



Maisterintutkielma
Kaasukehätieteiden maisteriohjelma
Meteorologia

PILVET EKSOPLANEETTOJEN KAASUKEHÄSSÄ: VAIKUTUKSET
ELINKELPOISUUTEEN JA TRANSMISSIOSPEKTRIIN

Jenna Salminen
19.12.2024

Ohjaajat: Mikko Tuomi, Jouni Räisänen
Tarkastajat: Mikko Tuomi, Jouni Räisänen

HELSINGIN YLIOPISTO
MATEMAATTIS-LUONNONTIETEELLINEN TIEDEKUNTA
PL 64 (Gustaf Hällströmin katu 2a)
00014 Helsingin yliopisto

Tiedekunta – Fakultet – Faculty Matemaattis-luonnontieteellinen		Koulutusohjelma – Utbildningsprogram – Degree programme Kaasukehätieteiden maisteriohjelma Meteorologia	
Tekijä – Författare – Author Jenna Salminen			
Työn nimi – Arbetets titel – Title Pilvet eksoplaneettojen kaasukehässä: vaikutukset elinkelpoisuuteen ja transmissiospektriin			
Työn laji – Arbetets art – Level Maisterintutkielma		Aika – Datum – Month and year 12/2024	Sivumäärä – Sidantal – Number of pages 43
Tiivistelmä – Referat – Abstract Tässä maisterintutkielmassa selvitin, kuinka pilvet vaikuttavat eksoplaneetan kaasukehään, sen havainnointiin ja havaintojen pohjalta tehtäviin arvioihin elinkelpoisuudesta. Esimerkkitapauksena käytin supermaapalloksi tai alineptunukseksi luokitettavaa eksoplaneettaa K2-18b, jonka kaasukehää mallinsin yksiulotteisella Atmos-mallilla. Käyttämällä mallinuksissa eri määriä vesihöyryä ja ratkaisemalla Clausius-Clapeyronin yhtälöllä sekoitussuhteiden mukaiset kastepistekäyrät sain tulokseksi kaasukehän lämpötilan pystyjakaumat, joilla vesihöyryn määrä ja vallitsevat kaasukehän olosuhteet pystyisivät muodostamaan pilviä. Kaasukehän rakennetta ja ratkaistuja pilvitasoja käytin transmissiospektrin selvittämiseen Exo-Transmit-mallilla. Kaasukehämallinuksista pystyin toteamaan K2-18b:n olevan elinkelpoinen, ja että kaasukehässä esiintyvä vesihöyry nostaa pintalämpötilaa. Suurella vesihöyryn määrällä tulosten epävarmuus kasvoi. Veden sekoitussuhteen ollessa 8,9 % ja 20,0 % vesihöyry saavutti kyllästystilan lähellä troposfääriä ja katsoin pilvien muodostuminen olevan mahdollista. Vertailemalla pilvettömien ja pilvisten kaasukehien läpi muodostuvaa spektriä selvitin, että pilvien peittämässä kaasukehässä voi huomattava osa kaasujen absorptiosormenjäljistä vaimeta tai kadota spektristä kokonaan. Tämä on seurausta siitä, ettei tähden säteily pääse tunkeutumaan pilvien läpi alakaasukehässä sijaitsevaan tiheimmän ilman kerrokseen, jossa suurin osa säteilyn absorptiosta tapahtuisi. Koska absorption määrä on molekyylien määrän lisäksi riippuvainen lämpötilasta, heikommat absorption merkit voivat antaa kuvan todellisuutta viileämmästä kaasukehästä. Vaimeammat merkit antaisivat myös käsityksen erilaisesta kaasukehän koostumuksesta, joka painottuu pilvien yläpuolisesta kaasukehästä havaittujen molekyylien absorptioon, kuin selkeän kaasukehän havainnoista saataisiin.			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords Eksoplaneetta, elinkelpoisuus, kaasukehämallinnus, pilvet, spektrimallinnus, transmissiospektri			
Säilytyspaikka – Förvaringsställe – Where deposited			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information			

Sisältö

1	Johdanto.....	1
2	Teoria.....	3
2.1	Eksoplaneettojen luokittelu.....	3
2.2	Elinkelpoisuuden määrittäminen	4
2.3	Kaasukehän olosuhteet	5
2.3.1	Kaasukehän muodostuminen.....	5
2.3.2	Säteilynkulku ja ilmasto	6
2.3.3	Kiertoliikkeen kehittyminen.....	6
2.3.4	Pilvien muodostuminen.....	7
2.3.5	Pilvien vaikutus elinkelpoisuuteen	9
2.4	Eksoplaneettojen kaasukehän havainnointi	10
2.4.1	Spektroskopia kaasukehän tutkimuksessa	11
2.4.2	Pilvien vaikutus havainnointiin.....	12
2.5	Eksoplaneettojen kaasukehämallinnus.....	13
2.5.1	Pilvet mallinuksissa.....	13
3	Aineisto.....	15
3.1	Esimerkkieksoplaneetta K2-18b	15
3.2	Parametrien keräys.....	16
3.3	Tähden säteilydatan valinta.....	17
4	Menetelmät	18
4.1	Atmos ja P-T-profiili	18
4.2	Pilvien esiintymistason määrittäminen	19
4.3	Exo-Transmit ja spektrin mallinnus.....	20
4.3.1	Spektrin absorptiosormenjälkien analyysin menetelmät	22
5	Tulokset.....	23
5.1	Kaasukehän pystyprofiilit ja K2-18b:n elinkelpoisuus pintaolosuhteiden perusteella	23
5.2	Erot pilvitasoissa.....	25
5.3	Pilvisyyden tuomat erot spektrissä.....	29
6	Pohdintaa	36
7	Yhteenveto.....	38
8	Kirjallisuusluettelo	40

1 Johdanto

Eksoplaneettojen tutkimus edistyy jatkuvasti havaintolaitteiden kehittyessä. Kun havaintojen tekemiseen saadaan uusia ja parempia työkaluja, eksoplaneetoista päästään tekemään entistä tarkempia havaintoja. Sen myötä valovuosien etäisyydellä olevien maailmojen kaasukehistä saadaan myös kerättyä entistä yksityiskohtaisempaa tietoa. Laajentamalla tietoutta muissa tähtijärjestelmissä syntyvistä kaasukehistä, parannamme samalla mahdollisuuksia ymmärtää oman planeettamme kaasukehää sekä nykyhetkessä että planeettamme menneisyydessä ja tulevaisuudessa. Motivaatioita ja näkökulmia eksoplaneettojen tutkimiseen on yhtä monia kuin on uusista maailmoista kiinnostuneita. Kannustaapa tutkimuksiin uusien maailmojen viehätys tai ymmärrys omaa planeettamme kohtaan, jokaisen tutkimuksen osalta on tärkeää, että arviot eksoplaneettojen kaasukehän olosuhteista rakennetaan luotettavista havainnoista. Tällöin kaukaisten planeettojen tutkimustyö antaa mahdollisimman tarkan kuva todellisuudesta ja tiedämme varautua ennalta oikeanlaisiin olosuhteisiin, jos tulevaisuudessa lähetämme luotaimia näihin valovuosien päässä oleviin määränpäihin. On siis tärkeää, että kartuttaessamme tietoutta uusilla mittauksilla, tutkimme myös, kuinka edustavia havainnot voivat olla. Yksi eksoplaneettatutkimuksen kiinnostuksen kohde, jossa edustavat havainnot ovat kriittisen tärkeitä, on se, salliiko planeetan kaasukehä elämän esiintymisen. Mitä edustavampia kaasukehähavainnot ovat, sitä vankemmalta pohjalta voidaan arvioida, voivatko eri eksoplaneetoilla vallitsevat olosuhteet olla elinkelpoiset. Muun muassa puutteelliset tiedot eksoplaneetan kaasukehän koostumuksesta voivat johtaa vääristyneeseen käsitykseen kaasukehän lämpöoloista ja pahimmillaan antaa harhaanjohtavan kuvan elinkelpoisuudesta.

Kun eksoplaneetan elinkelpoisuutta ja yleisiä kaasukehän olosuhteita lähdetään määrittämään, keskeinen tiedonlähde on eksoplaneetan kaasukehän läpi kulkeva säteily. Tietoa voidaan kerätä joko eksoplaneetan tai sen kiertämän tähden säteilyn välityksellä. Kun säteilyn ja kaasukehän vuorovaikutuksia tarkastellaan, saadaan käsitys siitä, mistä kaasukehä koostuu. Tähden säteilystä, joka on kulkenut eksoplaneetan kaasukehän läpi, osa absorboituu kaasukehään. Se, mikä ja kuinka iso osa säteilystä on jäänyt kaasukehään, sisältää tietoa kaasukehässä olevista kaasusta. Kun vastaavasti havainnoidaan eksoplaneetan emittoimaa säteilyä, eli eksoplaneetan kaasukehän tähdestä alun perin keräämää säteilyä, voidaan kerätä samoja tietoja kaasukehän olosuhteista, mutta emittoidussa säteilyssä tieto löytyy siitä, kuinka paljon ja millä säteilyn alueella kaasukehän sisältämät kaasut säteilevät takaisin avaruuteen. Säteilyn emissio- ja absorptiomerkkien välityksellä on mahdollista saada tietoa myös kaasukehän kerrostuneisuudesta, mikä koostumushavaintojen kanssa muodostaa pohjakäsityksen eksoplaneettojen olosuhteista ja elinkelpoisuudesta.

Säteilyn ja sen sisältämien tietojen havaitsemista sekä tietojen perusteella laadittuja elinkelpoisuusarvioita voi kuitenkin vaikeuttaa eksoplaneetalla esiintyvät pilvet. Pilvisyys voi pysäyttää säteilyn kulun kaasukehässä, jolloin osa tähdestä saapuneesta tai planeetasta lähtevästä säteilystä ei pääse kulkemaan suoraan koko kaasukehän läpi, eikä matkalle jääneen säteilyn tieto välity havaintoihin. Koska pilvet vaikuttavat kaasukehän säteilyn kulkuun, tarkoittaa se sitä, että pilvet vaikuttavat myös eksoplaneettojen pinnalle muodostuviin olosuhteisiin. Pilvien muovaamia pintaolosuhteita ei kuitenkaan päästä

havainnoimaan, jos pilvet estävät säteilyhavaintojen tekemisen niiden alle jäävistä ilmakerroksista. Jos eksoplaneetan kaasukehässä esiintyy pilviä, voidaan odottaa, ettei kaikkea eksoplaneetan kaasukehän kokonaisvaltaisen analyysiin tarvittavaa säteilyä saada havaittua. Pilvisyyden läsnäolo eksoplaneetalla on siis yksi isoista tekijöistä, jotka voivat johtaa puutteisiin säteilyn välittämässä tiedoissa kaasukehästä ja väärää elinkelpoisuudesta tehtäviä arvioita.

Koska pilvet voivat vaikuttaa eksoplaneettojen olosuhteisiin ja merkittävästi hankaloittaa niiden tarkkaa arviointia, tämän tutkimuksen tarkoitus on selvittää, kuinka pilvien vaikutuksia eksoplaneettatutkimuksessa voidaan lähestyä. Mitä enemmän pilvien vaikutusta tutkitaan ja otetaan huomioon, sitä luotettavampia arvioita voidaan laatia ensimmäisten, kuten NASAn Hubblen (NASAa) tämän hetkisten, kuten James Webb avaruustelekoopin (JWST) tekeä havainnoista (*Madhusudhan, N. et al. 2023*). Paraneva käsitys pilvien esiintymisestä kaasukehässä auttaa myös valitsemaan tuhansien eksoplaneettojen joukosta mielenkiintoisimpia tutkimuskohteita esimerkiksi ESA:n Arielille (ESAa), jonka tehtävä on tulevaisuudessa havainnoida pilvien käytöstä. Kysymystä pilvien vaikutuksesta lähestyttiin kosteuden määritelmän kautta, sillä pilvien synty on kosteudesta riippuvaista. Päämääränä on selvittää, kuinka kosteus ja pilvet vaikuttavat eksoplaneettojen kaasukehään, ja miten planeetan elinkelpoisuudesta voidaan tehdä arvio havaintojen pohjalta. Tutkimalla kosteuden vaikutusta pyrittiin vastaamaan, kuinka kosteus vaikuttaa pilvien syntyyn, kuinka pilvisuus vaikuttaisi eksoplaneetan kaasukehästä tehtäviin havaintoihin, ja kuinka mahdolliset erot spektrihavainnoissa vaikuttaisivat arvioihin eksoplaneetan kaasukehästä.

Hyödyntämällä havaintoja ja niihin perustuvaa arviota eksoplaneetta K2-18b:n kaasukehästä laadittiin Atmos-mallilla (*Virtual Planetary Laboratory*) yksiulotteinen (1D) mallinnus kaasukehän lämpötilan pystyprofiilista, jonka avulla selvitettiin pilviä muodostavat kaasut ja mahdolliset pilvitasot. Pilvien esiintymistasoa ja sen vaikutusta spektrihavaintoihin analysoitiin Exo-Transmit-mallilla (*Kempton, E.M.-R. et al. 2017*). Tässä tutkielmassa yleisiä pohjatietoja eksoplaneettojen havainnoinnista ja luokittelusta sekä eksoplaneettojen kaasukehästä esitellään luvussa 2. Luvussa 3 esitellään tutkielman tapaustutkimuksen kohteena toiminut eksoplaneetta, K2-18b, ja tutkimusmateriaalina käytetty aineisto. Luku 4 kuvaa kaasukehän sekä säteilyspektrin mallinnukseen käytetyt menetelmät. Tulokset esitellään luvussa 5. Pohdintaa tuloksista on luvussa 6 ja yhteenveto tutkielmasta tehdään luvussa 7.

2 Teoria

2.1 Eksoplaneettojen luokittelu

Eksoplaneetat ovat planeettoja samassa merkityksessä kuin oman aurinkokuntamme planeetat ovat. Taivaankappale voidaan katsoa planeetaksi, jos se täyttää yleisesti sovitut ehdot. Kansainvälinen tähtitieteellinen unioni päätyi vuonna 2006 sopimaan, että planeetta on taivaankappale, joka on pääosin pyöreä riittävän kokonsa sekä siitä johtuvan painovoiman vuoksi, jolla on merkittävä vaikutus muihin lähistöllä mahdollisesti oleviin kappaleisiin, ja joka kiertää tähteä (*IAU*). Käytännössä merkittävä vaikutus tarkoittaa, että kyseisen taivaankappaleen oma painovoima hallitsee kappaleen kiertorataa, mikä tekee tästä taivaankappaleesta kiertoradan ainoan itsensä kokoisen kappaleen. Aurinkokunnan planeetat eksoplaneetoista erottaa se, että eksoplaneetat ovat planeettoja, jotka kiertävät Auringon sijaan muita maailmankaikkeuden tähtiä.

Eksoplaneettoja on luokiteltu pääosin niiden koon perusteella (*Kopparapu, R.K. et al. 2018; Perryman, M.A.C. 2018*). Tyypillisesti eksoplaneetat jaotellaan niistä tehtyjen havaintojen mukaan kokoluokkiin arvioidun massan, säteen tai halkaisijan perusteella. Luokiteltujen eksoplaneettojen koko vaihtelee Maata pienemmistä planeetoista aina ruskeiden kääpiötähtien kokoihin planeettoihin. Kun eksoplaneetan kokoa ja luokkaa kuvaillaan, vertailukohtana pidetään usein etenkin Maata, tai isoimpien eksoplaneettojen osalta myös Jupiteria. Tämä näkyy myös luokille valituissa nimissä.

Eri jaottelutapojen luokat, joissa eksoplaneetan koko on lähellä Maan kokoa, on usein nimetty Maan mukaan, kuten seuraavat eri luokat: Maat, Maankaltaiset. Tätä pienemmät luokat tapaavat kantaa nimeä alimaapallot, kun taas astetta isompien eksoplaneettojen luokka on voitu nimetä super-etuliitteellä, kuten supermaapallot. Kun tarkastellaan eksoplaneettoja, joiden koko on Maahan nähden moninkertainen, luokkien nimet on johdettu Jupiterista: Jupiterit tai Joviaaniset eli suoremmin suomeksi sanottuna jupiterinkaltaiset (*Merriam-Webster*). Myös isompien eksoplaneettojen luokkien jaottelutavoissa käytetään toisinaan etuliitteitä ilmaisemaan kokoa suhteessa Jupiteriin. Jupiteria pienempien eksoplaneettojen voidaan katsoa kuuluvan alijupiter-luokkaan ja suurempien super-Jupiter-luokkaan. Osassa jaottelutapoja on myös erikseen annettu nimet Jupiterin ja Maan kokoluokan väliin jääville eksoplaneetoille Neptunuksen mukaan, kuten Neptunuksen kaltaiset ja ali- tai mini-Neptunukset (*ESAb; Kopparapu, R.K. et al. 2018; NASAb; Perryman, M.A.C. 2018*).

Eksoplaneettojen luokittelussa otetaan huomioon niiden koon lisäksi myös niiden koostumus, joka kulkee usein käsi kädessä eksoplaneetan massan ja koon kanssa (*Kopparapu, R.K. et al. 2018*). Koostumuksen pohjalta voidaan tehdä jako kahteen: terrestriaaliset eli kiviplaneetat sekä kaasuplaneetat. Maan kokoiset tai sitä pienemmät planeetat ovat usein kiviplaneettoja, kun taas suuremmat planeetat tapaavat olla kaasuplaneettoja. Etenkin suurempien, kuten Jupiterin ja Neptunuksen kokoluokan eksoplaneettojen koostumus ja samalla massa riippuu suuresti siitä, mikä on ollut eksoplaneetan tähtijärjestelmän protoplanetaarisen kiekon koko, koostumus ja kehitys eli millaiset ainesosat eksoplaneetan kasvuympäristössä on ollut tarjolla (*Bitsch, B., Lambrechts, M. & Johansen, A. 2015; Perryman, M.A.C. 2018*). Minkälaisen kaasukehän

eksoplaneetta voi ympärilleen muodostaa on myös riippuvainen protoplanetaarisen kiekon koostumuksesta.

Kokoon ja koostumukseen perustuvia luokkia voidaan myös laajentaa alaluokkiin sen perusteella, kuinka paljon eksoplaneetta vastaanottaa emotähden säteilyä ja kuinka paljon säteilylämmitystä eksoplaneetta kokee. Saadun säteilyn määrä riippuu tähden tyypistä mutta etenkin eksoplaneetan etäisyydestä tähteen. Lähempänä tähteä kaasukehää lämmittävä säteily on runsaampaa, etäämmällä vähäisempää. Lähellä tähteään sijaitsevat eksoplaneetat voidaan täten luokitella kuumiksi, kaukana olevat kylmiksi, ja tälle välille sijoittuvat lämpimiksi. (*Kopparapu, R.K. et al. 2018*)

2.2 Elinkelpoisuuden määrittäminen

Jotta eksoplaneetan ja sen kaasukehän elinkelpoisuutta voidaan lähteä määrittämään, on eksoplaneetalla oltava kaasukehä ympärillään. Oleellinen kriteeri maankaltaista elinkelpoisuutta määriteltäessä on se, voiko vettä esiintyä nestemäisessä olomuodossa eksoplaneetan pinnalla, koska elämä maapallolla on riippuvainen nestemäisen veden olemassaolosta (*Seager, S. 2010*). Eksoplaneetan elinkelpoisuus määritellään täten yleisesti sen perusteella, onko eksoplaneetan pinnalla vallitsevassa lämpötilassa mahdollista esiintyä nestemäistä vettä (*Robinson, T.D. 2018*). Veden olomuotoon vaikuttaa lämpötilan lisäksi paine. Paine eksoplaneetan pinnalla riippuu pääosin suoraan kaasukehän massasta. Eksoplaneetoilla vallitseva lämpötila määräytyy puolestaan säteilytasapainon mukaan, eli kaasukehän lämpöolot riippuvat siitä, paljonko säteilyä saapuu ja poistuu kaasukehästä (*Line, M., Quanz, S.P., Schwieterman, E.W. et al. 2019*).

Koska kaasukehässä lämpötila pitkälti määrittää veden olomuodon, elinkelpoisuus riippuu eksoplaneetan saamasta säteilystä, ja emotähdestä saatava säteily riippuu käänteisen neliön lain mukaan kiertoradan säteestä eli tähden ja eksoplaneetan välisestä etäisyydestä. Täten yksi ensimmäisistä asioista, joita eksoplaneetan elinkelpoisuutta tutkittaessa selvitetään, on se, millaista tähteä eksoplaneetta kiertää ja millä etäisyydellä, sillä elinkelpoisen vyöhykkeen sijainti tähden ympärillä riippuu emotähden tyypistä ja sen tuottamasta säteilystä (*Kopparapu, R.K. et al. 2013; Robinson, T.D. 2018*).

Elinkelpoisella vyöhykkeellä emotähdestä saatava säteily riittää tarjoamaan eksoplaneetalle otolliset lämpöolot nestemäisen veden esiintymiseen. Jos eksoplaneetta on, tai on ollut, lähellä emotähteään ja säteily on ollut liian voimakasta, eksoplaneetan kaasukehä on voinut kuumentua liikaa ja jopa haihtua pois (*Robinson, T.D. 2018*). Liian kuumassa kaasukehässä vesi ei pysty esiintymään nestemäisessä olomuodossaan ja mahdolliset meret ovat voineet myös haihtua pois. Toisaalta eksoplaneetan kiertäessä emotähteään liian kaukana, saa planeetta liian vähän säteilyä ja kaasukehästä voi muodostua niin kylmä, ettei vettä voi esiintyä nestemäisessä muodossa. Liian kylmä kaasukehä voi myös romahtaa, jos lämpö ei riitä pitämään kaasukehän atomeja ja molekyylejä kaasumaisessa muodossa (*Sergeev, D.E. et al. 2022*).

