni a jelenlétét. A csillag egy vörös törpe, amely tőlünk 1,4 parszek távolságban helyezkedik el, így bár a bolygó jóval közelebb van hozzá, mint a Föld a Naphoz, elméletileg mégis lehetséges a folyékony víz jelenléte annak felszínén. A JWST néhány napos megfigyelés alapján képes lehet kimutatni a széndioxid jelenlétét a bolygó légkörében a MIRI műszer segítségével, amennyiben a bolygó közeli együttállásakor felvett spektrumot használják majd referenciaként, és ezt hasonlítják össze a távoli együttállásakor felvett spektrummal (Snellen et al., 2017).

Az első megfigyelések eddigi elemzése, és a következő hónapok, évek várható megfigyelései alapján kijelenthető, hogy a James Webb űrtávcső üzembe helyezésével egy új korszak kezdődött a csillagászat terén. Az űrtávcső az előzetes várakozásoknak megfelelően teljesít, úgyhogy jó befektetésnek tűnik annak 10 milliárd dolláros költsége. A nagyjából 10 éves késésnek pedig van egy pozitív vonzata is, mégpedig az, hogy az exobolygók megfigyelésével kapcsolatban eközben szerzett tapasztalatokat fel tudták használni a távcső tervezésénél, és azoknak megfelelően tudták még optimalizálni az egyes műszereket. Figyelembe véve a közeljövőben elkészülő egyéb projekteket és azok képességeit is, biztosan kijelenthető, hogy egy igazán izgalmas időszak következik, és jelentős felfedezések várhatók az elkövetkező években.

Irodalom

- [1] Pontoppidan, K., Barrientes, J., Blome, C. et al. (2022). *Characterization of JWST science performance from commissioning*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.05632>
- [2] JWST User Documentation Homepage. <https://jwst-docs.stsci.edu>
- [3] Hubble Space Telescope website. <https://hubblesite.org>
- [4] Spitzer Space Telescope website. <https://www.spitzer.caltech.edu>
- [5] Giardino, G., Bhatawdekar, R., Birkmann, S. M. et al. (2022). Optical throughput and sensitivity of JWST NIRSpec. *Proc. SPIE 12180, Space Telescopes and Instrumentation 2022: Optical, Infrared, and Millimeter Wave*, 121800X. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2208.04876>
<https://doi.org/10.1117/12.2628980>
- [6] Labiano, A., Argyriou, I., Álvarez-Márquez, J. et al. (2021). Wavelength calibration and resolving power of the JWST MIRI medium resolution spectrometer. *Astronomy & Astrophysics*, 656, A57. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140614>
- [7] Girard, J. H., Leisenring, J., Kammerer, J. et al. (2022). *JWST/NIRCam Coronagraphy: Commissioning and first on-sky results*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2208.00998>
- [8] Pontoppidan, K., Barrientes, J., Blome, C. et al. (2022). *The JWST early release observations*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.13067>
- [9] Bergström, L., Goobar, A. (2006). *Cosmology and Particle Astrophysics*. Springer Science & Business Media, 2. kiadás, ISBN: 978-3540329244