Vaikka ensisijaisena mittarina elinkelpoisuudesta pidetään eksoplaneetan sijaintia elinkelpoiseen vyöhykkeeseen nähden ja veden esiintymisen mahdollisuutta, tärkeää on myös huomioida eksoplaneetan kokoluokka. Sen mukaan voidaan saada käsitys

kaasukehän koostumuksesta. Suurimassaisten eksoplaneettojen painovoima voi maankaltaisen elämän osalta olla liian suuri, jos se johtaa liian kuumaan pintalämpötilaan. Massiivisen kaasukehän tuottama paine tasolla voi myös olla ihmisen sietokykyyn nähden musertava. Kaasukehän koostumus vaikuttaa myös siihen, millaista elämää sen puitteissa voisi mahdollisesti kehittyä, mutta koostumus vaikuttaa myös säteilyn kulkuun kaasukehässä. Kaasukehän kaasujen optinen paksuus määrittää, paljonko säteilyä pääsee kaasukehän läpi. Esimerkiksi runsas kasvihuonekaasujen läsnäolo voi riittävällä säteilyllä johtaa kaasukehän karkaavan kasvihuoneilmiön tilaan, jolloin voimistuvan kasvihuonevaikutuksen myötä kaasukehästä kehittyä liian kuuma eikä pinnalla voi esiintyä enää nestemäistä vettä, vaikka eksoplaneetta sijaitsisikin tähdestä saatavan säteilymäärän perusteella elinkelpoisella vyöhykkeellä (*Kaspi, Y. & Showman, A.P. 2015*).

Eksoplaneetan keskimääräinen etäisyys tähden ei myöskään yksikäsitteisesti määrää eksoplaneetan lämpöoloja ja elinkelpoisuutta, sillä elinkelpoisuuteen vaikuttavat monet planetaariset ominaisuudet (*Showman, A.P. et al. 2013*). Eksoplaneetan tähdestä saaman säteilyn määrä voi vaihdella riippuen siitä, kuinka eksenttrinen eli soikea planeetan kiertorata on. Kun eksoplaneetan etäisyys tähden vaihtelee, voi planeetta ajoittain sijaita elinkelpoisen vyöhykkeen ulkopuolella. Riittävän suuret muutokset eksoplaneetan kokemassa säteilyssä voivat ajaa kaasukehän elinkelpoisuuteen nähden liian kuumaan tai kylmään tilaan. Ajan myötä myös tähden kirkkaus muuttuu, jolloin tähden elinajan mittaan elinkelpoinen vyöhyke siirtyy säteilytehon muuttuessa (*Waltham, D. 2017*), ja eksoplaneetta voi jäädä elinkelpoisen vyöhykkeen ulkopuolelle.

2.3 Kaasukehän olosuhteet

Yksittäisen eksoplaneetan kohdalla olosuhteet pinnalla riippuvat tähden säteilyn lisäksi planeetan koosta, pintapainovoimasta ja pyörimisnopeudesta sekä kaasukehän optisesta paksuudesta, koostumuksesta ja massasta (*Kaspi, Y. & Showman, A.P. 2015*), joista kaikki nämä vaikuttavat myös kaasukehän kiertoliikkeeseen. Kehittyvä pintalämpötila ja sen jakauma on näiden kaikkien tekijöiden summa. Kiertoliike vaikuttaa lämpötilan lisäksi pilvien jakaumaan sekä eksoplaneetan elinkelpoisuuteen.

2.3.1 Kaasukehän muodostuminen

Koska planeetat syntyvät protoplanetaarisessa kiekossa, riippuu myös niiden kaasukehän koostumus siitä, mistä protoplanetaarinen kiekko koostuu. Sekä kaasujättiläiset että kiviplaneetat kerryttävät kehittyessään kaasua ympärilleen protoplanetaarisen kiekon sisältämistä materiaaleista (*Seager, S. 2010*).

Massiivisemmilla kaasujättiläisillä painovoima on suurempi, mikä pitää kertyneen kaasun planeetan ympärillä. Nämä isot planeetat keräävät ympärilleen kaasukehän, joka koostuu usein suurilta osin vedystä H_2 ja heliumista He (*Kopparapu, R.K. et al. 2018*). Pienempimassaisten kiviplaneettojen painovoima ei puolestaan riitä pitämään kevyempiä kaasuja planeetan ympärillä vaan tämä protoplanetaarisesta kiekosta kertynyt ensikaasukehä karkaa lopulta avaruuteen.

Myöhemmin kiviplaneetallekin voi kehittyä uusi, sekundäärinen kaasukehä. Tämä ensi-kaasukehän korvaava kaasukehä muodostuu planeetan maaperästä kaasuuntuvista ainesosista (Robinson, T.D. 2018; Seager, S. 2010). Koska ainesosat ovat peräisin muodostuneen planeetan maaperästä, sekundääriseen kaasukehän koostumukseen vaikuttavat protoplanetäärisen kiekon sisältämät materiaalit. Maaperään kertynyt aine riippuu planeetan muodostumishetkellä tarjolla olleista materiaaleista sekä niiden jakautumasta kiekon alueella. Tyypillisesti pienemmille planeetoille kehittyvä kaasukehä sisältää enemmän esimerkiksi metaania CH_4 , hiilidioksidia CO_2 , vettä H_2O ja ammoniakkia NH_3 (Kopparapu, R.K. et al. 2018).

2.3.2 Säteilynkulku ja ilmasto

Eksoplaneetan ilmasto kehittyi kaasukehän vallitsevan lämpötilan ja paineen mukaan, ja riippuu tarkemmin ottaen lämpötilan pystyjakaumasta paineen suhteen. Lämpötilaan vaikuttaa se, paljonko säteilyä saapuu ja poistuu kaasukehästä (Line, M., Quanz, S.P., Schwieterman, E.W. et al. 2019). Säteilymäärän erot eri alueilla eksoplaneettaa ovat seurausta planeetan pallomaisesta muodosta ja säteilyn epätasaisesta jakaumasta pallomaiselle pinnalle. Säteily tähdestä on runsaampaa sen tullessa kohtisuoraan pintaan nähden, kun taas viistosti pinnalle kohdistuva säteily on vähäisempää samaa pinta-alaa kohti. Säteilyn jakaumaan planeetan pinnalla vaikuttaa myös planeetan pyörimisakselin kaltevuus ja sen suunnan muutokset eli prekessio. Planeetoilla, joilla pyörimisakseli on asettunut enemmän tai vähemmän kohtisuoraan kiertoradan tason nähden, säteily on voimakkainta ja ilma kuuminta päiväntasaajan ympäristössä. Kylmintä on puolestaan tällöin napa-alueiden ympäristössä, missä viistosti saatavan säteilyn tuoma lämmitys on vähäisempää.

Kaasukehän vesihöyryn määrä kaasukehässä vaikuttaa nestemäisen veden esiintymisen mahdollisuuksiin, mutta vaikuttaa myös säteilynkulkuun. Suuri kosteus voimistaa kasvihuoneilmiötä (Windsor, J.D. et al. 2023), mikä voi johtaa siihen, että elinkelpoisuuden rajamailla oleva kaasukehä, joka on valmiiksi lähellä liian kuumaa tilaa, kuumenee entisestään eivätkä lämpöolot enää tue nestemäisen veden olemassaoloa. Toisaalta vesihöyry voi myös lämmittää muutoin hieman liian kylmää kaasukehää, jolloin kaasukehän lämpöolot asettuvat elinkelpoisuuden osalta suotuisten raja-arvojen sisään.

2.3.3 Kiertoliikkeen kehittyminen

Kaasukehässä lämpötilaerot pyrkivät tasoittumaan, mikä johtaa lämmön siirtymiseen kuumemmilta alueilta kohti kylmempiä alueita. Tämä ilmenee esimerkiksi siten, että lämpöä kulkeutuu päiväntasaajalta kohti napojen kylmempiä alueita. Lisäksi ilma pyrkii tasapainotilaan, jonka myötä lämpimämpi ilma kohoaa kevyempänä ylöspäin ja viileämpi ilma vajoo raskaampana alaspäin. Näistä lämpötilojen tasoittumisprosesseista syntyy kaasukehään planetaarisen mittakaavan kiertoliikkeitä. Kiertoliikkeen ominaisuudet määrittelevät pitkälti kaasukehään muodostuvan lämpötilajakauman, virtausten rakenteen sekä tuulien voimakkuuden, ja meridionaalisen lämmön kulkeutumisen (Kaspi, Y. & Showman, A.P. 2015), sillä lämpötilaero ja tuulien suunta sekä voimakkuus ovat suoraan

yhteydessä toisiinsa termisen tuulen lain kautta. Kieroliikkeeseen vaikuttaa myös eksoplaneetan pyörimisnopeus.

Planeetan pyörimisnopeus akselinsa ympäri määrittää meridionaalisen kiertoliikkeen solujen ja niiden väliin kehittyvien suihkuvirtausten määrän. Mitä nopeammin planeetta pyörii akselinsa ympäri, sitä useampi suihkuvirtaus ja solu kehittyy päiväntasaajan Hadley-solun ja napa-alueen väliin. Kun kaasukehään muodostuu useampia kiertoliikkeen soluja, ilmamassat jakautuvat useammaksi vyöhykkeeksi, jossa rinnakkaisten ilmamassojen lämpötilaero toisiinsa nähden on pienempi, ja samalla niitä jakavan suihkuvirtauksen tuulet ovat heikommät (*Kaspi, Y. & Showman, A.P. 2015*). Napojen ja päiväntasaajan välinen lämpötilaero kuitenkin kasvaa. Ero myös kasvaa sitä mukaan, mitä suurempi painovoima planeetalla vallitsee ja kuinka iso planeetan säde on.

Jos planeetta pyörii hitaasti eikä pyörimisellä ole täten suurta vaikutusta kaasukehän liikkeeseen, kaasukehään muodostuu trooppiset olosuhteet, missä kaasukehän aallot ja päiväntasaajan molemmiin puolin syntyvä Hadley-solu tasaavat lämpötilaa tehokkaasti päiväntasaajan ja napojen välillä (*Showman, A.P. et al. 2013*). Tällöin planeetan kaasukehään syntyy tropiikin lisäksi ekstrapiikit korkeammille leveysasteille, missä lämmön jakaumaan vaikuttavat voimakkaimmin kaasukehän liikkuvat häiriöt, kun taas tropiikin ja ekstrapiikin rajalla vaikuttavat Rossby-aallot. Lämpötilan tasaisempaa jakautumista planeetalla voi edistää myös kaasukehän pienempi massa tai suurempi optinen paksuus (*Kaspi, Y. & Showman, A.P. 2015*).

Hyvin hitaasti pyörivillä tai vuorovesilukkiutuneilla planeetoilla, joilla sama puoli planeetasta on aina tähteen päin, yö- ja päiväpuolen lämpötilaero ja kaasukehän superrotaatio vaikuttavat voimakkaasti kaasukehän dynamiikkaan (*Showman, A.P. et al. 2013*). Kohti tähteä oleva päiväpuoli lämpenee voimakkaasti säteilystä, mikä kasvattaa lämpötilaeroa päiväpuolen ja säteilyjäähdyvän yöpuolen välillä, jolloin vyöhyketuuli planeetan ympärillä vahvistuu (*Cohen, M. et al. 2023*). Jos lämpötilaero yö- ja päiväpuolen välillä kasvaa todella suureksi, voi horisontaalinen lämmön kulkeutuminen päiväpuolelta yöpuolelle häiriytyä ja yöpuolella ilma kylmetä voimakkaan säteilyjäähdyksen myötä niin paljon, että kaasukehä yöpuolella romahtaa (*Showman, A.P. et al. 2013*). Eksoplaneetat, jotka ovat lähempänä tähteään ovat todennäköisemmin vuorovesilukkiutuneita (*Kaspi, Y. & Showman, A.P. 2015*).

2.3.4 Pilvien muodostuminen

Kosteus, eli tiivistyvän kaasun määrä kaasukehässä, on keskeinen tekijä pilvien muodostumisessa. Kaasukehän liikkeiden ja sen myötä kehittyvän kiertokulun kautta määräytyy, minne kosteus kulkeutuu ja kerääntyy (*Kaspi, Y. & Showman, A.P. 2015; Showman, A.P. et al. 2013*). Tämä tiivistyvän kaasun jakautuminen kaasukehän eri alueille määrittää, millä alueilla pilvet muodostuvat ja kuinka ne vaikuttavat ilmastoon. Kun ilman kosteussisältö kasvaa tai ilma viilenee riittävästi, kaasun osapaine voi saavuttaa kyllästyspaineen, jolloin ilma saavuttaa kyllästystilan. Tiivistyvän kaasun määrä ilmassa voi kasvaa planeetan pinnasta tapahtuvan haihtumisen tai sublimoitumisen surauksena. Viilentymisen voi seurata ilman virratessa kylmempään ympäristöön tai ilman kohotessa kaasukehässä ylöspäin. Kyllästystilassa olevassa ilmassa alkaa

muodostua pisaroita tai jääkiteitä. Se, kumpia pilvipartikkeleita syntyy, riippuu vallitsevasta lämpötilasta ja paineesta. Vaadittavat olosuhteet riippuvat kaasun ominaisuuksista ja määrästä, mutta pilvipartikkeleiden syntyyn vaikuttaa myös tarjolla olevien tiivistymis- ja jäätymisydinten määrä, vaikkakin vaikutuksen suuruudesta eksoplaneettojen kaasukehässä ei vielä olla varmoja (*Helling, C. 2019*). On oletettavaa, että myös eksoplaneetoilla pilvipartikkeleita voi syntyä spontaanisti tiivistymällä supersaturaation kasvaessa tai nukleaatiolla, mutta nukleaation merkitys pilvien syntyyn saattaa erota siitä, mitä se on maapallolla (*Pinhas, A. & Madhusudhan, N. 2017*). Vaikka pilvien muodostuminen tapahtuisi pääasiassa tiivistymisen, jäätymisen tai härmistymisen kautta, voi niitä syntyä myös muilla tavoilla. Pilvipartikkeleita voi syntyä esimerkiksi kemiallisten ja valokemiallisten reaktioiden tuloksena tai nousta maaperästä kaasuuntumisen ja tuulen mukana (*Sánchez-Lavega, A., Pérez-Hoyos, S. & Hueso, R. 2004*). Myös kaasukehän ja avaruudesta tulevien hiukkasten vuorovaikutuksesta voi syntyä uusia pilvipartikkeleita.

Koska eksoplaneettojen kaasukehän koostumus vaihtelee, kaasukehän kosteus ei välttämättä yksinään viittaa siis veteen. Kaasukehässä muodostuvien pilvien koostumus riippuu siitä, mitä kaasuja kaasukehä sisältää ja missä lämpötilassa mikäkin kaasu päätyy kyllästystilaan. Eksoplaneettojen pilvet voivat koostua useistakin eri aineista ja sijaita useilla korkeuksilla, jolloin kullakin pilvikerroksella on omat ominaisuutensa ja vaikutuksensa kaasukehään (*Helling, C. 2019*). Kuumemmissa kaasukehissä kaasut koostuvat suurelta osin atomeista ja ioneista, mutta pilvien muodostuminen on silti mahdollista, kun taas viileämmissä kaasukehissä esiintyy enemmän molekyylejä ja niistä muodostuvia pilviä, koska molekyyli rakenne pysyy paremmin kasassa.

Perustuen kaasukehien mallinnuksiin sekä oman aurinkokuntamme planeettojen havaintoihin suurin osa planeettojen pilvistä on todennäköisesti laajemmalle kaasukehän kerrokseen leviävää lauttapilveä, mutta myös konvektiosta kehittyviä kumpupilviä voi esiintyä, kuten Maan, Jupiterin ja Saturnuksen kaasukehässä (*Sánchez-Lavega, A., Pérez-Hoyos, S. & Hueso, R. 2004*). Pilvien konvektiivisuus riippuu siitä, mistä ne koostuvat. Minne pilvet muodostuvat, riippuu planeetan kiertoliikkeestä sekä planeetan pinnan ominaisuuksista. Korkeammilla leveyspiireillä synoptisen skaalan sääilmiöillä on suurin vaikutus pilvipeitteen kehittymiseen ja laajuuteen (*Windsor, J.D. et al. 2023*), ainakin planeetoilla, jotka eivät ole vuorovesilukkiutuneita. Oletettavaa on, että maapallon tapaan muidenkin planeettojen pinnalla, maaston korkeuserot voivat johtaa orografisiin pilviin, mutta suuri vaikutus on mahdollisen meren ja mantereiden jakaumalla. Jos mahdollisten merivirtojen ja mantereiden vaikutukset ovat eksoplaneetoilla samankaltaiset kuin maapallolla, voidaan niiden odottaa vaikuttavan siihen, missä päin planeettaa pilviä keskimäärin esiintyisi (*Pallé, E. et al. 2008*), olettaen ettei koko planeetta ole pilvien peitossa. Vaikka vaihtelu pilvisyydessä on tyypillistä kaasukehän kaoottisuuden takia, pilviä esiintyy etenkin kaasukehän viileämmillä alueilla, joilla lämpimät merivirrat tuovat lämpimän pintakerroksen, josta pilville haihtuu käytettäväksi kosteutta. Viileiden merivirtojen vaikutuksen alueella ilma on viileämpää ja voi sisältää vähemmän kosteutta. Pilviä kehittyy viileiden merialueiden yllä etenkin, jos alueen ylle ajautuu lämpimämpää tai kosteampaa ilmaa, joka viileän meren vaikutuksesta jäähtyy ja saavuttaa kastepisteen. Mantereisilla alueilla kauempana suurista vesistöistä pilvisuus jää vähäisemmäksi, sillä

kosteutta on tarjolla vähemmän. Pilvien vähäisyys korostuu etenkin alueilla, jossa kaasukehän kiertoliike tuo kuivia laskuvirtauksia.

2.3.5 Pilvien vaikutus elinkelpoisuuteen

Pilvien vaikutus elinkelpoisuuteen pohjautuu säteilyn kulkuun ja oleellista on se, kuinka paljon pilvet estävät tai päästävät läpi ja välistään lämmittävää tähden säteilyä kaasukehään sekä planeetan pinnalle asti, mutta myös paljonko pilvet päästävät planeetan ulossäteilyä karkaamaan avaruuteen. Pilvipeitteen määrä ja yleinen sedimentaatiotehokkuus määrittävät, kuinka pilvet käyttäytyvät kaasukehässä ja kuinka paljon ne pääsevät vaikuttamaan säteilynkulkuun (Windsor, J.D. et al. 2023). Pienempi määrä tiivistymisytimiä voi johtaa isompiin pilvipartikkeleihin ja erilaiseen vuorovaikutukseen säteilyn kanssa.

Maassa vesipilvistä lyhytaaltosäteilyn kulkua estävät voimakkaimmin lauttamaiset kerrospilvet (Chen, T., Rossow, W.B. & Zhang, Y. 2000). Pitkäaaltosäteilyyn isoin vaikutus on yhtä lailla lauttamaisilla pilvimuodostelmilla, mutta etenkin yläkaasukehän pääosin jääkiteistä muodostuvilla pilvillä. Eksoplaneettojen kaasukehien vaihtelevien koostumuksien takia myös muista aineista koostuvilla pilvillä voi odottaa olevan erilaisia ominaisuuksia ja pilvityypistä riippuvia vaikutuksia säteilyn kulkuun.

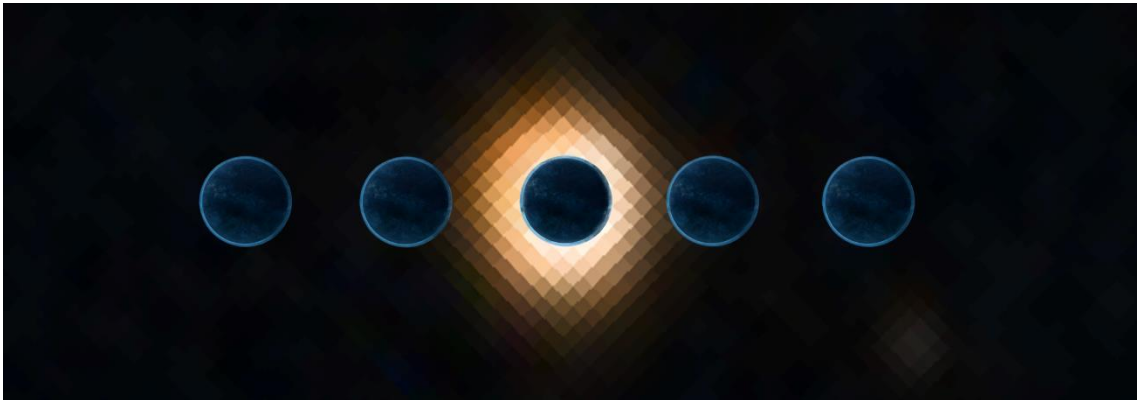
Kaasukehän runsas pilvisyys on tyypillisesti seurausta kaasukehän kosteudesta, ja usein kaasukehä on kostean ilman kasvihuoneilmiön ja kosteuden muodostavien pilvien takaisin säteilyn takia lämmin (Sergeev, D.E. et al. 2022). Pilvet yleisesti ottaen absorboivat säteilyä kaasukehän sisältämiä kaasuja paremmin ja ne säteilevät osan lämmöstä takaisin alas kohti planeetan pintaa, mikä lämmittää kaasukehää pilvien alla (Helling, C. 2019). Pilvet samalla heijastavat tehokkaasti säteilyä, jolloin vähemmän säteilyä pääsee pinnalle asti lämmittämään alakaasukehää. Pilvien kokonaisvaikutus ilmastoon voi täten olla myös viilentävä, kuten maapallolla. Heijastavien pilvien viilentävä vaikutus on oltava suurempi kuin kaasukehän kosteuden ja muiden kasvihuonekaasujen sekä pilvien takaisinsäteilyn tuoma lämmitys, että pilvien kokonaisvaikutus on kaasukehään viilentävä (Windsor, J.D. et al. 2023).

Yksiulotteiset mallinnukset Maan kaltaisten sekä supermaapallojen kaasukehistä viittaavat siihen, että kokonaisvaikutukseltaan kosteus lämmittää kaasukehää enemmän kuin mitä pilvisyys viilentää (Windsor, J.D. et al. 2023). Kun pilvisyys kattaa sedimentaatiotehokkuudesta riippuen puolet tai noin neljäsosan taivaasta, pilvisyyden vaikutus yksinään on jo viilentävä. Kosteuden lämmittävä vaikutus on kuitenkin enimmäkseen suurempi tai vähintään yhtä suuri, minkä takia kostea kaasukehä on todennäköisemmin lämmin, vaikka pilvisyys heijastaisikin ison osan säteilystä. Mallinnusten mukaan kosteuden ja sen tuoman pilvisyyden tuoma kokonaisvaikutus kaasukehään on viilentävä vasta, kun taivas on melko pilvinen tai täysin pilvinen. Viilentävä vaikutus tosin hävinnee mitä tehokkaammin sedimentaatio poistaa kaasukehästä partikkeleita. Toisaalta jokaisen eksoplaneetan kohdalla pilvien eri koostumuksien ominaisuuksista riippuu, kumpi vaikutus, on yksittäisen eksoplaneetan kaasukehän osalta voimakkaampaa. Pääosin kasvavan kosteuden kasvihuonevaikutus voidaan odottaa lisääntyvästä pilvisyydestä huolimatta parantavan tai vähintään

ylläpitävän elinkelpoisen vyöhykkeen viileällä laidalla sijaitsevien eksoplaneettojen elinkelpoisuutta pitämällä kaasukehän pilvien alla riittävän lämpimänä nestemäiselle vedelle.

2.4 Eksoplaneettojen kaasukehän havainnointi

Jotta eksoplaneetan kaasukehän olosuhteita pystytään tutkimaan, on ensin löydettävä itse tarkasteltava eksoplaneetta, jotta sen koostumusta päästään havainnoimaan. Eksoplaneettoja metsästetään maasta ja avaruudesta käsin aina eri säteilyalueiden havainnointiin kehitettyjen instrumenttien sekä tähtien liikkeitä tarkkailevien instrumenttien ja suoraan kuvaamiseen kehitettyjen teleskooppien avulla. Toistaiseksi planeetan läsnäolo tähden ympärillä huomataan usein välillisesti joko planeetan massan vaikutuksista emotähden liikkeeseen tai vaikutuksista havaittavaan säteilyyn (Seager, S. 2010).



Kuva 1: Havainnollistava kuva transitiosta eli eksoplaneetan ylikulusta, jonka aikana planeetta peittää osan tähden säteilystä, mutta osa säteilystä kulkee planeetan kaasukehän läpi. Kuvan taustan lähde: Digitized Sky Survey - STScI/NASA, Colored & Healpixed by CDS (Centre de Données astronomiques de Strasbourg), Aladin Lite Interactive Sky Atlas: DSS Colored Image Layer.

Eksoplaneetan läsnäolosta johtuvasta emotähden liikkeestä, kuten huojunnasta jaetun massakeskipisteen ympäri, saadaan selville tietoa eksoplaneetan massasta ja kiertoradasta, mutta ei suoraa tietoa eksoplaneetan kaasukehästä itsestään. Lähinnä tähden koostumuksesta voidaan päätellä, millaiset ainesosat se on muodostuessaan jakanut planeettakunnan kaasujättiläisten ja niille kehittyvän kaasukehän kanssa. Itse eksoplaneetoista on jopa mahdollista ottaa kuvia, mutta kuvien tarkkuus nyt ja tulevaisuudessa riippuu teleskooppien erotuskyvystä ja kehityksestä. Tosin emotähden ollessa kirkas, sen säteily helposti jättää ympärillä olevat eksoplaneetat pimentoon hyvistä havaintolaitteista huolimatta. Tätä varten tähden säteily on pyrittävä peittämään, jotta ympärillä olevat eksoplaneetat saadaan näkyviin. Tätä varten on kehitetty esimerkiksi tähtivarjostimia (eng. starshade) ja koronagraafeja (eng. coronagraph), joiden avulla suoraan kuvaamisen puitteet parantuvat alinomaa (Seager, S. et al. 2015).

Osassa planeettakuntia eksoplaneettojen kiertorata asettuu suotuisaan tasoon niiden havaitsemisen suhteen niin, että eksoplaneetta voi Kuvan 1 tapaan kulkea havaitsijan ja tähden välistä peittäen tällöin taakseen tähden säteilyä, jolloin tähden havaittu kirkkaus

muuttuu (Seager, S. 2010). Tällaisen ylikulun kestosta saadaan selville tietoja eksoplaneetan kiertoradasta ja koosta. Eksoplaneetan olemassaolon havaitsemisen lisäksi tämä luo asetelman, jossa tähden säteilyä pääsee kulkemaan eksoplaneetan kaasukehän läpi. Tällöin kaasukehästä saadaan tietoa spektroskopian avulla.

2.4.1 Spektroskopia kaasukehän tutkimuksessa

Spektroskopia tutkii säteilyä ja sen sisältämää tietoa, kun säteily hajotetaan spektriiksi. Eksoplaneettaa tutkittaessa esiin nousee kaksi säteilyn huippua: lyhyt- ja pitkäaaltoinen säteily. Lyhyt on peräisin tähdestä. Pitkä on peräisin eksoplaneetasta itsestään. Säteilyn spektristä etsitään spektriviivoja, jotka muodostuvat Kuvan 2 tapaan säteilyn vuorovaikuttaessa kaasukehän kanssa (Seager, S. 2010).



Kuva 2: Tähtestä lähtevään säteilyn spektriin ilmestyy tummia absorptioviivoja, kun säteilyn kulkiessa kaasukehän läpi osa siitä jää kaasukehään. Kaasukehän itsensä säteilemä spektri koostuu sen emittoimien kaasujen muodostamista emissioviivoista. Ei mittakaavassa. Kuvan taustan lähde: Digitized Sky Survey - STScI/NASA, Colored & Healpixed by CDS (Centre de Données astronomiques de Strasbourg), Aladin Lite Interactive Sky Atlas: DSS Colored Image Layer.

Tähden kuumasta kaasusta lähtöisin olevan lyhytaaltosäteilyn kulkiessa tähden pintaa viileämmän kaasukehän läpi, kaasukehän molekyylit ja atomit absorboivat tähden säteilyä ja jättävät säteilyn transmissiospektriin jäljen, absorptioviivan (Tinetti, G., Beaulieu, J.P., Henning, T. 2012). Koska absorptio tapahtuu aina kaasun atomeille ja molekyyleille ominaisella aallonpituudella, se mille aallonpituudelle spektriin ilmestyy absorptioviivoja antaa tietoa, mitä kaasuja kaasukehä sisältää. Absorptioviivojen syvyys puolestaan kertoo, mikä on paikallinen skaalakorkeus, joka taas on lämpötilasta riippuvainen (Brande, J. et al. 2024; Kempton, E.M.-R., Lupu, R. E., Owusu-Asare, A., Slough, P., & Cale, B. 2017). Transmissiospektriin välittyvän Rayleigh'n sironnan merkkien hyödyllisyydestä ollaan eri mieltä, voisiko sitä käyttää kaasukehän paineen määrittämiseen (Arney, G. et al. 2016; Benneke, B. & Seager, S. 2012). Jos kaasukehässä on kaasuja, jotka absorboivat vain vähän tai ei lähes ollenkaan, Rayleigh'n sironta muodostaa spektriin sille ominaisen piirteen. Kun sironta kasvaa aallonpituuden lyhentyessä, spektriin piiryy kasvavan ekstinktion käyrä. Käyrän kaltevuus kuvaa, kuinka voimakkaasti säteily vaimenee aallonpituuden lyhentyessä. Koska Rayleigh'n sironta riippuu skaalakorkeudesta, käyrän kaltevuuden mukaan voisi määrittellä kaasukehässä vallitsevan paineen. Hiilivetyutua sisältävissä kaasukehissä määrittelyn ei

ole todettu olevan mahdollista, sillä absorptio vaikuttaisi samoilla aallonpituuksilla, jolloin sironnan merkki spektrissä ei olisi yhtä selvästi tunnistettavissa.

Havaintoja voidaan tehdä kaasukehän läpi kulkeneen säteilyn lisäksi heijastuneen lyhytaaltoisen säteilyn spektristä tai kaasukehän emittoimasta pitkäaaltoisesta säteilystä (Line, M., Quanz, S.P., Schwieterman, E.W. et al. 2019), suuntaamalla havaintolaitteet eksoplaneetan suuntaan. Parhaiten havaintoja saadaan, jos eksoplaneetta kiertää kauempana tähdestään ja on täten erotettavissa erillään tähdestä (Brande, J. et al. 2024). Kun tähden säteily peitetään, voidaan havainnoida pelkän eksoplaneetan säteilyä ja pyrkiä saamaan suoria havaintoja eksoplaneetan kaasukehästä. Kun tähden säteilyä absorboineet atomit ja molekyylit lopulta vapauttavat energiansa, ne emittoivat säteilyä itselleen ominaisella aallonpituudella, mikä näkyy spektrissä emissioviivana. Tietoa saadaan etenkin keski-infrapun alueelta, koska se on aallonpituusalue, jolla useat tärkeimmät molekyylit ovat havaittavissa. Emittoituun säteilyyn jää myös herkemmin merkkejä kaasukehän eri kerroksista, sillä kaasukehän pystysuuntaiset lämpötilagradientit vaikuttavat säteilyn kulkuun (Kempton, E.M.-R., Lupu, R. E., Owusu-Asare, A., Slough, P., & Cale, B. 2017).

Kaasukehän heijastamaa sekä emittoimaa säteilyä voidaan myös tarkastella ilman tähden säteilyn peittämistä, jolloin tähden ja eksoplaneetan säteilyä voidaan tarkastella yhtenä säteilyn lähteenä (Seager, S. 2010), kun eksoplaneetta on siirtymässä tähden taakse. Tilanteessa, jossa tähti peittää eksoplaneetan taakseen, käytetään nimeä sekundäärinen pimennys. Kun tiedetään tähden jatkuva spektri sen mustan kappaleen säteilyalueelta, se voidaan poistaa havaitusta säteilystä, jäljelle jäävä osuus on eksoplaneetasta peräisin olevaa säteilyä. Ennen kuin eksoplaneetta siirtyy tähden taakse, saadaan havaintoja tehtyä planeetan kaasukehän päiväpuolelta. Esimerkiksi JWST:n infrapuna-alueella tekemillä havainnoilla on pyritty selvittämään päiväpuolen lämpötilaa ja kaasukehän olemassaoloa sekä paksuutta (Ih, J. et al. 2023).

2.4.2 Pilvien vaikutus havainnointiin

On tärkeä ymmärtää pilvien käytöstä kaasukehässä, että niiden vaikutukset osataan yhdistää merkkeihin, joita ne spektriin muodostavat. Pilvet estävät sekä tähdestä peräisin olevan säteilyn että planeetan pinnalta lähtevän säteilyn kulkua kaasukehässä, mikä vaikuttaa eksoplaneetan havaittuun säteilyn spektriin (Crossfield, I.J. 2015). Vaikutus säteilyyn riippuu pilvien heijastavuudesta eli albedosta, kyvystä ulossäteillä absorboimaansa säteilyä eli emissiivisyydestä ja optisesta paksuudesta, jonka määrittää pilven paksuus, pilvipartikkeleiden määrä sekä kokojakauma (American Meteorological Society; Rose, B.E.J. 2022). Säteilyn kulkua tarkasteltaessa on myös huomioitava eri pilvityypit, sillä niiden kattavuuden erot vertikaalisessa ja horisontaalisessa tasossa sekä erot tiheydessä vaikuttavat myös siihen, kuinka paljon säteilyä pääsee kulkemaan niiden välistä ja läpi (Chen, T., Rossow, W.B. & Zhang, Y. 2000). Vaikutukset vaihtelevat myös säteilyn aallonpituuden mukaan. Pilvien ja utujen (eng. haze) sironnan merkkejä etsitään näkyvältä aallonpituudelta ja merkkejä tiivistymisestä spektrin infrapun alueelta (Pinhas, A. & Madhusudhan, N. 2017). Sironnan näkyvän valon spektrissä kaltevasti kasvava säteilyn himmenemisen merkki aallonpituuden lyhentyessä ja sen tasaisuus riippuvat pilven koostumuksesta. Voimakas kaltevuus voi olla merkki sulfidipilvistä.

Yleisesti ottaen pilvet vaimentavat säteilyä ja tasoittavat kaasukehän havaittua spektriä (Brande, J. et al. 2024). Toisaalta myös utujen ja kaasukehän metallisuuden vaikutukset ovat samankaltaiset.

Koska pilvet voivat heikentää säteilyä optisesta paksuudesta riippuen isonkin osan, pilvien absorboima ja pois heijastama osa säteilystä ei näy osana eksoplaneetasta tehtyjä havaintoja (Crossfield, I.J. 2015; Helling, C. 2019). Tällöin pilvipeitteeseen pysähtyneen säteilyn sisältämä tieto ei välity spektriin, joka lopulta päästään havaitsemaan. Kaasukehän läpi kulkeneeseen säteilyyn jääneitä absorptio- ja emissiomerkkejä voi jäädä havaitsematta ja tällöin pilvien varjoon jäädä tietoa kaasukehän sisältämistä molekyyleistä ja atomeista sekä kaasukehän ominaisuuksista. Pilvien estäessä alemman kaasukehän havainnoinnin, tietoa saadaan vain pilvien yläpuolisesta kaasukehästä. Paksu pilvikate eksoplaneetalla voi estää tarkasteltavan säteilyn kulkua kaasukehän läpi jopa niin paljon, että havaittavaan säteilyn spektriin ei välity ollenkaan absorption merkkejä ainakaan osasta kaasukehän sisältämistä atomeista tai molekyyleistä tai merkit spektrissä ovat hyvin vaimeat (Brande, J. et al. 2024). Tosin spektri ilman merkkejä absorptiosta voi kieliä myös täysin kaasukehättömästä eksoplaneetasta.

2.5 Eksoplaneettojen kaasukehämallinnus

Kaasukehä on kaasujen mutta myös vesi- ja jääpartikkeleiden kolmiulotteinen kokonaisuus, jonka tila kehittyy ajan myötä. Kaasukehää voidaan mallintaa kolmessa ulottuvuudessa, mikä kattaa tarkastelun horisontaalisesti pinnan suuntaisesti sekä pystysuuntaisesti. Toisinaan myös yksiulotteinen tarkastelu riittää tarjoamaan tietoa kaasukehästä. Yksiulotteisessa mallinnuksessa yhtenä tulosten visualisointitapana on valita pystyakselille vertikaaliseksi ulottuvuudeksi paine ja vaaka-akselille tarkasteltava muuttuja, kuten lämpötila.

Ilmastomallit ratkovat kaasukehän fysiikkaa ja kemiaa, jonka mukaan lasketaan lyhytaaltosäteilyn ja pitkäaaltosäteilyn kulkua kaasukehän läpi (Windsor, J.D. et al. 2023). Säteilyn kulkuun vaikuttavat kaasujen eri määrät sekä kaasukohtainen absorptio ja sironnan voimakkuus. Yksiulotteisessa mallissa keskitytään yksityiskohtaisemmin säteilyn kulkuun, mutta kolmiulotteisissa malleissa voidaan laskea myös ilman horisontaalisia liikkeitä. Molempien tarkoituksena on kuitenkin löytää ratkaisu, millainen kaasukehä muodostuu millaisellakin säteilyn määrällä ja kemiallisella koostumuksella. Ratkaisu on usein kaasukehän lämpötilajakauma, joka pohjautuu lämmön jakautumiseen kaasukehässä johtumisen, säteilyn ja advektion seurauksena. Elinkelpoisuutta määriteltäessä voidaan täten tarkastella pinnan läheisyyteen kehittyvää lämpötilaa.

2.5.1 Pilvet mallinnuksissa

Realistisemman kuvan saamiseksi ja mahdollisten virhelähteiden ymmärtämiseksi kaasukehä- ja spektrimalleihissa käytetään erilaisia tapoja simuloida pilvien vaikutusta. Yksinkertaisimmillaan pilviä voidaan kuvata malleissa muutamalla tarkkaan valitulla parametrilla, jotka kuvaavat pilvien kokonaisvaikutusta säteilyyn (Windsor, J.D. et al. 2023). Toisessa ääripäässä ovat mikrofysikaaliset mallit, joissa pilviä mallinnetaan aerosolitasolla. Aerosolien ominaisuuksien ja jakauman perusteella pyritään esittämään

mahdollisimman yksityiskohtaisesti aerosolien keskinäistä vuorovaikutusta ja vaikutuksia ympäristön kanssa. Näiden kahden ääripään väliin mahtuu monia pilvien mallinnustapoja, jotka tasapainottelevat laskentatehon ja parametrisaation välillä. Pilvet ja utu voivat olla osana malleja kappaleena tai tasona, joka emittoi harmaan kappaleen tapaan tai jonka läpinäkyvyys säteilylle kasvaa liukuvasti eri aallonpituuden alueella (Kempton, E.M.-R., Lupu, R. E., Owusu-Asare, A., Slough, P., & Cale, B. 2017). Tarkoituksena on asettaa kaasukehään optisesti paksu kappale, joka jäljittelee kaasukehässä olevan pilven tapaa pysäyttää tai hidastaa säteilyn kulkua. Yksi tapa on myös lisätä mukaan pilvien vaikutus albedoon, jolloin pilvien heijastava vaikutus saadaan huomioitua (VirtualPlanetaryLaboratory). Säteilyn kulkuun voidaan vaikuttaa myös muokkaamalla malleissa säteilyn sironnan määrää (Kempton, E.M.-R. et al. 2017). Sironnan avulla voidaan tarkastella pienten pilvipisaroiden tai utujen vaikutusta säteilyyn eri aallonpituuksilla. Koska pilvien ominaisuudet vaihtelevat sen mukaan, mistä ne koostuvat, myös pilvien muodostumisolosuhteita ja partikkeleiden kokojakaumaa tarkastelemalla saadaan mallien käyttöön partikkelikohtaisempaa tietoa pilvien kemiasta, jolla voidaan täydentää säteilyn kulun mallinnuksia (Helling, C. 2019).

3 Aineisto

Työn tavoitteena oli selvittää pilvien vaikutusta eksoplaneettojen kaasukehään ja sen havainnointiin, joten tätä tutkimusta varten mallinnettavia eksoplaneettoja etsittiin NASAn eksoplaneettojen arkistosta (<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>). Arkistoa ylläpitää Caltech yhdessä NASAn kanssa, mikä on sovittu eksoplaneettojen tutkimusohjelman puitteissa. Tutkittavan eksoplaneetan etsintä keskittyi kohteisiin, joiden teoreettisen tasapainolämpötilan on arvioitu olevan 250 K ja 400 K välillä. Lämpötilahaarukka valittiin sillä perusteella, että se sisälsi veden esiintymistä mahdollistavat lämpöolot eli elinkelpoisten lämpöolojen alueen, 273.15 – 373.15 K, sekä vapaasti valitun raja-alueen sen ympäristössä. Lisäksi huomioitiin vain ne eksoplaneetat, joiden massa oli enintään kymmenkertainen Maahan verrattuna, mikä rajaa mukaan seuraavat luokat: alimaapallot, Maankaltaiset, supermaapallot sekä alineptunukset. Lisäehtona haussa oli, että planeetasta olisi tehty vähintään yksi transmissiospektrin havainto. Näin voitiin odottaa, että kaasukehähavaintoja ja spektristä tehtyjä arvioita kaasukehän koostumuksesta olisi löydettävissä. Emotähden tyyppille ei asetettu kriteerejä, mutta tarkasteluun valittiin vain yhtä tähteä kiertävät eksoplaneetat, jotta kaasukehän mallintaminen pysyisi suoraviivaisempana

Rajauksen jälkeen vaihtoehtoja jäi jäljelle yli 5500 eksoplaneetasta enää 13 kappaletta: Kepler-61 b, Kepler-22 b, K2-18b, K2-3 d, Kepler-32 d, Kepler-236 c, Kepler-249 d, Kepler-138 d, K2-3 c, Kepler-51 d, Kepler-26 c, TOI-270 d, Kepler-205 c. Näistä eksoplaneetoista spektrihaavaintoja oli tutkimuksen aikaan tehty ainakin K2-18b:n kaasukehästä, ja näiden pohjalta arvioita sen kaasukehän koostumuksesta, minkä vuoksi K2-18b valikoitui tämän tutkimuksen kohteeksi.

3.1 Esimerkkieksoplaneetta K2-18b

K2-18b on pidennetyn Kepler-ohjelman, K2:n, aikana ylikulkumenetelmällä havaittu eksoplaneetta (*Montet, B.T. et al. 2015*). Sen kiertoaika M2.8V-tyypin kääpiötähden, K2-18, ympäri on noin 33 päivää. Vaikka K2-18b kiertää tähteänsä noin 0.16 astronomisen yksikön (AU) etäisyydellä eli huomattavasti lähempänä kuin Maa ja jopa lähempänä kuin Merkurius kiertää Aurinkoa, K2-18b:n vastaanottama säteilyn vuontiheys on lähellä Maan kokeman säteilyn tehon arvoa. Maankaltaisten säteilyolosuhteiden sijaitseminen lähempänä emotähteä on seurausta siitä, että K2-18:n spektriluokan kaltaiset tähdet ovat Aurinkoa efektiiviseltä lämpötilaltaan viileämpiä ja massaltaan pienempiä, jolloin niiden kirkkaus ulossäteily on heikompaa (*Benneke, B. et al. 2019*).

Kokonsa puolesta K2-18b on maata kookkaampi. Eksoplaneetan säde on yli kaksinkertainen Maan säteeseen verrattuna ja myös suuremman massan seurauksena painovoima pinnalla on suurempi. Koska K2-18b on Maata isompi muttei ole massaltaan kymmenkertainen tai massiivisempi, tämä eksoplaneetta on mahdollista luokitella joko supermaapalloksi tai alineptunukseksi. Kumpaan luokkaan K2-18b kuuluu, riippuu lopulta eksoplaneetan pinnan ja kaasukehän tyypistä. Mahdollisena kiviplaneettana K2-18b kuuluisi supermaapalloluokkaan, mutta viimeisimpien tutkimusten valossa K2-18b on Hycean-planeetta eli sillä arvioidaan olevan runsas H₂ -kaasukehä ja meren peittämä pinta (*Madhusudhan, N. et al. 2023*). Epäily todennäköisestä merestä pinnalla ja

päätelmät vetyrikkaasta kaasukehästä ovat johtaneet siihen, että K2-18b:hen viitataan koostumuksensa puolesta alineptunuksena.