- [10] Bennett, C. L., Larson, D., J. L. Weiland, J. L. et al. (2013). Nine-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: Final maps and results. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 208(2), 20. <https://doi.org/10.1088/0067-0049/208/2/20>
- [11] Planck Collaboration: Aghanim, N., Akrami, Y., Arroja, F. et al. (2020). Planck 2018 Results: I. Overview and the cosmological legacy of Planck. *Astronomy & Astrophysics*, 641, A1.
- [12] Oesch, P. A., Brammer, G., van Dokkum, P. G. et al. (2016). A Remarkably Luminous Galaxy at $z=11.1$ Measured with Hubble Space Telescope Grism Spectroscopy. *The Astrophysical Journal*, 819(2), 129. <https://doi.org/10.3847/0004-637X/819/2/129>
- [13] Donnan, C. T., McLeod, D. J., Dunlop, J. S. et al. (2022). *The evolution of the galaxy UV luminosity function at redshifts $z \approx 8 - 15$ from deep JWST and ground-based near-infrared imaging.* <https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.12356> <https://doi.org/10.1093/mnras/stac3472>
- [14] Castellano, M., Fontana, A., Treu, T. et al. (2022). Early results from GLASS-JWST. III: Galaxy candidates at $z \sim 9-15$. *ApJL*, 938, L15. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac94d0>
- [15] Naidu, R. P., Oesch, P. A., Setton, D. J. et al. (2022). Schrodinger's Galaxy Candidate: Puzzlingly Luminous at $z \approx 17$, or Dusty/Quenched at $z \approx 5$? <https://doi.org/10.48550/arXiv.2208.02794>
- [16] Harikane, Y., Ouchi, M., Oguri, M. et al. (2022). *A Comprehensive Study on Galaxies at $z \sim 9 - 17$ Found in the Early JWST Data: UV Luminosity Functions and Cosmic Star-Formation History at the Pre-Reionization Epoch.* <https://doi.org/10.48550/arXiv.2208.01612>
- [17] Yan, H., Ma, Z., Ling, C. et al. (2022). *First Batch of Candidate Galaxies at Redshifts 11 to 20 Revealed by the James Webb Space Telescope Early Release Observations.* <https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.11558>
- [18] Haslbauer, M., Kroupa, P., Zonoozi, A. H., Hagi, H. (2022). Has JWST already falsified dark-matter-driven galaxy formation? *ApJL*, 939, L31. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac9a50>
- [19] Atek, H., Shuntov, M., Furtak, L. J. et al. (2022). *Revealing Galaxy Candidates out to $z \sim 16$ with JWST Observations of the Lensing Cluster SMACS0723.* <https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.12338> <https://doi.org/10.1093/mnras/stac3144>
- [20] Caminha, G. B., Suyu, S. H., Mercurio, A. et al. (2022). First JWST observations of a gravitational lens, Mass model from new multiple images with near-infrared observations of SMACS J0723.3-7327. *Astronomy & Astrophysics*, 666, L9. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202244517>
- [21] Bradley, L. D., Coe, D., Brammer, G. et al. (2022). *High-Redshift Galaxy Candidates at $z = 9 - 13$ as Revealed by JWST Observations of WHL0137-08.* <https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.01777>
- [22] Hsiao, T. Y.-Y., Coe, D., Abdurro'uf et al. (2022). *JWST reveals a possible $z \sim 11$ galaxy merger in triply-lensed MACS0647-JD.* <https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.14123> <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2206504/v1>
- [23] Pascale, M., Frye, B. L., Diego, J. et al. (2022). *Unscrambling the lensed galaxies in JWST images behind SMACS0723.* <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac9316> <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac9316>
- [24] Welch, B., Coe, D., Zackrisson, E. et al. (2022). *JWST Imaging of Earendel, the Extremely Magnified Star at Redshift $z = 6.2$.* <https://doi.org/10.48550/arXiv.2208.09007> <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac9d39>
- [25] Bovill, M. S., Stiavelli, M., Wiggins, A. I. et al. (2022). *Kindling the First Stars: I. Dependence of Detectability of the First Stars with JWST on the Pop III Stellar Masses.* <https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.10190>