3.2 Parametrien keräys

K2-18b:n planetaaristen ominaisuuksien arvoja koottiin (Benneke, B. et al. 2019; EXOkyoto, IPAC) Taulukkoon 1. Tutkimusta varten tarvittiin tietoja eksoplaneetalla vallitsevasta painovoimasta g , eksoplaneetan kokema säteilyvakio S , eksoplaneetan säde R , eksoplaneetan albedo A , sekä emotähden säde R_{K2-18} . Näistä tiedoista luotiin pohja kaasukehän ja spektrin mallinnuksille. Mallinnuksia varten K2-18b:n kaasukehän koostumuksessa käytettiin K2- ja Spitzer-havaintojen mukaista veden määrää ja SCARLET-mallinnuksen tasapainotilan koostumusarvioita (Benneke, B. et al. 2019). Veden havaintoihin pohjautuvaa mallinnusta hiilidioksidin, metaanin, ammoniakkin, hiilimonoksidin ja typen määrästä käytettiin tämän työn malliajoissa kaasukehän koostumuksen lähtötilana. Mallinnoissa käytetyt sekoitussuhteet on esitetty Taulukossa 2. Jotta eri vesisisältöjen vaikutusta voitiin vertailla, mallinnoissa varten otettiin huomioon myös JWST:n tekemä havainto veden 0,062 % sekoitussuhteen määrästä (Madhusudhan, N. et al. 2023). Lisäksi kokeiltiin, millaiset ovat veden 20,0 % sekoitussuhteen vaikutukset.

Taulukko 1 Eksoplaneetan kaasukehämallinnuksessa käytetyt planetaariset parametrit

Parametri	Arvo	Yksikkö	Lähde
g	1564.70685	cm/s^2	(EXOkyoto)
S	1368	W/m^2	(Benneke, B. et al. 2019)
R	16628.31*	km	(Benneke, B. et al. 2019)
A	0.3	-	(Benneke, B. et al. 2019)
R_{K2-18}	309238.65**	km	(Benneke, B. et al. 2019)

* 2.61-kertainen säde Maahan nähden

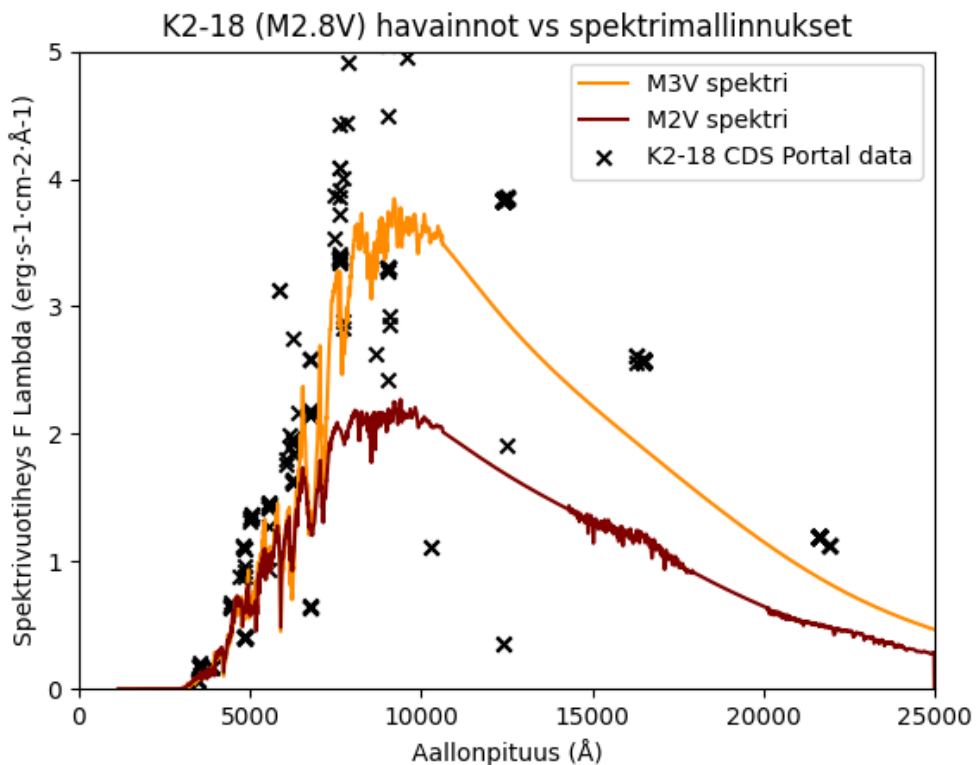
** 0.4445-kertainen Aurinkoon nähden

Taulukko 2 Kaasukehän mallinnoissa käytetyt sekoitussuhteet

Molekyyli	H_2O	CO_2	CH_4	NH_3	CO	N_2
Sekoitussuhde	0.033 % – 8.9 %	2.4 %	0.248 %	13.5 %	7.45 %	10.9 %

3.3 Tähden säteilydatan valinta

Kaasukehän ja säteilyn vuorovaikutuksen tutkimusta varten etsittiin säteilyn spektri, joka noudatti mahdollisimman paljon CDS-Portaalissa esitettyä K2-18-tähden havaintodataa. Eri säteilyn spektrejä oli löydettävissä ESON (European Southern Observatory) tähtispektrikirjastosta. Mallinnukseen tarvittava tähden säteilyn spektri valikoitiin vertailemalla M2V- ja M3V-tyyppisten tähtien spektrejä Kuvassa 3. Nämä kaksi tähtityyppiä ovat ominaisuuksiltaan lähimpänä K2-18-tähteä, joka on tyyppiluokituksestaan M2.8V. Kahdesta mallispektristä M3V-spektri vaikutti silmämääräisesti olevan lähempänä K2-18:sta tehtyjä havaintoja, joten M3V-spektrin katsottiin olevan edustavampi, ja se valikoitui kaasukehämallinnuksissa käytettävän tähden spektriä.



Kuva 3: CDS-Portaalista ladattavissa oleva K2-18 tähden havaintodata (rasteina) verrattuna ESON mallispektreihin (M2V tumman punaisella ja M3V keltaisella yhtenäisellä viivalla). Sekä havaintojen ja mallinnusten spektrivuot on esitetty Ångströmeinä annetun aallonpituuden funktiona. 1Å vastaa 0.0001 mikronia.

4 Menetelmät

Tässä tutkimuksessa selvitettiin pilvien muodostumistasoja mallintamalla eksoplaneetta K2-18b:n kaasukehän 1D-rakennetta ja tarkastelemalla vesihöyryn määrän vaikutusta siihen. Tällä tavoin pystyttiin tutkimaan vesihöyryn määrän muutosten vaikutusta pilvien esiintymiskorkeuteen sekä pilvisyyden tuomia eroavaisuuksiin spektrissä. Spektrin muutoksia tarkastelemalla pyrittiin selvittämään, kuinka mahdolliset pilvet vaikuttavat spektrin pohjalta tehtyyn arvioon eksoplaneetan kaasukehän lämpöolosuhteista ja koostumuksesta. Lämpöoloja tarkastelemalla eksoplaneetan elinkelpoisuutta päästiin tutkimaan eri vesihöyryn määrillä.

4.1 Atmos ja P-T-profiili

Lämpötilan pystyjakauman selvittämiseen tutkimuksessa käytettiin Atmos-mallia (<https://github.com/VirtualPlanetaryLaboratory/atmos>). Atmos itsessään koostuu kahdesta mallista. Ilmastomalli, CLIMA, ratkoo annetuista lähtöarvoista ja koostumuksesta kaasukehän lämpötilan pystyjakaumaa. Valokemiallinen malli, PHOTOCHEM, ratkoo kaasukehän kemiallisen koostumuksen pystyjakaumaa (*VirtualPlanetaryLaboratory*). Kun näitä toistensa tilasta riippuvia malleja ajetaan rinnakkain, ne pyrkivät ajautumaan ratkaisuun, jossa malliajojen tuloksena syntyy tasapainotilaa lähestyvä kaasukehä.

Atmos tarjoaa Auringon lisäksi muutaman tähden listan, josta on mahdollista valita erilaisia ominaisuuksia omaavia tähtiä säteilyn lähteenä käytettäväksi. Tähden valinta on tärkeä osa mallinnusta, sillä tähden ominaisuuksilla on vaikutusta eksoplaneetan kokemaan säteilyyn ja kaasukehässä kehittyviin olosuhteisiin. Jotta K2-18b:n kaasukehästä saatiin mahdollisimman tarkka mallinnus, tässä tutkimuksessa Atmosiin lisättiin käytettäväksi säteilyksi Kuvassa 3 nähtävä, K2-18-tähden säteilyä mukaileva M3V-säteilyspektrinvuomallinnus.

Tässä tutkimuksessa Atmosia käytettiin työkaluna selvittämään kaasukehän P-T-profiili K2-18b:lle. Eksoplaneetan arvioitu efektiivinen lämpötila ja koko lukeutuvat Atmosin CLIMA-mallin ilmoittaman, luotettavan suorituskyvyn piiriin. Suorituskyvyn on katsottu kattavan elinkelpoisella vyöhykkeellä olevien planeettojen kaasukehät. Mallin laskelmien pohjatiedoiksi asetettiin havaintojen pohjalta arvioidut kaasukehän kaasujen sekoitussuhteet Taulukon 2 mukaisesti, sekä planeetan koko, pintapainovoima ja säteilyn parametrit Taulukon 1 mukaisesti. CLIMA:ssa säteilyä absorboivina kaasuina toimivat otsoni O_3 , hiilidioksidi CO_2 , vesi H_2O , happi O_2 , metaani CH_4 ja etaani C_2H_6 (Arney, G. et al. 2016). Kun kaasukehän koostumus asetettiin valokemialliselle mallille, valittiin kaasukehän alarajalla esiintyvien kaasujen määrän käsittelyyn vaihtoehto “FIXEDMR” eli muuttumaton sekoitussuhde. Mallissa oli ylärajalle tarjolla vastaava vaihtoehto, mutta sen osalta oli ilmoitettu, ettei kyseistä ominaisuutta ole käytetty tai testattu. Kaasukehän ylärajalle valittiin täten vaihtoehto “CONSTANT EFFUSION VELOCITY”. Vakio effuusionopeus on mallin määrittelemä tasainen nopeus, jolla kaasukehän ylärajalla kaasut karkaavat avaruuteen.

Atmos on koodattu ratkaisemaan molekyyliden esiintyminen kaasumaisessa muodossa sekä aerosolimuodossa (*VirtualPlanetaryLaboratory*). Siinä missä PHOTOCHEM laskee kaasujen ja aerosolien jakauman, CLIMA ratkaisee kaasujen tiivistymisen. Tiivistyviä kaasuja ovat vesi H_2O ja hiilidioksidi CO_2 . CLIMA ottaa huomioon konvektion ja pilvien syntymisen sekä siitä vapautuvan latentin lämmön laskeessaan kaasukehän lämpötilaprofiilin muotoa (Arney, G. et al. 2016). Pilvet on puolestaan huomioitu osana planeetan albedoa. Pilvien heijastavuuden vaikutus pintalämpötilaan tulisi taten olla huomioitu ja nähtävissä jo suoraan Atmos-mallin ratkaisuisissa. Kuten Arney, G. et al. 2016 mainitsevat, Atmos ei kuitenkaan ota huomioon kaasukehän kiertoliikettä, sateen muodostumista ja pilvien aiheuttamaa sirontaa tai absorptiota. Pilvet eivät mallissa lämmitä kaasukehää takaisinsäteilyn avulla.

Atmosin asetuksissa valittiin kaasukehämalli kuitenkin huomioimaan mahdollinen utu ja sen vaikutus säteilyn kulkuun, mahdollisen jään lisäämä heijastavuus sekä metaanin ja otsonin vaikutukset. Iteraatioissa eli mallin askeleissa kokeiltiin erilaisia lukumääriä, jotta löydettiin arvot, joilla vuorottelu ilmastomallin ja valokemiallisen mallin välillä pysyi vakaana. Kun arvot löydettiin, mallinnuksen oli mahdollista edetä kohti tasapainotilaa eikä kumpikaan malleista kaatunut siihen, että kaasukehän ratkaisu johti epätasapainoon karkaavaan kuumentumis- tai kylmentymiskiarteeseen.

4.2 Pilvien esiintymistason määrittäminen

Pilvien esiintymistaso selvitetään yhdistämällä Atmosista saatua P-T-profiiliin tiivistyvien kaasujen kondensaatiokäyrä, joka ratkaistiin Clausius–Clapeyronin yhtälön yleisestä muodosta

$$\ln(P_v) = \ln(C) + \frac{1}{R_v} \left[-\frac{L_0}{T} + \Delta\alpha \ln T + \frac{\Delta\beta}{2} T + O(T^2) \right] \quad (1)$$

jossa P_v on kylläisen kaasun paine, C on molekyylikohtainen vakio, R_v molekyylikohtainen kaasuvakio, L_0 molekyylikohtainen integraatiovakio faasimuutoksen latenttilämmölle, T on lämpötila ja $\Delta\alpha$ sekä $\Delta\beta$ empiirisesti määriteltujen vakioiden muutos faasimuutoksessa (Sánchez-Lavega, A., Pérez-Hoyos, S. & Hueso, R. 2004). Kun yhtälöstä selvitetään kylläisen kaasun paine lämpötilan suhteen, saatava yhtälö on kaasun kyllästyspaineen yhtälö.

$$P_v = e^{\left(\ln(C) + \frac{1}{R_v} \left[-\frac{L_0}{T} + \Delta\alpha \ln T + \frac{\Delta\beta}{2} T + O(T^2) \right] \right)} \quad (2)$$

Kun kaasun osapaine P_p , joka riippuu ympäröivästä paineesta P ja tarkasteltavan kaasun molaarisesta sekoitussuhteesta X_C , sama kuin kaasun tilavuuden sekoitussuhde, on yhtä suuri tai suurempi kuin kyllästyspaine, kosteus voi tiivistyä nestemäiseen muotoon tai kylmässä lämpötilassa härmistyä suoraan kiinteään muotoon.

$$P_p = X_C P(T) \geq P_v(T) \quad (3)$$

Koska tutkimme tasoa, jolla pilvien muodostuminen teoriassa alkaisi, riittää yhtälöstä ratkaista tila, jossa kyllästymispaine ja sekoitussuhteesta sekä ympäröivästä paineesta riippuva kaasun osapaine ovat yhtä suuret.

$$X_C P(T) = P_v(T) \quad (4)$$

Tarkastelemalla painetta vallitsevan lämpötilan funktiona,

$$P(T) = \frac{1}{X_C} P_v(T) \quad (5)$$

saadaan yhtälöt 2 ja 5 yhdistämällä ratkaistavaksi tarkasteltavan kaasun kastepisteen käyrän yhtälöksi

$$P(T) = \frac{1}{X_C} e^{\left(\ln(C) + \frac{1}{R_v} \left[-\frac{L_0}{T} + \Delta\alpha \ln T + \frac{\Delta\beta}{2} T + O(T^2) \right] \right)} \quad (6)$$

Laskutoimitusta varten yhtälössä käytettiin vakioille L_0 , $\Delta\alpha$, $\frac{\Delta\beta}{2}$ ja $\ln(C)$ molekyylikohtaisia (Sánchez-Lavega, A., Pérez-Hoyos, S. & Hueso, R. 2004) arvoja sekä kaasuvakioita R_v (The Engineering ToolBox, 2004), jotka on koottu Taulukkoon 3. Mallinnuksessa käytössä oleille eri molekyyleille käytettiin niiden sekoitussuhteita X_C Taulukosta 2. Veden osalta mallinnuksissa käytettiin erilaisia sekoitussuhteita. Malli ajettiin sekä Taulukon 2 mukaisilla arvoilla että JWST:n havaitseman veden arvolla. Lisäksi malli ajettiin kokeellisella 20,0 % vedensekoitussuhteella, jotta runsaamman vesihöyryn määrän vaikutuksia voitiin tarkastella.

Taulukko 3 Kastepistepaineen käyrän yhtälön molekyylikohtaisia vakioita

Molekyyli [yksikkö]	[baari $\ln(C)$]	[$J g^{-1} L_0$]	[$J g^{-1} K^{-1} \Delta\alpha$]	[$J g^{-1} K^{-2} \frac{\Delta\beta}{2}$]	[$J g^{-1} K^{-1} R_v$]
H ₂ O	25.096	3148.2		-8.7×10^{-3}	0.4615
CO ₂	26.100	639.6		-1.7×10^{-3}	0.1889
CH ₄	1.627	553.1	1.002	-4.1×10^{-3}	0.5183
NH ₃	27.863	2016	-0.888		0.4882

Pilvien katsottiin olevan mahdollisia tasolla, jolla lämpötilaprofiilin käyrä ja kastepistekäyrä risteävät eli lämpötilasta riippuva kylläisen höyryn paine sekä ympäristön paine asettuivat tasapainoon toisiinsa nähden. Tällä tasolla ilman on mahdollista viilentyä ja saavuttaa kyllästystila, jolloin tiivistyminen muodostaa pilvipisaroita tai riittävän kylmässä jäätyminen tai härmistyminen muodostaa jääkiteitä.

4.3 Exo-Transmit ja spektrin mallinnus

Kaasukehän ja sen pilvien vaikutusta transmissiospektriin tutkittiin Exo-Transmit-mallilla (https://github.com/elizakempton/Exo_Transmit). Exo-Transmit on malli, joka laskee planeetalle määritellyn kaasukehän lämpötilan, paineen ja koostumuksen pystyjakauman pohjalta transmissiospektrin, jonka annetun kaasukehän läpi kulkeva säteily muodostaisi (Kempton, E.M.-R. et al. 2017). Malli ottaa huomioon eksoplaneetan

koon suhteessa sen emotähden kokoon ilmoitetun säteen perusteella. Tämän tutkimuksen mallinnuksissa planeetan säteelle R ja tähden säteelle R_{K2-18} käytettiin Taulukossa 1 ilmoitettuja arvoja. Mallin antamassa spektrin ratkaisussa on huomioitu eksoplaneetan itsensä ja sen kaasukehän absorboiman ja sironnan aiheuttama säteilyn himmeneminen. Himmeneminen on ilmoitettu aallonpituuden funktiona ylikulun syvyytenä prosenteissa, mikä tarkoittaa säteilyn määrää, jonka kulun eksoplaneetta ja sen kaasukehä estivät.

Kaasukehän läpikulkevan säteilyn ekstinktiossa eli himmenemisessä on otettu huomioon atomien, molekyylien ja niiden törmäyksistä aiheutuma absorptio sekä Rayleigh'n sironta (Kempton, E.M.-R., Lupu, R. E., Owusu-Asare, A., Slough, P., & Cale, B. 2017). Absorptio on huomioitu optisen paksuuden laskelmissa ja sironta on huomioitu erikseen läpinäkyvyyden lähteenä, joka riippuu siroavien kaasujen määrästä kaasukehässä. Mallinnuksissa sironnalle käytetty kerroin oli yksi, ja sironta on esitetty tuloksissa osana transmissiospektriä. Erillisissä, pelkän absorption määrän laskuissa käytettiin transmissiospektrin mallinnusta ilman sirontaa valitsemalla kertoimeksi nolla. Mallin tuloksena antama spektri kattoi säteilyn alueen 0.2997692 mikronista, eli mikrometristä, 30.00029 mikroniin. Annettu aallonpituusalue ulottuu täten ultravioletin ja näkyvän valon alueelta, lähi-infrapun ja keski-infrapun alueelle. Tutkimuksessa käytettiin Exo-Transmitin mahdollisuutta mallintaa säteilyspektri sekä pilvettömän että pilvellisen kaasukehän lävitse, jotta eri vesihöyryn sekoitussuhteiden ja mahdollisten pilvien vaikutuksia kaasukehän spektrihavaintoihin päästiin tarkastelemaan. Pilvet käsitellään mallissa optisesti paksuna kerroksena, harmaan kappaleen pintana.

Exo-Transmit tarvitsee toimiakseen tiedon kaasukehän lämpötilasta paineen suhteen sekä kaasukehän koostumuksen pystysuunnassa. Tätä varten eri vesihöyryn määrillä Atmosilla mallinnetuista P-T-profiileista valittiin keskimääräistä ratkaisua edustavin malliajo. Keskiarvoisen profiilin sijaan valittiin yksittäinen malliajo, että Exo-Transmitin käyttöä varten pystyttiin käyttämään Atmosin ratkaisuja kaasukehän koostumuksesta, jotka ovat malliajokohtaisia. Lisäksi huomioon otettiin malliajokohtaisesti Clausius–Clapeyronin yhtälön avulla selvitetty pilvitasot. Näin huomioitavien pilvitasojen sijainti kaasukehässä vastaisi malliajokohtaisia olosuhteita pilvien muodostumisen suhteen. Edustavat P-T-profiilit eri vesihöyryn määriille valittiin niistä mallinnoista, joissa pilvien muodostuminen katsottiin mahdolliseksi sekä keskimäärin että malliajokohtaisesti. Profiilit valittiin myös samalta malliajokierrokselta jokaisen mallin osalta, jotta eri vesihöyryn määrillä mallinnetut profiilit olisivat keskenään mahdollisimman vertailukelpoisia.

Kaasukehän koostumusprofiilit lisättiin Exo-Transmit-mallin EOS-tiedostoiksi (Equation Of State), joiden perusteella mallin oli mahdollista ratkoa eri molekyylien absorptiota kaasukehän eri painetasoilla mallissa valmiina olevien molekyylien opasiteettiarvojen mukaan (Freedman, R.S., Lustig-Yaeger, J., Fortney, J. J., et al. 2014; Freedman, R.S., Marley, M.S. & Lodders, K. 2008; Lupu, R.E., Zahnle, K., Marley, M. S., et al. 2014). P-T-profiilit lisättiin niille osoitettuun "T_P"-kansioon. Pilvikerroksen korkeus ilmoitettiin erillisenä syötteenä, joka kertoi mallille painetason, jolla säteilyn kulkuun vaikuttavia ja laskelmissa huomioitavia pilviä esiintyisi.

4.3.1 Spektrin absorptiosormenjälkien analyysin menetelmät

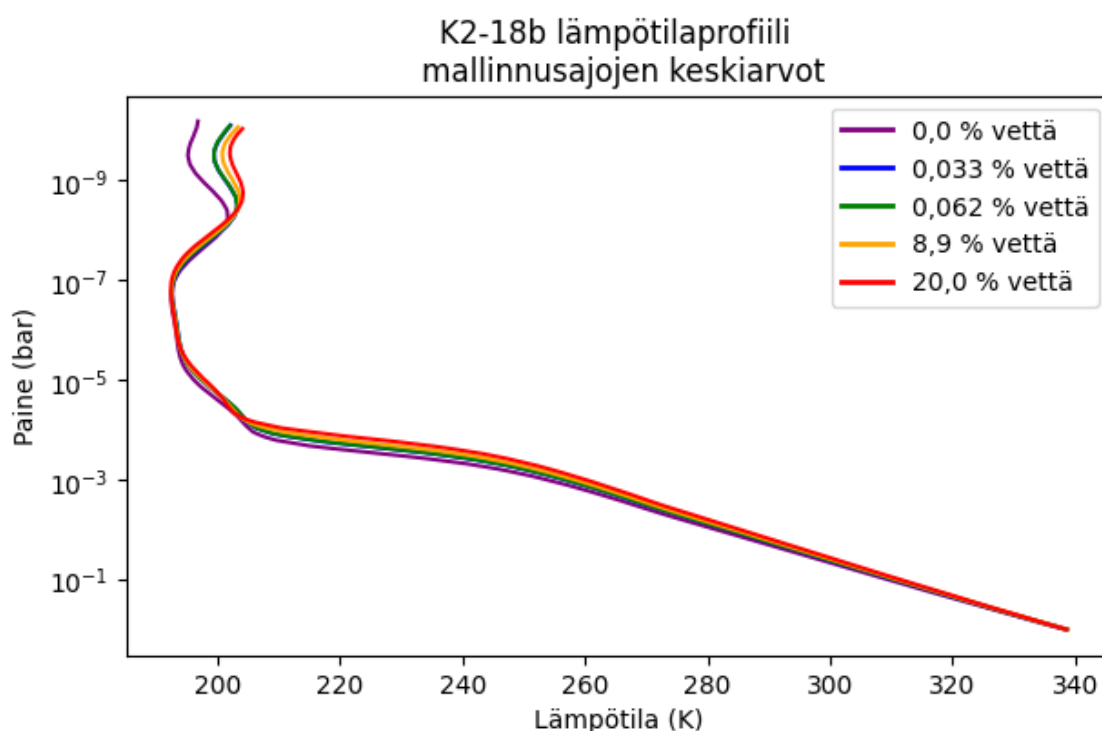
Jotta eri transmissiospektristä nähtäviä absorption merkkejä pystyttiin jaottelemaan eri molekyyliihin, mallinnettiin Exo-Transmitillä säteilyn kulkua kaasukehän läpi yksi kaasu kerrallaan. Näin pystyttiin määrittelemään, minkä kaasun absorptio dominoi milläkin aallonpituudella. Aallonpituuskohtaisesti dominoiva kaasu on se, jonka absorptio on sillä kohtaa spektriä voimakkainta. Exo-Transmit sisältää mahdollisuuden valita, mitkä kaasut se ottaa ratkaistavassa spektrissä huomioon. Jokaisen molekyylikohtaisen mallinnuksen osalta tarkasteltavan kaasun määrät pidettiin samana, mitä se on osana koko mallinnuksessa käytetyn kaasukehän koostumusta. Yksi kerrallaan tarkasteltava kaasu asetettiin huomioitavaksi ja muut kaasut jätettiin huomiotta. Tuloksena saatiin esiin jokaisen kaasun absorptiolle ominaiset aallonpituudet ja absorptiosormenjäljet. Absorption määrän laskelmille laaditussa spektrissä sironta asetettiin pois päältä, jotta vain absorption tuoma säteilyn himmeneminen saatiin otettua huomioon.

Koska ilmoitettu ylikulun syvyys pitää sisällään sekä planeetan että huomioidun kaasukehän osan säteilyn himmenemisestä, kaasukehän absorption tuoma himmenemisen määrä selvitettiin vähentämällä planeetan osuus mallinnetusta spektristä. Planeetan osuus selvitettiin ottamalla spektrinmallinnuksessa huomioon vain Kalium K, jonka osuus kaasukehästä oli 0 %. Spektristä poistettava osuus päätettiin ratkaista tällä järjestelyllä, sillä Exo-Transmit ei toiminut, ellei vähintään yksi kaasu ollut valittuna tarkastelun kohteeksi.

5 Tulokset

5.1 Kaasukehän pystyprofiilit ja K2-18b:n elinkelpoisuus pintaolosuhteiden perusteella

Atmosia ajettiin viidellä eri määrällä vettä. Kahteen malliajoon vesihöyryn sekoitussuhteeksi valittiin Taulukon 2 mukaiset arvot, 0,033 % ja 8,9 %, jotka pohjautuivat K2-18b:stä tehtyihin K2- ja Spitzer-havaintoihin. Lisäksi malli ajettiin JWST:n havaitsemalla veden 0,062 % sekoitussuhteella (Madhusudhan, N. et al. 2023). Vertailua varten kaasukehää mallinnettiin myös vedettömänä, 0,0 %, sekä selvästi runsaammalla määrällä vesihöyryä, 20,0 %. Muutokset veden suhteellisessa määrässä tasapainotettiin muuttamalla samassa suhteessa vedyn H_2 määrää kaasukehässä.

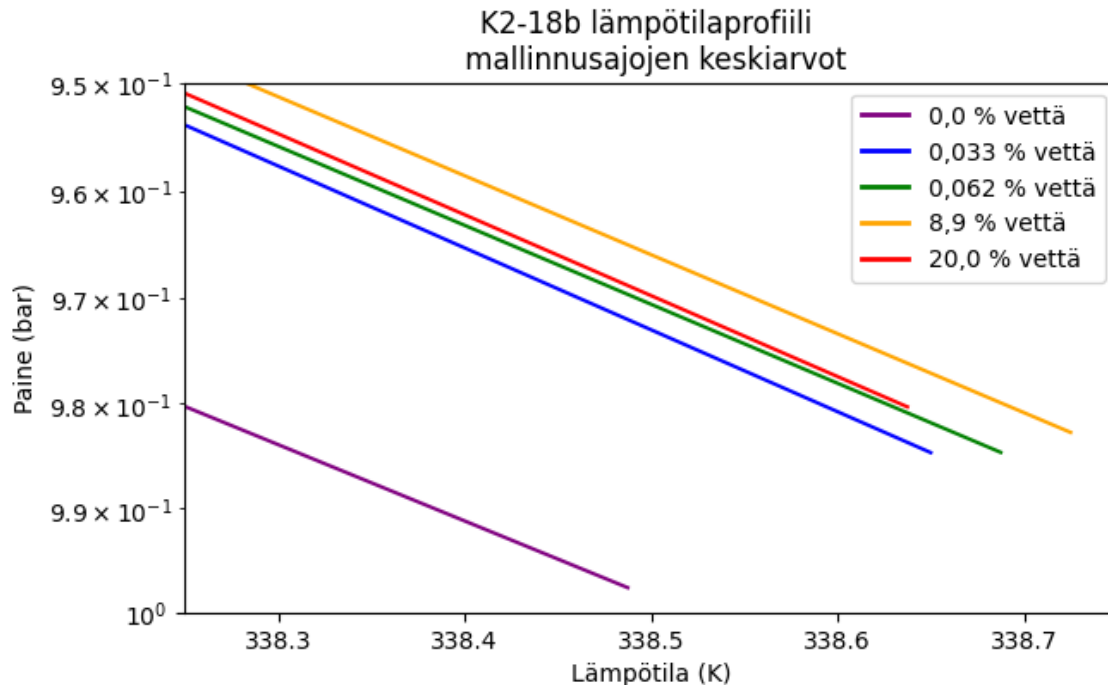


Kuva 4: Viimeisimpien kahdeksan malliajon ratkaisun keskiarvo lämpötilan ja paineen kuvaajana. Mallia ajettiin eri määrillä vesihöyryä täysin vedettömästä kaasukehästä aina kaasukehään, josta 20,0 % on vettä.

Tutkimuksen aikana kävi ilmi, että Atmos on erittäin herkkä muutoksille alkuarvauksissa ja malliajon asetuksissa, mitkä saavat aikaan kaasukehän ajautumisen joko voimakkaaseen säteilylämpenemiseen tai -kylmenemiseen, josta mallin ei enää ole mahdollista palauttaa itseänsä tasapainotilaan. Sopivien asetusten ja alkuarvausten löydyttyä, CLIMA- ja PHOTOCHEM-malleja oli mahdollista ajaa vuorottelevasti. Täydellistä tasapainoa ei saavutettu, mutta kaikilla vesihöyryn sekoitussuhteilla tehtyjen malliajien tuloksina saadut P-T-profiilit vaikuttivat kaikki päätyvän samankaltaisiin ratkaisuihin, kuten Kuvasta 4 voidaan nähdä.

Muutokset vesihöyryn määrässä vaikuttivat kuitenkin lämpötilaan etenkin yläkaasukehässä. Kuten Kuvasta 4 käy ilmi, mallinuksissa pienempi vesihöyryn määrä johti kylmempään yläkaasukehään 10^{-8} barista ylöspäin. Puolestaan 10^{-3} ja 10^{-5} barin

välille muodostunut tropopaussi oli sitä korkeammalla, mitä enemmän ilma sisälsi vesihöyryä. Tämä käy järkeen sillä vesihöyry on tehokas kasvihuonekaasu ja sen suurempi määrä kaasukehässä johtaa lämpötilan nousuun. Korkeammalle muodostuneen tropopaussin lämpötila oli myös tulosten mukaan kylmempi.



Kuva 5: Keskimääräinen pintalämpötila ja -paine vaihtelivat sekä mallien että niiden malliajojen välillä. Vedettömän kaasukehän malli erottui kuitenkin viileimpänä muihin malleihin verrattuna.

Mallinnusten erot pintalämpötilassa, Kuvassa 5, olivat kuitenkin pienemmät. Keskimäärin kaikkien malliajojen pintalämpötila vaihteli 338 K ja 339 K välillä sekä pintapaine 1 baarin ja 0,97 baarin välillä. Systemaattisesti kylmimpiä pintalämpötilamallinnuksia kehittyi vedettömässä kaasukehässä, ja alle prosentinkin vesimäärä näkyi mallissa vähintään parin asteen kymmenyksen tai jopa yli asteen lämpimämpänä pintalämpötilana. Lämpimimmät pintaolosuhteet kehittyivät vesihöyryn 8,9 % mallinuksissa ja osassa malliajoja 20,0 % mallinuksissa. Malliajokertojen väliset erot siinä, kumpi mallinnus ajautui lämpimämpään lopputilaan, vaihtelivat. Veden 20,0 % mallinuksessa pintalämpötila ja -paine vaihtelivat suuresti eri malliajokerroilla, kun tasapainotilaa etsittiin ennen tutkielmassa esitettäviä lopullisia malliajokertoja. Lopulta keskimääräinen ero 20,0 % mallinuksen ja vähävetisempien mallinnusten välillä kapeni ja mallinuksissa keskimäärin lämpimimmäksi osoittautui malli 8,9 % vesihöyryn määrällä. Esitettyjen malliajojen keskiarvon mukaan veden 20,0 % malliin kehittyi jopa kaikista kylmimmät olosuhteet, kun verrataan vettä sisältävien malliajojen keskiarvoja keskenään.

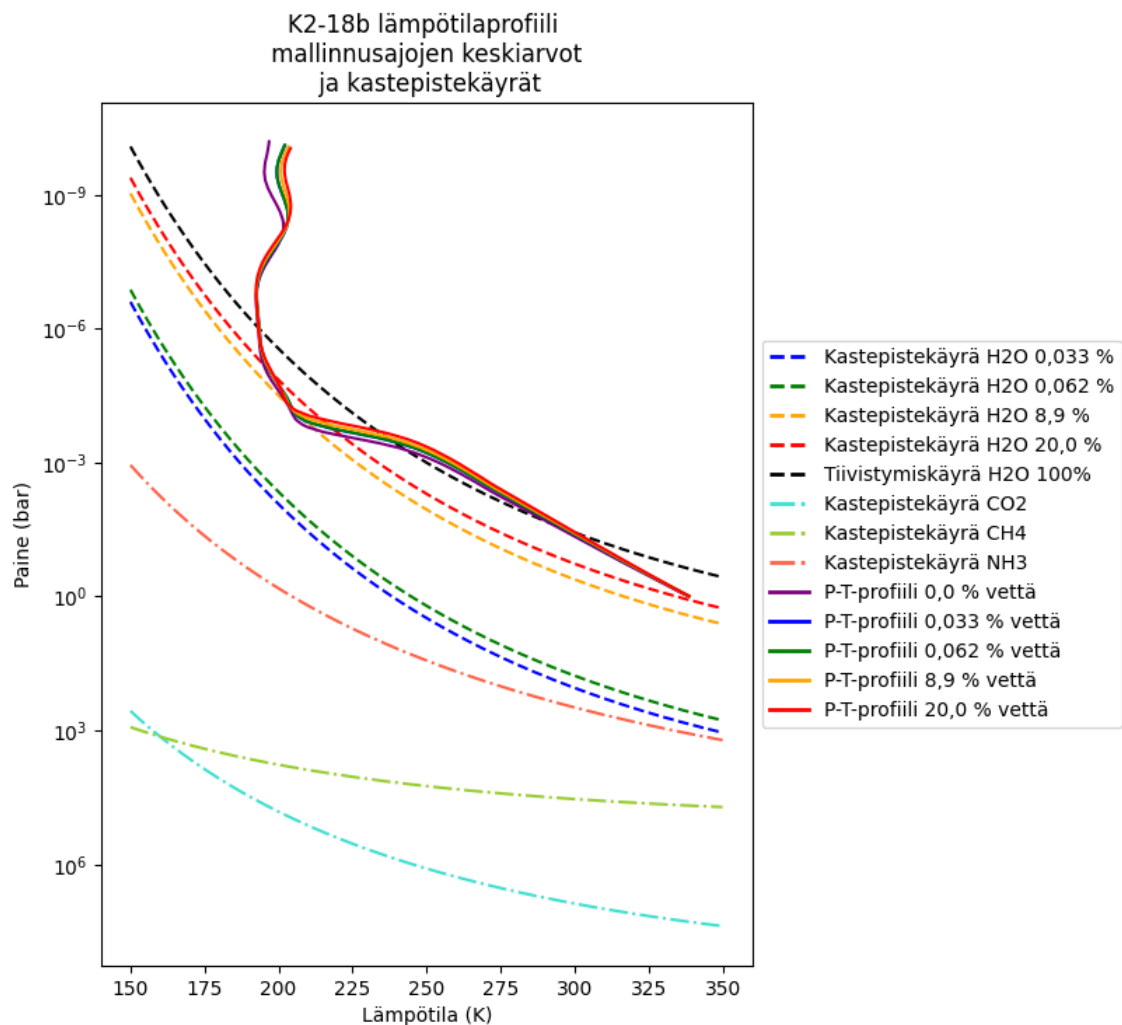
Syy sille, miksei vesihöyryn lisääminen lämmittänyt pintaa systemaattisesti vesihöyryn kasvihuonevaikutuksen kasvusta huolimatta, ei ole täysin varma. Kaasujen sekoitusasteet asetettiin mallinuksen alkutilassa vakioiksi. Mallinuksien välillä ainoa absorboiva kaasu, jossa oli lähtötilanteessa eroa, oli vesihöyry, jonka voisi odottaa tuovan

pinnalle lämpimämmät olot 20,0 % mallinnuksessa. Pinnalle ei todennäköisesti muodostu jäätä, joka viilentäisi ilmaa, sillä pintalämpötila suosii nestemäistä vettä. Utua muodostavien aerosolien vaikutukset pinnalla ovat mahdollisia, mutta kokojakauma ei ole tiedossa. Aerosolien vaikutuksesta säteilyn absorptioon ei pystytä täten sanomaan. Vaikuttavien tekijöiden vaihtoehtoiksi jää mallinnuksissa lähtötilan jälkeen muuttuneet kaasujen määrät tai pilvien vaikutus. Kappaleessa 5.3 esiteltäviä spektrimallinnuksia tarkastelemalla voidaan todeta kaasukehän absorboivien kaasujen määrien olevan hyvin saman kaltaiset 8,9 % ja 20,0 % mallinnuksissa. Sama voitiin todeta tarkastelemalla kaasujen jakaumaa Atmos-mallinnuksien välillä. Eroja oli pääasiassa typen, vedyn ja veden määrissä toisiinsa nähden. Kaasujen pystyjakaumaa ei ole esitetty tässä tutkielmassa. Yleisesti ottaen pilvien muodostumisen mahdollisuus kasvaa, kun ilmassa olevan kosteuden määrä kasvaa. Atmos-mallissa tiivistyminen voi lämmittää kaasukehää paikallisesti ja pilvet voidaan huomioida osana albedoa. Yhtenä mahdollisuutena esiin nousi siis kasvanut heijastavuus, mikä voisi johtaa tuloksissa 20,0 % mallinnuksen viileämpiin pintaolosuhteisiin 8,9 % mallinnukseen verrattaessa. Pilvet kehittyisivät tosin hyvin korkealle kaasukehään, ja harvemmasta ilmasta muodostuvat pilvet olisivat ohuita ja muodostuisivat vallitsevan lämpötilan mukaan jääkiteistä, jolloin pilvet vaikuttaisivat säteilyyn melko vähän. Pieni vaikutus, joka mallinnukseen syntyy, näyttäisi olevan kuitenkin vastakkainen verrattuna siihen, mikä jäisten ja ohuiden pilvien vaikutus on havaittu maapallolla olevan. Maapallolla vastaavat pilvet vaikuttavat ennemminkin lämmittävän pintaa, sillä saapuva lyhytaalto säteily pääsee tunkeutumaan ohuen jääkiteiden kerroksen läpi, mutta pitkäaalto säteilyä ohjautuu takaisin maanpinnalle. Kun tarkasteltiin, kuinka malli käsitteli sille lähtöarvona asetettua albedoa, huomattiin, ettei mallinnusten välisessä albedossa esiintynyt merkittäviä eroja. Pois ei voida sulkea mahdollisuutta, että malli ei ole käsitellyt kasvatettua vesihöyryn määrää odotetulla tavalla tai että mallille annettu kaasukehän koostumus on johtanut mallinnuksen epävakaaseen tilaan.

Tämän tutkimuksen käyttämällä alkuarvauksilla ja niistä muodostuneista kaasukehän mallinnuksista voidaan kuitenkin todeta, että eri skenaarioiden lämpötilavaihtelut pinnan läheisyydessä pysyivät 273.15 K ja 373.15 K välillä. Vallitsevan paineen puitteissa tämä tarkoittaa sitä, että veden on mahdollista esiintyä K2-18b:n pinnalla ja kyseinen eksoplaneetta voidaan katsoa elinkelpoiseksi.

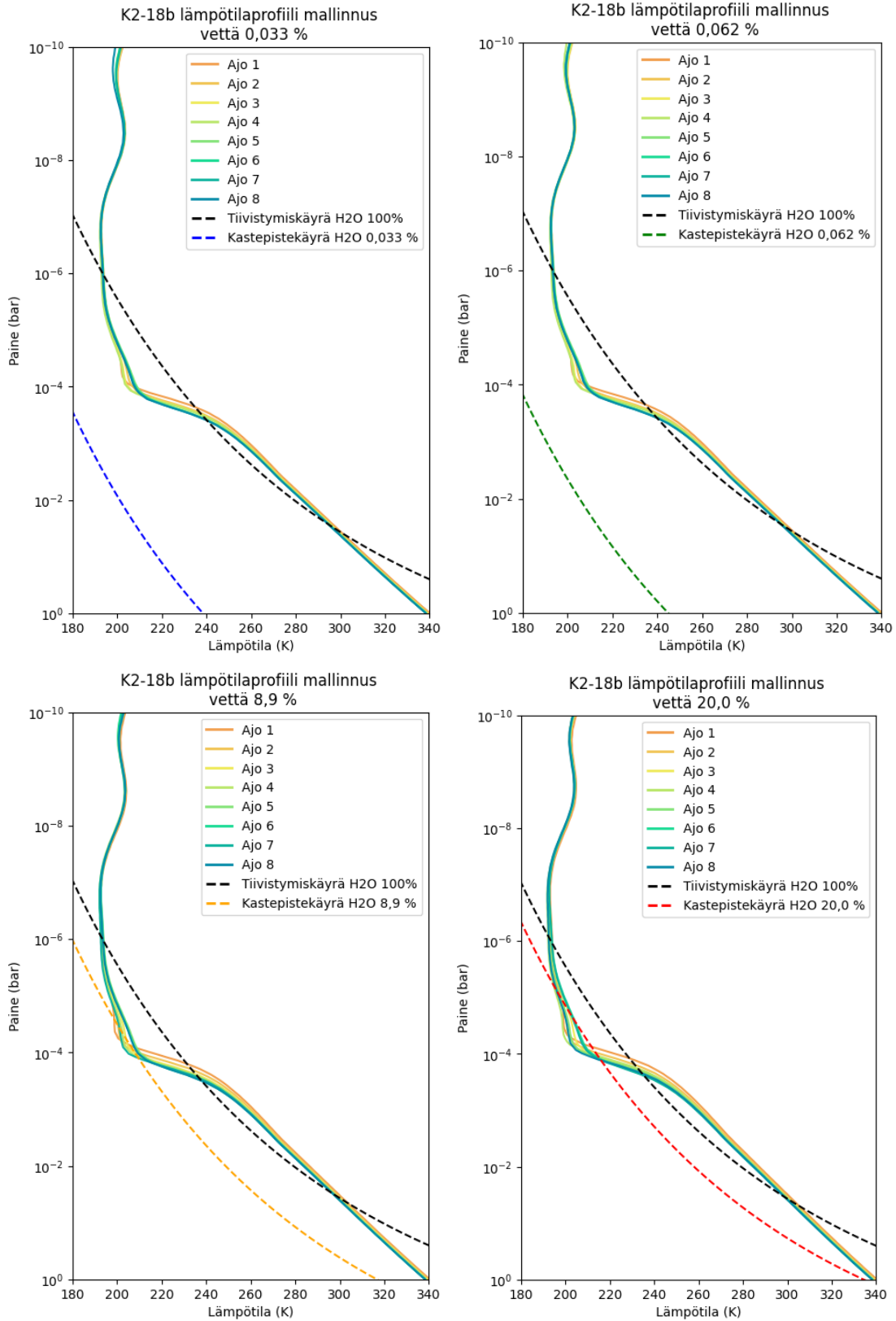
5.2 Erot pilvitasoissa

Pilvien muodostumista tutkittiin kaikkien alkuarvauksessa käytettyjen molekyylien osalta ja todettiin, että näistä vain vesipilvet olisivat käytännössä mahdollisia K2-18b:n kaasukehässä. Clausius-Clapeyronin yhtälöllä aineen sekoitussuhde huomioiden selvitettiin kunkin molekyylin kastepistekäyrä. Kuvasta 6 visuaalisesti nähdään, että CO₂:n, CH₄:n ja NH₃:n käyrät eivät risteä lämpötilan pystyprofiilin kanssa, eli tämän tutkimuksen mallinnusten mukaan K2-18b:n kaasukehä ei tue hiilidioksidi-, metaani- tai ammoniakkipilvien muodostumista.