- [26] Whalen, D. J., Fryer, C. L., Holz, D. E. et al. (2013). Seeing the First Supernovae at the Edge of the Universe with JWST. *The Astrophysical Journal Letters*, 762(1), article id. L6, 5 pp. <https://doi.org/10.1088/2041-8205/762/1/L6>
- [27] Hartwig, T., Bromm, V. Loeb, A. (2018). Detection strategies for the first supernovae with JWST. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 479(2), 2202–2213. <https://doi.org/10.1093/mnras/sty1576>
- [28] Gomez, S., Berger, E., Nicholl, M. et al. (2019). SN 2016iet: The pulsational or pair instability explosion of a low metallicity massive CO core embedded in a dense hydrogen-poor circumstellar medium. *ApJ*, 881, 87. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab2f92>
- [29] Kaltenecker, L., Lin, Z. (2021). Finding signs of life in transits: High-resolution transmission spectra of Earth-line Planets around FGKM Host Stars. *The Astrophysical Journal Letters*, 909, L2 (9pp). <https://doi.org/10.3847/2041-8213/abe634>
- [30] Gasman, D., Min, M., Chubb, K. L. (2022). Investigating the detectability of hydrocarbons in exoplanet atmospheres with JWST. *A&A*, 659, A114. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141468>
- [31] Doshi, D., Cowan, N. B., Huang, Y. (2022). Stratospheric clouds do not impede JWST Transit spectroscopy for exoplanets with Earth-Like atmospheres. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 515(2), <https://doi.org/10.1093/mnras/stac1869>
- [32] NASA's Webb Reveals Steamy Atmosphere of Distant Planet in detail, Garner, R. (Ed.) <https://www.nasa.gov/image-feature/goddard/2022/nasa-s-webb-reveals-steamly-atmosphere-of-distant-planet-in-detail>
- [33] Hall, S. (2022). Webb Telescope detects carbon dioxide on Exoplanet. *Nature*, 609, p. 229. <https://doi.org/10.1038/d41586-022-02350-2>
- [34] Kammerer, J., Girard, J., Carter, A. L. et al. (2022). *Performance of near-infrared high-contrast imaging methods with JWST from commissioning.* <https://doi.org/10.48550/arXiv.2208.00996> <https://doi.org/10.1117/12.2628865>
- [35] Boccaletti, A., Cossou, C., Baudoz, P. et al. (2022). *JWST/MIRI coronagraphic performances as measured on-sky.* <https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.11080> <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202244578>
- [36] Carter, A. L., Hinkley, S., Kammerer, J. et al. (2022). *The JWST early release science program for direct observations of exoplanetary systems I: High contrast imaging of the Exoplanet HIP 65426 b from 2-16 μ m.* <https://doi.org/10.48550/arXiv.2208.14990>
- [37] Miles, B. E., Biller, B. A., Patapis, P. et al. (2022). *The JWST early release science program for direct observations of exoplanetary systems II: A 1 to 20 micron spectrum of the planetary-mass companion VHS 1256-1257 b.* <https://doi.org/10.48550/arXiv.2209.00620>
- [38] Approved Programs website: <https://www.stsci.edu/jwst/science-execution/approved-programs>
- [39] JWST Weekly Observing Schedules website: <https://www.stsci.edu/jwst/science-execution/observing-schedules>
- [40] Greene, T. et al. (2019). Astro2020 Science White Paper, Characterizing Transiting Exoplanets with JWST Guaranteed Time and ERS Observations. Astro2020: Decadal Survey on Astronomy and Astrophysics, science white papers, no. 61; *Bulletin of the American Astronomical Society*, 51(3), 61.

-
- [41] Morley, C. V., Kreidberg, L., Rustamkulov, Z. et al. (2017). *Observing the atmospheres of known temperate Earth-sized planets with JWST*. *ApJ*, 850(2), 121. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa927b>
- [42] Lin, Z., Kaltenegger, L. (2022). High-Resolution spectral models of TRAPPIST-1e seen as a Pale Blue Dot for ELT and JWST observations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 516(3), 3167–3174. <https://doi.org/10.1093/mnras/stac2536>
- [43] Snellen, I. A. G., Désert, J.-M., Waters, L. B. F. M. et al. (2017). Detecting Proxima b's Atmosphere with JWST targeting CO₂ at 15 micron using a high-pass spectral filtering technique. *The Astronomical Journal*, 154(2), 77. <https://doi.org/10.3847/1538-3881/aa7fbc>