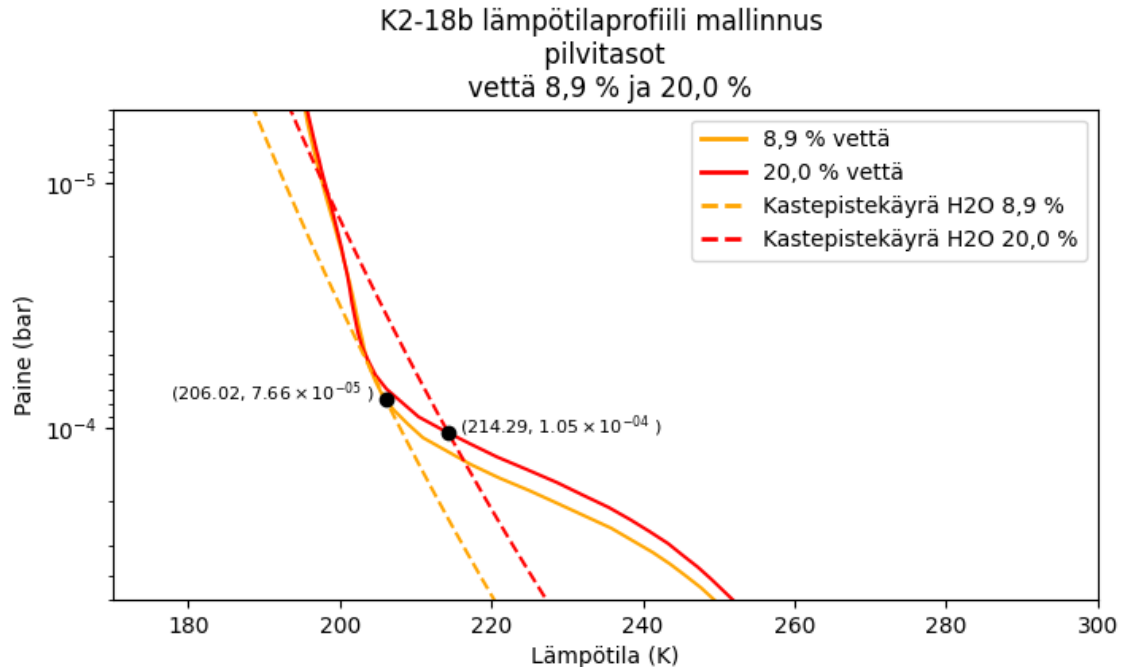
Kuva 6: Veden yleinen tiivistymiskäyrä (musta katkoviiva) sekä sekoitussuhteet huomioiva kastepistekäyrä vedelle, hiilidioksidille, metaanille ja ammoniakille näyttävät kaasukehän lämpötilaprofiileihin verrattuna, että K2-18b:n kaasukehässä pilvet ovat todennäköisimmin vettä, sillä vain veden kastepistekäyrästä osa risteää lämpötilan pystyprofiilin kanssa.

Vesipilvien muodostuminen mallinnusten mukaisessa kaasukehässä kuitenkin on mahdollista riittävällä veden määrällä. Kuten Kuvasta 6 ja vesihöyryn osalta eritellysti Kuvasta 7 voidaan todeta, puhtaan veden olisi teoriassa mahdollista muuttua nestemäiseen tai kiinteään olomuotoon sillä korkeudella kaasukehää, missä lämpötilan pystyprofiilin käyrä sijaitsee veden tiivistymiskäyrän vasemmalla puolella. Tällöin ympäröivän ilman tuomat olosuhteet olisivat vesihöyryn esiintymiselle liian kylmät ja muodostuisi vesipisaroita tai jääkiteitä. Koska mallinnetuissa kaasukehissä vesihöyryn suhteellinen määrä on pienempi kuin 100 %, pilvien muodostumistasoja on syytä tarkastella laskemalla kastepistekäyrä erikseen kullekin vesihöyryn sekoitussuhteelle.



Kuva 7: Veden yleinen tiivistymiskäyrä (musta katkoviiva) sekä kaasukehän sekoitussuhdekohtainen kastepistekäyrä suhteessa mallinnukseen (ylävasen) 0,033 %, (yläoikea) 0,062 %, (alavasen) 8,9 %, (alaoikea) 20,0 % vesihöyryn sekoitussuhteella.

Vähävetisten mallien, 0,033 % ja 0,062 %, osalta pilvien muodostuminen vaikutti lopulta epätodennäköiseltä, sillä vesihöyryn määrästä laskettu kastepistekäyrä karkaa kyseisten mallien lämpötila- ja painevaihtelun ulottumattomiin. Lämpötilaprofiili ja muodostuva kaasukehä suosii siis veden pysymistä vesihöyryn muodossa.



Kuva 8: Pilvien muodostumiskorkeus määritetty tilasta, jossa ympäristön lämpötila on sama kuin vesihöyryn sekoitussuhteen perusteella laskettu kastepiste. Tämä löytyy mustalla pisteellä merkitystä kohdasta, jossa vesihöyryn sekoitussuhteesta ja ilmanpaineesta riippuva kastepistelämpötilan käyrä (katkoviiva) ja kaasukehän lämpötilan pystyprofiili (yhtenäinen viiva) kohtaavat. Kuvassa on esitetty painetasot pilvien muodostumiselle mallinnuksille 8,9 % ja 20,0 % vesihöyryn sekoitussuhteella.

Runsaampivetisten mallien, 8,9 % ja 20,0 %, osalta vesipilvien muodostumiseen on isompi mahdollisuus. Näistä kahdesta pilvien esiintymisen todennäköisyys on suurempi kaasukehässä, jossa vesihöyryä on ilmasta 20,0 % sillä, mitä enemmän vettä, sitä enemmän rakennusaineita pilvien syntymiseen on käytettävissä. Vesihöyryn 8,9 % mallin kaasukehä ei jokaisella malliajolla muodostanut suotuisia olosuhteita pilvien synnylle, mutta vaihtelun puitteissa keskimääräisellä ratkaisulla oli mahdollista tarkastella potentiaalisten pilvien syntykorkeutta.

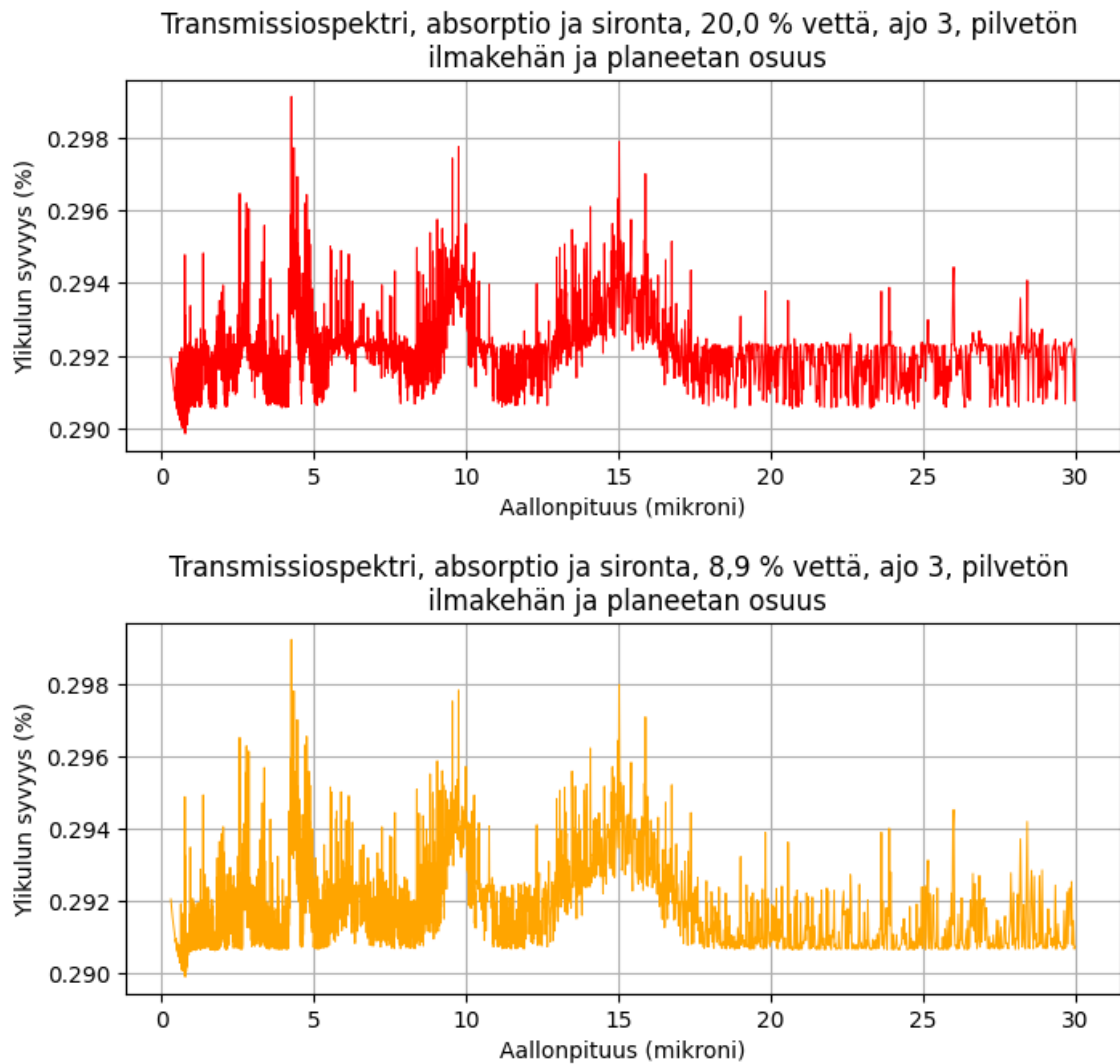
Etsimällä kastepistekäyrän ja lämpötilan pystyprofiilin risteämiskohdat, merkittynä Kuvaan 8, löydettiin taso, jolla kaasukehässä ylöspäin liikuttaessa lämpötilan käyrä siirtyi kastepistekäyrän vasemmalle puolelle. Tämä merkitsee korkeutta, jolla ilma viilenee riittävästi, jotta vesihöyry saavuttaa kyllästystilan ja pilvien synty mahdollistuu. Vesihöyryn 20,0 % mallin osalta pilvien syntytaso löytyi keskimäärin $1,05 \times 10^{-4}$ baarin tasolta lähes 50 km korkeudelta. Vesihöyryn 8,9 % mallin mukaisessa kaasukehässä ilman täytyy viiletä enemmän, jotta vesihöyry saavuttaisi kyllästystilan, ja pilvien keskimääräinen syntytaso löytyy hieman korkeammalta $7,66 \times 10^{-5}$ baarin tasolta noin 50 km korkeudelta.

5.3 Pilvisyyden tuomat erot spektrissä

Spektrimallinnuksia varten kaasukehämallinnuksista käytettiin Atmosin mallinnusajoa 3, jossa mahdollisten pilvien ratkaistiin olevan 45 km ja 50 km välillä. Veden 8,9 % mallinnuksessa pilviä muodostuisi $1,05 \times 10^{-4}$ baarin tasolla, ja veden 20,0 % mallinnuksessa $1,11 \times 10^{-4}$ baarin tasolla. Tasot ovat keskimääräistä pilvitasoa matalammalla, mutta noudattavat spektrimallinnuksissa käytettyjen mallinnusajojen lämpötilajakaumaa. Pilvien esiintymistaso noudattaa samalla myös lämpötilajakaumaan kytköksissä olevaa kaasukehän koostumusta, jota spektrimallinnuksissa käytettiin. Koska Exo-Transmitissa ei ollut vaihtoehtona ottaa laskelmissa huomioon vetyä H_2 , sen sironnan vaikutus ei ole sisällettynä tässä esiteltäviin tuloksiin. Tulokset ovat esitetty pyöristettyinä viiden desimaalin tarkkuuteen.

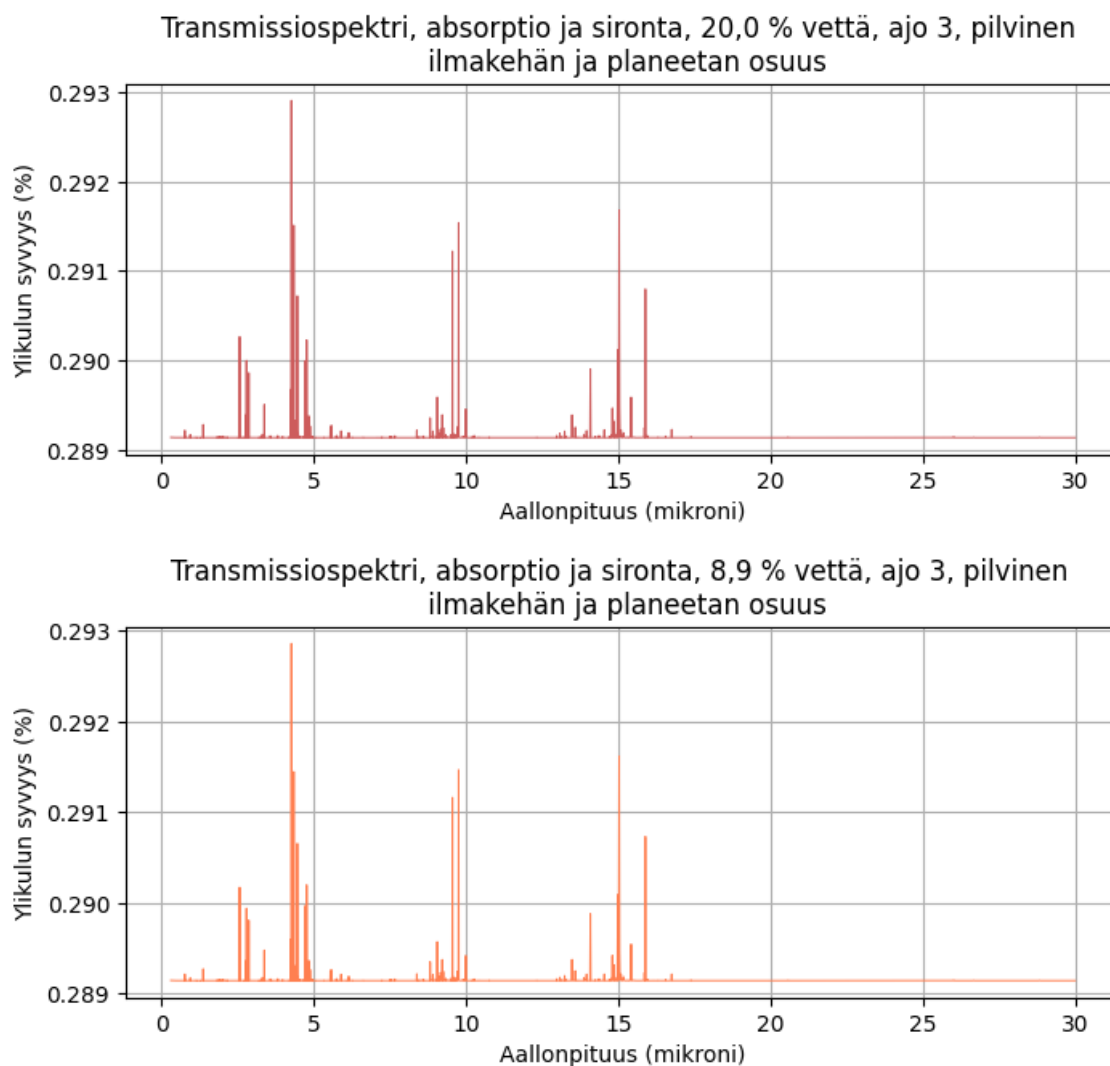
Erot pilvisten ja pilvettömien spektrimallinnusten välillä olivat silminnähden huomattavat, mikä käy ilmi vertaamalla keskenään Kuvassa 9 esitettyjä pilvettömän kaasukehän spektrimallinnuksia Kuvan 10 pilvisen kaasukehän spektrimallinnuksiin. Kun absorptio ja sironta otettiin huomioon, Exo-Transmitin tuottamasta transmissiospektristä nähtiin, että eksoplaneetan ylikulku ja sen pilvetön kaasukehä himmensivät säteilyä yksittäistä aallonpituutta kohden 0,28986–0,29913 % verran veden 20,0 % kaasukehämallinnuksella. Vastaavassa tilanteessa 0,28990–0,29926 % säteilystä himmeni veden 8,9 % mallinnuksella. Pilvisessä tilassa planeetta ja kaasukehä himmensivät läpi pääsevää säteilyä vähemmän, 0,28914–0,29290 % verran veden 20,0 % mallinnuksessa ja 0,28914–0,29286 % veden 8,9 % mallinnuksessa. Koska pelkän eksoplaneetan taakseen peittämän säteilyn määrän oli 0,28914 %, enimmillään pilvetön kaasukehä himmensi säteilyä yksittäistä aallonpituutta kohden 0,00999 % veden 20,0 % mallinnuksessa, ja 0,01012 % veden 8,9 % mallinnuksessa. Kaasukehän osuus koko säteilyn himmenemisestä olisi enimmilläänkin vain muutaman prosentin luokkaa.

Pilvet estivät säteilyn kulun niin isossa osaa kaasukehää, että useimmilla aallonpituuksia ei esiintynyt merkkejä absorptiosta tai sironnasta. Pilvinen kaasukehä himmensi säteilyä enimmilläänkin vain 0,00376 % veden 20,0 % mallinnuksessa, ja 0,00372 % veden 8,9 % mallinnuksessa. Vähäisempi säteilyn himmeneminen pilvisessä kaasukehässä on selitettävissä sillä, että Exo-Transmit ei ota säteilynkulukulaskelmissa huomioon planeetan pinnan ja pilvien tason välistä kaasukehää. Todellisuudessa pilvet peittävät säteilyä taakseen ja sen myötä ylikulun syvyys eli säteilyn vaimenemisen määrä olisi tässä ilmoitettua suurempi. Tuloksena saatujen ylikulkujen syvyydessä eroa oli pilvisen ja pilvettömän kaasukehän välillä keskimäärin 0,00263 % ja erojen mediaani oli 0,00267 % kaasukehän 20,0 % vesihöyryn mallinnuksessa. Vastaavasti kaasukehän 8,9 % vesihöyryn sekoitussuhteen mallinnuksessa keskimääräinen ero oli 0,00238 % ja aallonpituuskohtaisten erojen mediaani 0,00201 %. Prosenteissa ilmaistuna erot eivät vaikuta suurilta, mutta visuaalisella tarkastelulla nähdään pilvisessä kaasukehässä kaasujen absorptio olevan selvästi vähäisempää. Tunnistettaissa on pilvisyydelle tyypillinen tasainen spektri, jonka yhteydessä erottuu vain muutamaa absorptio sormenjälki yläkaasukehässä sijaitsevista kaasuista.



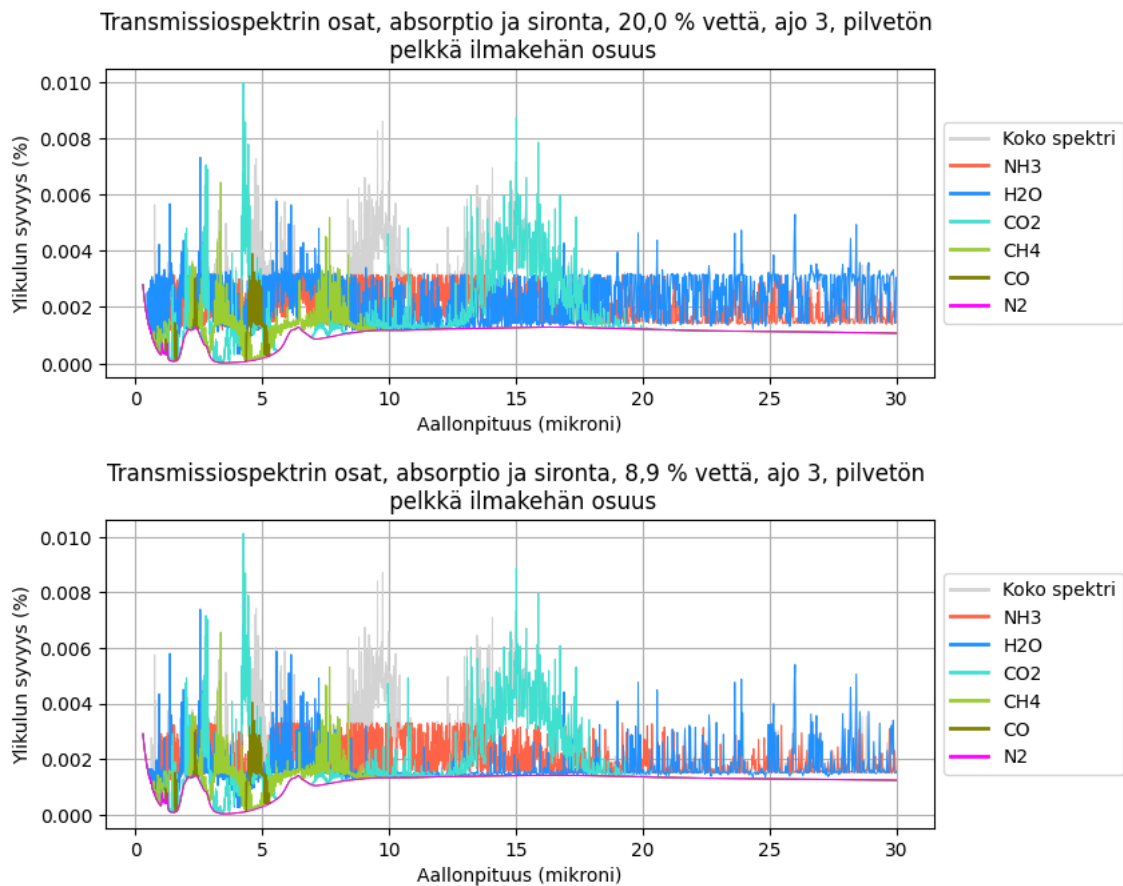
Kuva 9: K2-18b:n transmissiospektrimallinnus pilvettömän kaasukehän tapauksessa, jossa eksoplaneetan kaasukehän peittämän säteilyn määrä nähdään prosentuaalisena osana aallonpituuden funktiona. Absorption lisäksi säteilyn sironta on huomioitu. (Ylempi) veden 20,0 % sekoitussuhteen mallinnuksella, (Alempi) veden 8,9 % sekoitussuhteen mallinnuksella.

Eri vesihöyryn määrän sisältävien malliajojen välillä erot olivat pieniä koko spektrin osalta, kuten Kuvasta 9 voidaan todeta. Muutoksia koko kaasukehän spektriin ei niinkään välity, sillä käytössä olleilla sekoitussuhteilla muutokset eivät riittäneet kasvattamaan vesihöyryn määrää niin paljoa, että voimistunut absorptio olisi muuttunut millään aallonpituudella selvästi dominoivaksi. Kaasukehämallinnuskohtaisia eroja löytyi kuitenkin vertailtaessa vesihöyryn absorptiospektriä erillään muista kaasuista. Kuvassa 11 esitettyjä yksittäisten kaasujen spektrimallinnuksia vertaillessa huomataan, että selkeän kaasukehän tapauksessa etenkin 10 mikronin ympäristössä ja sitä pidemmillä aallonpituuksilla merkit vesihöyryn absorptiosta ovat vähäisemmät, kun sekoitussuhde on 8,9 %. Tämä ei kuitenkaan välity selkeästi koko kaasukehän spektriin, sillä veden absorptio merkit kilpailevat tällä alueella ammoniakkin absorptio kanssa, ja esimerkiksi 15 mikronin ympäristössä spektriä dominoi puolestaan hiilidioksidin absorptio. Yksittäisiä absorptio piikkejä voisi kuitenkin havaita.



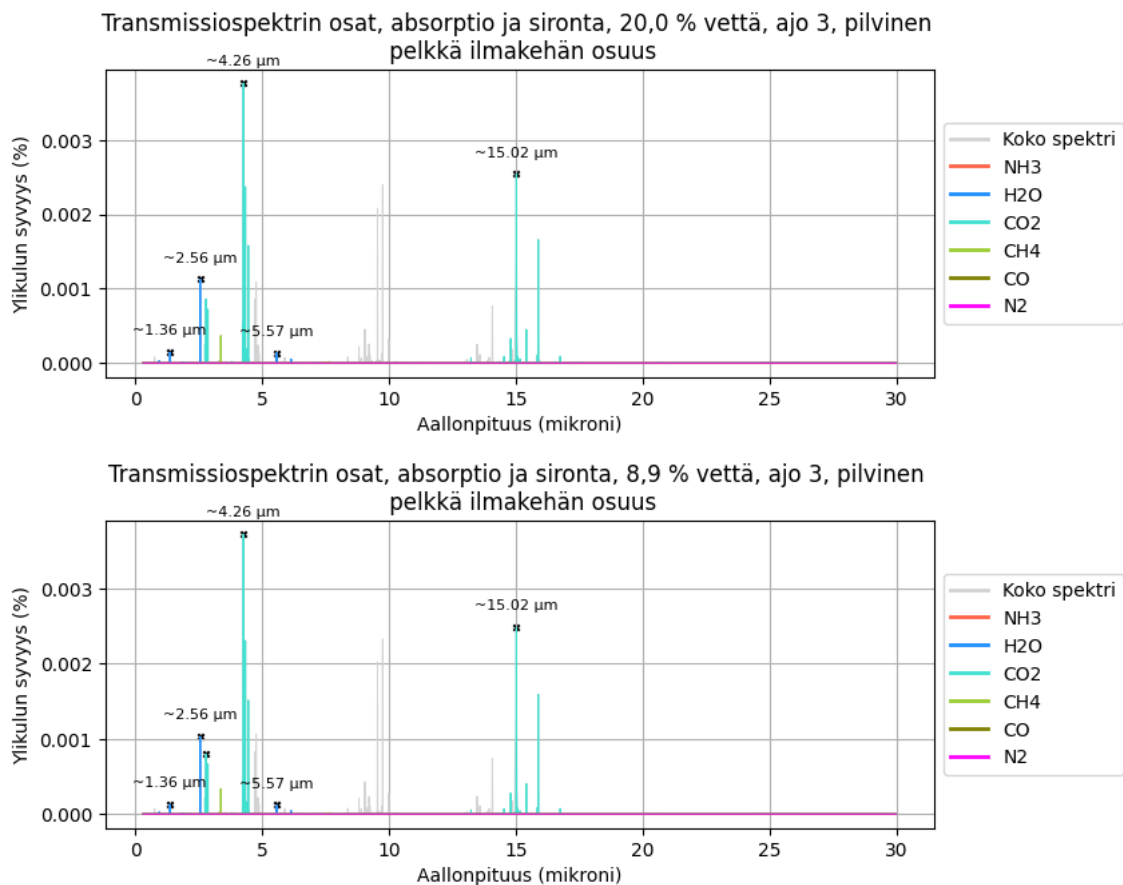
Kuva 10: K2-18b:n transmissiospektrimallinnus pilvisen kaasukehän tapauksessa, jossa eksoplaneetan pilvien yläpuolelle jäävän kaasukehän peittämän säteilyn määrä nähdään prosentuaalisena osana aallonpituuden funktiona. Sekä absorptio että säteilyn sironta on huomioitu. (Ylempi) veden 20,0 % sekoitussuhteen mallinnuksella, (Alempi) veden 8,9 % sekoitussuhteen mallinnuksella.

Alle 2 mikronin aallonpituuksilla veden osuus koko spektriin on selkeämpi. Keskimäärin aallonpituuksien yli tarkasteltuna malliajojen väliset erot vesihöyryn absorptiossa olivat pieniä, vain 0,00046 %. Koska vesihöyryn sormenjälkiä löytyi kaikilla mallinnuksilla, vaikkakin pilvisessä kaasukehässä vähemmän, vesihöyry on mahdollista havaita K2-18b:n kaasukehässä. Tämän tutkimuksen tulosten valossa merkkejä voisi etsiä sekä infrapunaa että näkyvän valon alueelta. Pilvettömässä tapauksessa merkkejä veden absorptiosta löytyy läheltä 1,4 mikronia, jonka alueelta vettä on havaittu myös Hubble-avaruusteleskoopilla (Benneke, B. et al. 2019). Pilvisenkin kaasukehän spektrissä merkki on havaittavissa, mutta hyvin häilyvästi. Kaasukehän pilvet sijaitsevat niin korkealla, että lähes kaikki vesihöyryn merkit häviävät pilvien vaikutuksesta ja mallinnuskohtaisia eroja ei ole enää erotettavissa. Runsaan pilvisessä kaasukehässä, jossa suurin osa vesihöyrystä sijaitsee pilvien alapuolella, ei vesihöyryn määrää pystytä havainnoilla tarkkaan arvioimaan.



Kuva 11: K2-18b:n Atmos-mallinnuksessa käytettyjen eri molekyylien absorptio osuus transmission heikkenemiseen selkeässä kaasukehässä prosentuaalisena osana aallonpituuden funktiona, jos kaasukehä koostuisi pelkästään tarkasteltavasta kaasusta. (Ylempi) veden 20,0 % sekoitussuhteen mallinnuksella, (Alempi) veden 8,9 % sekoitussuhteen mallinnuksella. Taustalla harmaalla merkittynä koko spektri ilman planeetan peittämää osuutta säteilystä.

Atmos-mallissa huomioon otetut molekyylit, jotka ovat lueteltuina Taulukossa 2, kattoivat suurimman osan transmissiospektrin absorptio merkeistä. Sekä pilvettömässä että pilvisessä kaasukehässä hiilidioksidin absorptiosormenjälki erottui 15 mikronin ympäriltä sekä alle 5 mikronista. Hiilidioksidi tuotti isoimman absorptio aallonpituutta kohden muihin molekyyleihin verrattuna. Muiden molekyylien vaikutus spektriin oli erotettavissa pilvettömässä tilanteessa, mutta suurin osa yksittäisten molekyylien absorptio merkeistä jäi huomaamattoman pieneksi pilvisessä kaasukehässä. Kaasukehän mallinnuksessa käytettyjen molekyylien lisäksi transmissiospektrissä erottuu absorptio merkkejä 10 mikronin ympäristössä, jotka eivät ole selitettävissä ammoniakkin, veden, hiilidioksidin, hiilimonoksidin, metaanin, tai kaksiatomisen typen absorptiolla. Paras yhteensopivuus absorptiospektriin oli otsonilla O_3 , jota Atmosin valokemiallinen malli voi synnyttää.



Kuva 12: *K2-18b:n Atmos-mallinnuksessa käytettyjen eri molekyyliden absorptio osuus transmission heikkenemiseen pilvisessä kaasukehässä, jossa eksoplaneetan pilvien yläpuolisen kaasukehän peittämän säteilyn määrä nähdään prosentuaalisena osana aallonpituuden funktiona, jos kaasukehä koostuisi pelkästään tarkasteltavasta kaasusta. (Ylempi) veden 20,0 % sekoitussuhteen mallinnuksella, (Alempi) veden 8,9 % sekoitussuhteen mallinnuksella. Taustalla harmaalla merkittynä koko spektri ilman planeetan peittämää osuutta säteilystä.*

Todettakoon, että yksittäisten kaasujen osalta laskettavien spektrimallinnusten aallonpituuskohtaiset arvot eivät ole summattavissa vastaamaan kaasujen kokonaisuutena mallinnetun kaasukehän spektrimallinnuksen arvoja. Tämä on seurausta siitä, että yksittäisen kaasun mallinnuksessa koko kaasukehän sisältämän kaasun määrä, jonka läpi säteily on kuljettava, on pienempi. Isompi määrä säteilyä saavuttaa silloin yksittäisen kaasun molekyylit kuin, jos säteilyn lähteen ja absorboivan molekyylin välissä olisi muita säteilyä absorboivia kaasuja. Kuvista 11 ja 12 voidaan kuitenkin nähdä, mikä molekyylit absorboi eniten milläkin aallonpituudella. Yksittäisten, vähemmän absorboivien kaasujen osuus säteilyn himmentämisessä saattaa näyttäytyä suurempana molekyylikohtaisessa tarkastelussa kuin mitä niiden osuudet ovat kaasujen kokonaisuutena tarkastellun kaasukehän transmissiospektrissä. Kunkin kaasun molekyyliden vaikutusta koko säteilyn himmenemiseen ei Kuvan 11 tai 12 tarkastelulla pystytä suoraan toteamaan.

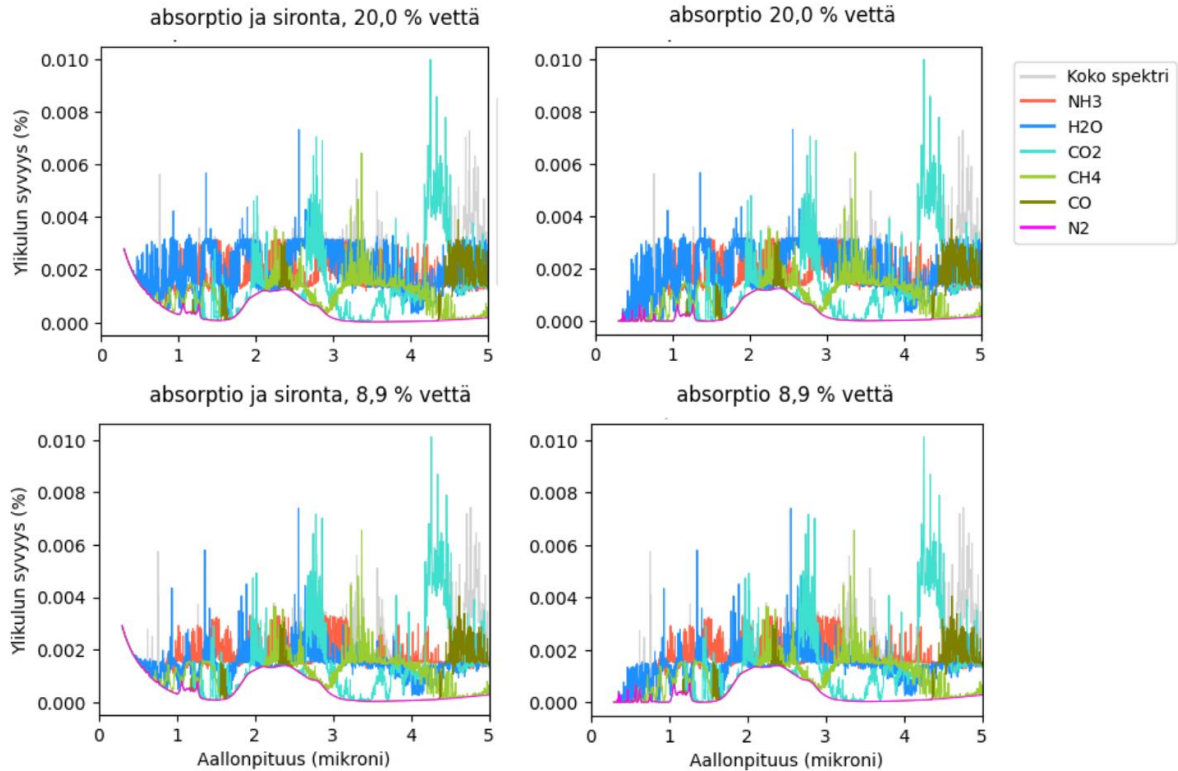
Pilvien peittäessä alaosan kaasukehästä, merkit vesihöyrystä jäivät sekä 20,0 % että 8,9 % sekoitussuhteella hyvin pieniksi ja erot malliajojen pilvisessä spektrissä olivat niitä toisiinsa verrattaessa hyvin pienet, mikä nähdään Kuvassa 12 hyvin toistensa näköisinä

spektreinä. Molempien osalta 2,5 mikronin läheisyydessä erottuu selkeä absorption jälki, jonka alueella himmentävä vaikutus säteilyyn on noin 0,001 %. Vesihöyryn 20,0 % mallinnuksessa absorptiomerkki on hieman vahvempi.

Tuloksista on selvästi erotettavissa, että pilvet peittävät absorption merkkejä, mikä vaikuttaa eksoplaneetan kaasukehän elinkelpoisuuden arvioimiseen. Koska pilvisen kaasukehän absorptio on vähäisempää, kaasukehä näyttäytyy havainnoissa kokonaisuudessaan viileämpänä. Tämä voidaan päätellä siitä, että absorptio on sitä suurempaa, mitä korkeampi lämpötila on. Lisäksi pilvet peittävät ison osan eri molekyylien absorption merkeistä, joten pilvistä kaasukehää havainnoidessa kaasukehässä olevia molekyylejä voi jäädä jopa kokonaan havaitsematta, jos niitä ei juurikaan pilvien yläpuolisessa kaasukehässä esiinny. Kuten Kuvista 10 ja 12 nähdään, kaksi eri koostumuksen kaasukehää voivat pilvisessä tilanteessa vaikuttaa samankaltaisilta, sillä pilvien alapuolisen kaasukehän eroja kaasujen määrässä ei pystytä havaitsemaan. Tämän tutkimuksen mallinnusten pohjalta todettuna se voi olla syynä, miksei JWST ole toistaiseksi havainnut hiilimonoksidia eikä ammoniakkaa (*Madhusudhan, N. et al. 2023*), jos niitä K2-18b:n kaasukehässä esiintyisi. JWST teki kuitenkin alineptunuksien osalta ensimmäiset havainnot metaanista ja hiilidioksidista. Havaintojen kanssa yhteneviä ovat myös mallin tulokset siitä, että pilvien yläpuolisessa kaasukehässä on merkkejä näistä molekyyleistä. Kaasujen, joita esiintyy sekä pilvien ylä- että alapuolella, kokonaismäärän arvion voidaan todeta jäävän puutteelliseksi pilvien läsnä ollessa. Pilvien esiintyminen johtaisi siis vajavaiseen arvioon kaasun kokonaismääristä eksoplaneetan kaasukehässä, jos se tehtäisiin mallinnuksen mukaisesta spektristä. Samaa voidaan odottaa havainnoilta, joita tehdään muistakin pilvisistä eksoplaneetoista. Vääristynyt arvio kaasukehän kokonaiskoostumuksesta toimii virhelähteenä koostumuksen pohjalta tehdyissä kaasukehämallinnuksissa. Mitä vähemmän kasvihuonekaasuja arvioidaan kaasukehässä olevan, sitä todennäköisemmin havaintojen pohjalta tehdyissä arvioissa ja mallinnuksissa eksoplaneetan kaasukehä jää todellisuutta viileämmäksi, sillä niiden tuoma alakaasukehää lämmittävä vaikutus jäisi vähäisemmäksi.

Lopuksi todettakoon vielä, että tarkastelu keskittyi absorption merkkeihin, mutta sironnastakin jäi jälkensä säteilyyn, mikä nähdään Kuvassa 13. Selkeän kaasukehän osalta Rayleigh'n sironna oli vahvasti osa säteilyn vaimenemista noin 1 mikronissa ja sitä lyhyemmillä aallonpituuksilla. Etenkin typen mutta myös veden absorption merkit heikkenivät näkyvän valon alueella, kun sironna otettiin huomioon. Muilla aallonpituuksilla ei selkeässä tilanteessa nähty sironnan tuovan merkittävää muutosta säteilyn vaimenemiseen. Myöskään pilvisissä spektrimallinnuksissa ei ollut erotettavissa sironnan merkkejä.

Transmissiospektrin osat, ajo 3, pilvetön
pelkkä ilmakehän osuus



Kuva 13: Molekyylikohtaisten spektrimallinnusten vertailu Rayleigh'n sironta huomioituna (vasemmassa laidassa) ja spektrimallinnus ilman sirontaa (oikeassa laidassa). Molemmilla, veden 8,9 % (alalaidassa) ja 20,0 %, (ylälaidassa) mallinnuksilla, sironnan säteilyä himmentävä vaikutus on nähtävissä alle mikronin alueella aallonpituuden lähestyessä nollaa. Muuten sironnan mallinnusten välille aiheuttamat erot ovat häviävän pieniä. Taustalla harmaalla merkittynä koko spektri ilman planeetan peittämää osuutta säteilystä.

6 Pohdintaa

Atmos-mallin tulokset näyttävät, että K2-18b:n tapauksessa vesihöyryn esiintyminen kaasukehässä suosii hieman lämpimämmän kaasukehän kehittymistä. Se, johtaako selvästi runsaampi, useiden prosenttien, sekoitussuhde vettä kaasukehässä lineaarisesti lämpimämpiin olosuhteisiin, jäi epäselväksi. Tulos, jossa mallinnuksen vesihöyryn osuus olisi 20,0 % ja alatroposfääri lämpimämpi kuin vesihöyryn 8,9 % mallinnuksessa, olisi selitettävissä runsaamman vesihöyryn määrän suuremmalla lämmittävällä kasvihuonevaikutuksella. Runsain vesihöyryn määrä ei kuitenkaan tehnyt 20,0 % mallinnuksessa lämpimintä. Sillä suurempi vesihöyryn määrä voi edistää pilvien muodostumista tarjoamalla niille enemmän rakennusainetta, epäilen, että syy viileämpään kaasukehään runsaimmalla vesihöyryn määrällä on pilvien vaikutuksissa mallissa. Koska Atmos osaa ottaa säteilyn kulun mallinnuksessa huomioon pilvet albedoa lisäävänä tekijänä, voidaan pitää vähintään mahdollisena, jos kosteampi kaasukehä on suosinut pilvien muodostumista enemmän, että albedo on ollut suurempi. Tällöin mallinnuksissa pilvet ovat voineet heijastaa kaasukehään saapuvaa säteilyä runsaammin, jolloin pilvien viilentävä vaikutus kaasukehään on ollut voimakkaampi kuin vesihöyryn kasvattama kasvihuonevaikutus. Tämä voisi olla yksi syy, miksei merkittävää eroa pintalämpötilan tuloksiin päässyt tällä koejärjestelyllä syntymään suuremmalla veden määrällä, olettaen, että syy ei ollut mallin ajautumisessa epätasapainoon ja virheellisiin tuloksiin.

Pilvisyyden tuomia eroja oli myös mahdollista tarkastella Exo-Transmitilla mallinnetuista transmissiospektreistä, kun niitä verrattiin pilvisessä ja pilvettömässä tilassa. Loogisesti voitaisiin odottaa, että pilvinen kaasukehä peittää enemmän tähden säteilyä taakseen ja tulokset näyttäisivät säteilyn himmenevän enemmän pilvisen kaasukehän tapauksessa. Esitellyt tulokset ovat kuitenkin päinvastaiset. Se, että pilvisessä tilanteessa säteily himmeni vähemmän kuin selkeän kaasukehän tapauksessa, on seurausta Exo-Transmitin tavasta käsitellä kaasukehän osaa, jonka alueelta säteilyn kulkua lasketaan. Pilvisyyden asettaminen Exo-Transmittiin jättää huomiotta pilvien alle jäävän kaasukehän, jolloin säteily kulkee pilvellisessä tilanteessa vain pilvien yläpuolisen kaasukehän läpi. Koska tarkasteltava säteily kulkee pilvisessä tilanteessa pienemmän ilmamäärän läpi, säteilyä pääsee absorboitumaan ilmaan vähemmän. Tätä eroa vahvistaa myös se, että tihein ja voimakkaammin absorboiva ilma sijaitsee maanpinnan lähellä. Tämä pilvien alle jäävä ilmakerros ei siis pääse vaikuttamaan Exo-Transmitin laskelmissa säteilyn kokemaan absorption määrään. Tulosten pohjalta voidaan kuitenkin päätellä ja todeta suoraan, että pilvisen kaasukehän läpi tulevassa säteilyssä merkit kaasukehässä olevista molekyyleistä ovat heikommat. Tämä lisää eksoplaneetan lämpöoloista ja koostumuksesta tehtävän arvion epävarmuutta. Parhaiten havaintoja kaasukehän koostumuksesta voidaan siis suorittaa kaasukehän ollessa pilvetön. Puolestaan pilvisessä tilanteessa kaasukehän kaasujen määrä suhteessa toisiinsa sekä kaasujen määrä eri korkeuksilla vaikuttaa siihen, mitä kaasuja lopulta pystytään havainnoimaan riittävällä tarkkuudella. Runsaammat pitoisuudet pilvien alapuolisessa kaasukehässä voivat jäädä siis jopa täysin havaitsematta.

Pilvien vaikutuksesta herääkin kysymys tämän tutkimuksen tulosten luotettavuudesta. Kaasukehämallinnuksen pohjana käytettiin molekyylien sekoitussuhteita, jotka tukivat sellaista kaasukehän tasapainotilaa, jossa oli mahdollista esiintyä havaittu määrä vettä.

Jos havainnot kaasukehän veden määrästä ovat olleet esimerkiksi pilvisyyden puolesta todellisuutta pienemmät, sillä jo veden 8,9 % sekoitussuhteella pilvien muodostuminen olisi tämän tutkimuksen tulosten valossa mahdollista, voisi todellinen vesihöyryn määrä olla suurempi. Tällöin myös muiden kaasujen sekoitussuhteet olisivat erilaiset. Eri koostumus johtaisi puolestaan erilaisen tasapainotilan kehittymiseen. Erilainen tasapainotila voi puolestaan vaikuttaa eksoplaneetan lämpöoloihin ja elinkelpoisuuteen. Eri koostumus vaatisi mallinnuksen eri lähtöarvoilla. Jos kyseessä olisi vain muutos yhden kaasun, kuten vesihöyryn määrässä, tämän tutkimuksen tulokset viittaavat siihen, että eroa kaasukehän lämpötilan pystyjakaumassa todennäköisesti syntyisi. Näin tapahtui esimerkiksi kokeilussa nostaa veden sekoitussuhde 20,0 %:iin. Yleiskuva kaasukehästä pysyisi todennäköisimmin samankaltaisena, kunnes muutettavan kaasukehän koostumuksen tuoman lämmityksen tai kylmenemisen keikahduspiste saavutettaisiin. Sitä ei pystytä kuitenkaan tässä toteamaan, kuinka paljon uusien kaasujen lisääminen mallinnukseen muuttaisi kaasukehän yleiskuvaa rakenteen ja kehittyvän koostumuksen suhteen.

Kyseenalaiseksi jäi myös Atmos-mallin tulosten luotettavuus tapaustutkimuksen eksoplaneetan osalta, kun vesihöyryä oli runsaasti. Vaikka kokonsa puolesta K2-18b kuului Atmos-mallin varteenotettavan mallinnuskyvyn piiriin, K2-18b:n tyyppi aiheuttaa epävarmuutta tuloksissa. Atmos on ensisijaisesti kiviplaneetoille suunniteltu malli, mitä K2-18b saattaa myös olla, mutta on myös mahdollista, että K2-18b:n on koostumukseltaan enemmän kaasuplaneetan kaltainen. Kaasukehä voisi jatkua odotettua syvemmälle, jolloin pinnan lämpötila ja paine olisivat myös korkeammat. Lisäksi Atmos-mallin ohjelmakoodin tarkastelu paljasti, että mallin tapa käsitellä kaasukehää riippuu myös tutkittavalle kaasukehälle ilmoitetusta koostumuksesta. Malli ymmärryksen mukaan käsittelee kaasukehää ja sen hapen määrä riippuen siitä, millainen koostumus kaasukehälle on asetettu ja mihin luokkaan Atmos tutkittavan planeetan kaasukehän koostumuksen perusteella asettaa. Epäilen, että tämä on voinut vaikuttaa Atmosin mallinnuksissa tuottaman kaasukehän hapen määrään, vaikka happea ei ole lähtötilassa kaasukehän osaksi asetettu. Tarkoitettua suurempi hapen määrä on voinut mallinnuksissa toimia lähteenä otsonille, jonka sormenjälki oli erotettavissa Exo-Transmitin mallinnuksissa. Atmos-mallin aiheuttaman epävarmuuden takia alineptunus luokkaan kuuluvan K2-18b:n kaasukehää kannattaisi tutkia myös toisten kaasukehämallien avulla.

7 Yhteenveto

Eksoplaneettojen kaasukehätutkimuksessa säteilyhavainnot ovat keskeinen tiedonlähde. Säteilyn spektri sisältää tietoa, mitä kaasuja eksoplaneetalla esiintyy ja millaiset olosuhteet kaasukehässä vallitsevat. Yksi tapa, jolla olosuhteita pystytään arvioimaan, on säteilyn vaimenemisen merkit transmissiospektrissä. Eri kaasujen absorptiosormenjäljistä voidaan tehdä arvioita kaasukehän lämpötilasta sekä sironnan merkeillä tutkia aerosolien esiintymistä ja mahdollisesti selvittää kaasukehän paine. Arvioiden tekemisessä ilmenee tosin ongelmia, jos kaasukehässä esiintyy pilviä. Pilvet voivat estävää säteilyhavaintojen tekemisen niiden alle jäävistä ilmakerroksista jopa kokonaan, jolloin säteilyyn välittyvät tiedot kaasukehän ominaisuuksista jäävät vajaiksi. Pilvien vaikutuksia kaasukehään ja sen havainnointiin on siis syytä tutkia, että ymmärrämme eksoplaneetoista tehtyjä havaintoja paremmin ja niistä tekemämme arviot elinkelpoisuudesta ovat luotettavammat.

Pilvien vaikutusta eksoplaneettojen elinkelpoisuuteen lähestyttiin tutkimalla kaasukehän käytöstä yksiulotteisella Atmos-mallilla. Tapaustutkimusplaneettana käytettiin supermaapalloksi tai alineptunukseksi luokitettavaa K2-18b:tä. Kaasukehää mallinnettiin erilaisilla havaituilla ja teoreettisilla veden sekoitussuhteilla, jotka vaihtelivat 0 % ja 20 % välillä. Vesihöyryn määrästä riippumatta saatiin tulos, että K2-18b:n on pintaolosuhteidensa puolesta elinkelpoinen. Pintalämpötila vaihteli mallinnoissa 338 K ja 339 K välillä pintapaineen ollessa maapallon kaltainen, eli olosuhteet suosivat nestemäisen veden mahdollista esiintymistä eksoplaneetan pinnalla. Veden sekoitussuhteen ollessa 20,0% mallinnus sai aikaan keskimääräisesti viileimmät lämpöolot mallinnoituksen alimmalla tasolla eli oletetun pinnan tasolla. Pois ei voi sulkea mahdollisuutta, että suhteessa suurempi vesihöyryn määrä muihin mallinnoisiin verrattuna on ajanut kaasukehämallin epävakaiseen tilaan, ja syntynyt tulos on kyseenalainen eikä edusta mallilla tavoiteltavaa tasapainotilaa. Tutkimuksen aikana selvisi, ettei kokonaisvaltaista arviota kaasukehän pilvien vaikutuksista elinkelpoisuuteen voi Atmos-mallilla tehdä. Vaikka pilvien heijastava vaikutus voidaan huomioida, pilvien takaisinsäteilyn vaikutusta pintaolosuhteisiin ei sen vastapainona ole mallissa huomioitu.

Pilviä muodostui vain runsasvetisemmissä mallinnoissa, joissa veden sekoitussuhde ilmassa oli 8,9 % ja 20,0 %. Suuremman kosteussisällön voi todeta johtavan todennäköisempään pilvien kehittymiseen. Runsaammalla veden määrällä troposfäärissä ylöspäin liikuttaessa pienempi ilman viileneminen riitti kastepisteen saavuttamiseen. Kastepiste saavutettiin tropopausin alapuolella keskimäärin $1,05 \times 10^{-4}$ baarin tasolta vesihöyryn sekoitussuhteen ollessa 20,0 %, ja hieman korkeammalla $7,66 \times 10^{-5}$ baarin tasolta sekoitussuhteen ollessa 8,9 %.

Pilvien vaikutusta transmissiospektriin pystyttiin tutkimaan mallinnettujen P-T-profiilien, kaasukehän koostumuksen ja malliin asetettujen pilvitasojen avulla. Vaikka pilvisen Exo-Transmit-mallin antamasta spektrin ratkaisusta puuttuu planeetan pinnan ja pilvien tason välisen kaasukehän ja sen pilvien vaikutus säteilyyn, pystyttiin tekemään selvä havainto pilvien vaikutuksesta kaasukehän havainnointiin ja elinkelpoisuuden määrittämiseen. Odotetusti pilvet vaikeuttavat havainnointia, sillä ne peittävät voimakkaimmin absorboivan osan kaasukehästä alleen, jolloin monien molekyylien absorptiosormenjäljet vaimenevat huomattavasti tai jopa katoavat. Koska absorption

voimakkuus riippuu lämpötilasta, pilvien takia heikommat absorption merkit voivat johtaa aliarvioimaan kaasukehän lämpötilaa sekä siinä esiintyvien kaasujen määrää. Pilvien harhaanjohtamat arviot voivat täten johtaa tekemään kaasukehämallinnuksia, joiden tuloksena olisi vääristyt arvio eksoplaneetan elinkelpoisuudesta. Kylmempi arvio voisi jättää kauempana tähestä sijaitsevia eksoplaneettoja elinkelpoisen vyöhykkeen ulkopuolelle, vaikka todellisuudessa lämpöolot pilvien alla olisivatkin veden esiintymiselle suotuisat. Toisessa ääripäässä on mahdollista, että elinkelpoisuuden suhteen liian kuumat eksoplaneetat vaikuttaisivat pilvien peittämänä todellisuutta viileämmiltä sekä täten elinkelpoisilta

Jotta pilvien vaikutushavaintoihin ei rajaisi etenkään täysin elinkelpoisia ja tutkimisen arvoisia eksoplaneettoja näennäisesti elinkelpoisten raja-arvojen ulkopuolelle, koen, että on tärkeää tutkia tulevaisuudessa, kuinka eksoplaneettojen pilvien alapuolisesta kaasukehästä voitaisiin saada luotettavia arvioita. Uskon, että olisi hyvä myös kartoittaa lisää erilaisia merkkejä, joita pilvisyys voi havaintoihin jättää. On tärkeää kerätä tarkempaa ja luotettavampaa tietoa etukäteen, ennen kuin alamme lähettää luotaimia mielestämme kiinnostavimmille eksoplaneetoille elinkelpoisen määränpään toivossa.

8 Kirjallisuusluettelo

American Meteorological Society, Glossary of meteorology. Saatavissa: <https://glossary.ametsoc.org> (Viitattu: 4.9.2024).

Arney, G. et al. (2016) ‘The Pale Orange Dot: The spectrum and habitability of Hazy Archean Earth’, *Astrobiology*, 16(11), pp. 873–899. doi:10.1089/ast.2015.1422.

Benneke, B. et al. (2019) ‘Water vapor and clouds on the habitable-zone Sub-Neptune exoplanet K2-18B’, *The Astrophysical Journal Letters*, 887(1). doi:10.3847/2041-8213/ab59dc.

Benneke, B. & Seager, S. (2012) ‘Atmospheric retrieval for SUPER-EARTHS: Uniquely constraining the atmospheric composition with transmission spectroscopy’, *The Astrophysical Journal*, 753(2), p. 100. doi:10.1088/0004-637x/753/2/100.

Bitsch, B., Lambrechts, M. & Johansen, A. (2015) ‘The growth of planets by pebble accretion in evolving protoplanetary discs’, *Astronomy & Astrophysics*, 582. doi:10.1051/0004-6361/201526463.

Brande, J. et al. (2024) ‘Clouds and clarity: Revisiting atmospheric feature trends in Neptune-size exoplanets’, *The Astrophysical Journal Letters*, 961(1). doi:10.3847/2041-8213/ad1b5c.

CDS portal, K2-18. Available at: <http://cdsportal.u-strasbg.fr/?target=K2-18> (Viitattu: 15.11.2024).

Chen, T., Rossow, W.B. & Zhang, Y. (2000) ‘Radiative effects of cloud-type variations’, *Journal of Climate*, 13(1), pp. 264–286. doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<0264:reoctv>2.0.co;2

Cohen, M. et al. (2023) ‘Traveling planetary-scale waves cause cloud variability on tidally locked Aquaplanets’, *The Planetary Science Journal*, 4(4), p. 68. doi:10.3847/psj/acc9c4.

Crossfield, I.J. (2015) ‘Observations of exoplanet atmospheres’, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 127(956), pp. 941–960. doi:10.1086/683115.

ESAa, Ariel factsheet. Available at: https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Ariel_factsheet (Viitattu: 4.9.2024).

ESAb, A zoo of exoplanets, Exoplanets. Available at: <https://sci.esa.int/web/exoplanets/-/60656-a-zoo-of-exoplanets> (Viitattu: 27.5.2024).

ESO, Library of Stellar Spectra. Available at: <https://www.eso.org/sci/facilities/paranal/decommissioned/isaac/tools/lib.html> (Viitattu: 15.11.2024).

EXOkyoto, Extrasolar Planet's Catalogue, K2-18b, Kyoto University. Saatavissa: https://www.exoplanetkyoto.org/exohtml/K2-18_b.html (Viitattu: 15.11.2024).

Freedman, R.S., Lustig-Yaeger, J., Fortney, J. J., et al. (2014) 'Gaseous mean opacities for giant planet and ultracool dwarf atmospheres over a range of metallicities and temperatures', *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 214(2), p. 25. doi:10.1088/0067-0049/214/2/25.

Freedman, R.S., Marley, M.S. & Lodders, K. (2008) 'Line and mean opacities for ultracool dwarfs and extrasolar planets', *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 174(2), pp. 504–513. doi:10.1086/521793.

Helling, C. (2019) 'Exoplanet clouds', *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 47(1), pp. 583–606. doi:10.1146/annurev-earth-053018-060401.

IAU, Pluto and the Developing Landscape of Our Solar System. Available at: <https://www.iau.org/public/themes/pluto/> (Viitattu: 27.5.2024).

Ih, J. et al. (2023) 'Constraining the thickness of TRAPPIST-1 B's atmosphere from its JWST secondary eclipse observation at 15 μm ', *The Astrophysical Journal Letters*, 952(1). doi:10.3847/2041-8213/ace03b.

IPAC, NASA Exoplanet Archive. Saatavissa: <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/> (Viitattu: 17.12.2024).

Kaspi, Y. & Showman, A.P. (2015) 'Atmospheric Dynamics of terrestrial exoplanets over a wide range of orbital and atmospheric parameters', *The Astrophysical Journal*, 804(1), p. 60. doi:10.1088/0004-637x/804/1/60.

Kempton, E.M.-R. et al. (2017) 'Exo-Transmit: An open-source code for calculating transmission spectra for exoplanet atmospheres of varied composition', *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 129(974), p. 044402. doi:10.1088/1538-3873/aa61ef.

Kempton, E.M.-R., Lupu, R. E., Owusu-Asare, A., Slough, P., & Cale, B. (2017) 'Exo-Transmit: An open-source code for calculating transmission spectra for exoplanet atmospheres of varied composition', *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 129(974), p. 044402. doi:10.1088/1538-3873/aa61ef.

Kopparapu, R.K. et al. (2013) 'Habitable zones around main-sequence stars: New estimates', *The Astrophysical Journal*, 765(2), p. 131. doi:10.1088/0004-637x/765/2/131.

Kopparapu, R.K. et al. (2018) ‘Exoplanet Classification and yield estimates for direct imaging missions’, *The Astrophysical Journal*, 856(2), p. 122. doi:10.3847/1538-4357/aab205.

Line, M., Quanz, S.P., Schwieterman, E.W. et al. (2019). ‘The Importance of Thermal Emission Spectroscopy for Understanding Terrestrial Exoplanets’, *Bulletin of the American Astronomical Society*, 51(3), 271. 2019BAAS...51c.271L

Lupu, R.E., Zahnle, K., Marley, M. S., et al. (2014) ‘The atmospheres of earthlike planets after giant impact events’, *The Astrophysical Journal*, 784(1), p. 27. doi:10.1088/0004-637x/784/1/27.

Madhusudhan, N. et al. (2023) ‘Carbon-bearing molecules in a possible Hycean atmosphere’, *The Astrophysical Journal Letters*, 956(1). doi:10.3847/2041-8213/acf577.

Merriam-Webster, Jovian definition & meaning. Available at: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/Jovian> (Viitattu: 27.5.2024).

Montet, B.T. et al. (2015) ‘Stellar and planetary properties of K2 campaign 1 candidates and validation of 17 planets, including a planet receiving Earth-like insolation’, *The Astrophysical Journal*, 809(1), p. 25. doi:10.1088/0004-637x/809/1/25.

NASAa, NASA’s Hubble telescope makes first atmospheric study of Earth-sized exoplanets (2023). Available at: <https://www.nasa.gov/news-release/nasas-hubble-telescope-makes-first-atmospheric-study-of-earth-sized-exoplanets/> (Viitattu: 4.9.2024).

NASAb, What is an Exoplanet?. Available at: <https://science.nasa.gov/exoplanets/planet-types/> (Viitattu: 27.5.2024).

Pallé, E. et al. (2008) ‘Identifying the rotation rate and the presence of dynamic weather on extrasolar earth-like planets from photometric observations’, *The Astrophysical Journal*, 676(2), pp. 1319–1329. doi:10.1086/528677.

Perryman, M.A.C. (2018) *The exoplanet handbook*. Cambridge: Cambridge University Press.

Pinhas, A. & Madhusudhan, N. (2017) ‘On signatures of clouds in Exoplanetary Transit Spectra’, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 471(4), pp. 4355–4373. doi:10.1093/mnras/stx1849.

Robinson, T.D. (2018) ‘Characterizing exoplanet habitability’, *Handbook of Exoplanets*, pp. 3137–3157. doi:10.1007/978-3-319-55333-7_67.

Rose, B.E.J. (2022) *Clouds and cloud feedback*, The Climate Laboratory. Available at: <https://brian-rose.github.io/ClimateLaboratoryBook/courseware/clouds.html> (Viitattu: 19.8.2024).

Sánchez-Lavega, A., Pérez-Hoyos, S. & Hueso, R. (2004) 'Clouds in planetary atmospheres: A useful application of the clausius–clapeyron equation', *American Journal of Physics*, 72(6), pp. 767–774. doi:10.1119/1.1645279.

Seager, S. (2010) *Exoplanet atmospheres: Physical processes*. Princeton, N.J: Princeton University Press.

Seager, S. et al. (2015) 'The Exo-S Probe Class Starshade Mission', *SPIE Proceedings*, 9605, *Techniques and Instrumentation for Detection of Exoplanets VII*. doi:10.1117/12.2190378.

Sergeev, D.E. et al. (2022) 'The TRAPPIST-1 habitable atmosphere intercomparison (Thai). II. moist cases—the two Waterworlds', *The Planetary Science Journal*, 3(9), p. 212. doi:10.3847/psj/ac6cf2.

Showman, A.P. et al. (2013) 'Atmospheric circulation of terrestrial exoplanets', *Comparative Climatology of Terrestrial Planets*, pp. 277–326. University of Arizona, Tucson, doi:10.2458/azu_uapress_9780816530595-ch12.

The Engineering ToolBox (2004), Universal and Individual Gas Constants. Saatavissa: https://www.engineeringtoolbox.com/individual-universal-gas-constant-d_588.html (Viitattu: 19.12.2024)

Tinetti, G., Beaulieu, J.P., Henning, T. (2012) 'Echo', *Experimental Astronomy*, 34(2), pp. 311–353. doi:10.1007/s10686-012-9303-4.

VirtualPlanetaryLaboratory, Atmos, GitHub. Saatavissa: <https://github.com/VirtualPlanetaryLaboratory/atmos> (Viitattu: 11.9.2024).

Waltham, D. (2017) 'Star Masses and star-planet distances for Earth-like habitability', *Astrobiology*, 17(1), pp. 61–77. doi:10.1089/ast.2016.1518.

Windsor, J.D. et al. (2023) 'A radiative-convective model for terrestrial planets with self-consistent patchy clouds ', *The Planetary Science Journal*, 4(5), p. 94. doi:10.3847/psj/acbf2d.