



Universiteit
Leiden

The Netherlands

Pushing the characterization of exoplanet atmospheres down to temperate rocky planets in the era of JWST

Zieba, S.

Citation

Zieba, S. (2024, June 25). *Pushing the characterization of exoplanet atmospheres down to temperate rocky planets in the era of JWST*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3765836>

Version: Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/3765836>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

DEUTSCHE ZUSAMMENFASSUNG

„Woher kommen wir? Wer sind wir? Wohin gehen wir?“ Die Erforschung der Planeten innerhalb und außerhalb unseres Sonnensystems ist ein wesentlicher Bestandteil zur Beantwortung dieser grundlegenden Fragen der Menschheit. Die Astronomie als Ganzes beleuchtet die Vielfalt des Kosmos und unseren Platz darin. In meinem Forschungsbereich tun wir dies, indem wir Planeten außerhalb unseres Sonnensystems, so genannte Exoplaneten, charakterisieren. Indem wir etwas über ihre Entstehung, Entwicklung, Zusammensetzung und Bewohnbarkeit erfahren, lernen wir letztlich etwas über unseren Ursprung, die Zukunft unseres eigenen Planeten und seine Einzigartigkeit. Der heilige Gral der Exoplanetenforschung besteht letztlich darin, festzustellen, ob die Erde und das Leben, wie wir es kennen, selten oder allgegenwärtig sind. Die Wissenschaftler werden sich darüber streiten, wann wir endlich einen „Erd-Zwilling“ finden werden, der Leben, wie wir es kennen, beherbergen könnte, aber so nah waren wir diesem Ziel sicher noch nie.

Es ist bemerkenswert, wie viel wir in nur wenigen Jahrzehnten über diese fernen Welten gelernt haben: Seit der ersten Entdeckung von Exoplaneten in den 1990er Jahren sind uns derzeit mehr als 5 500 Planeten bekannt. Es wurden boden- und weltraumgestützte Teleskope und Instrumente gebaut, um diese Planeten zu entdecken. In der Regel können wir die Exoplaneten jedoch nicht direkt sehen. Sie sind zu nahe an ihren Wirtssternen, die um Größenordnungen heller sind. Daher ist es immer noch eine Herausforderung, Planeten um ihre Sterne herum räumlich aufzulösen. Häufiger beobachten wir das kombinierte Licht beider Quellen — des Sterns und des Planeten —, das uns eine ganze Reihe von Planeteneigenschaften liefern kann, von grundlegenden Eigenschaften wie Größe und Masse bis hin zu Merkmalen wie der atmosphärischen Zusammensetzung, der Wärmeverteilung oder dem Reflexionsvermögen. Die NASA hat Weltraummissionen wie das Kepler-Weltraumteleskop im Jahr 2009 und den Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS) im Jahr 2018 gestartet, um diese fernen Welten zu entdecken und ihre Größe zu messen. Diese Teleskope nutzten eine Technik, die als „Transitmethode“ bezeichnet wird und die darauf beruht, dass das System so ausgerichtet ist, dass der Planet seinen Wirtsstern in regelmäßigen Abständen verdeckt — oder „transitiert“. Während eines solchen Transits verdeckt der Exoplanet von der Erde aus gesehen die Sternscheibe, was zu einer beobachteten Abnahme des Lichtstroms führt. Diese Methode war bisher die erfolgreichste, was auf die einfache Skalierbarkeit des Problems zurückzuführen ist: Man muss nur ein empfindliches Teleskop auf den Himmel richten und die Helligkeit der Sterne im Sichtfeld im Laufe der Zeit aufzeichnen, um neue Planeten zu entdecken. Eine andere Technik, die Radi-

algeschwindigkeitsmethode, kann uns dann die Planetenmassen liefern. Aus den gemessenen Radien und Massen können wir die durchschnittliche Dichte des Planeten ableiten, die uns Aufschluss über seine Zusammensetzung gibt: Ein Planet mit einem großen Eisenkern hat eine höhere Dichte als ein Planet, der von Silikaten dominiert wird und einen kleinen Kern hat. Die meisten felsigen Exoplaneten haben eine erdähnliche Zusammensetzung, d. h. sie bestehen zu etwa 30 % aus Eisen und zu 70 % aus „Gestein“ oder Silikaten. Bei Planeten, die größer als das 1,6-fache des Erdradius sind, wird davon ausgegangen, dass sie eine Wasserstoffatmosphäre bewahrt haben und ein erheblicher Teil ihrer Masse in Gasform vorliegt. Diese Planeten dürften auch geschmolzene Oberflächen haben, da der Druck mit abnehmender Höhe stark zunimmt. Sobald man die Oberfläche erreicht, ist die Temperatur zu hoch, um eine feste, ungeschmolzene Oberfläche zu haben. Dies ist der Grund, warum wir diese größeren Welten nicht als felsig betrachten.

Doch obwohl wir die Dichte von Gesteinsplaneten messen und ihre Zusammensetzung kennen, wissen wir immer noch nicht viel über die Zusammensetzung der Atmosphären von Kleinplaneten und darüber, wie oft diese Welten Atmosphären beibehalten. Zu den "Great Observatories", die von der NASA zwischen 1990 und 2003 in Betrieb genommen wurden, gehörten zwei Weltraumteleskope, die im letzten Jahrzehnt zu den wichtigsten Geräten für die Charakterisierung von transitierenden Exoplaneten wurden: Das Hubble-Weltraumteleskop wurde 1990 an Bord des Space Shuttle Discovery mit einer Öffnung von 2,4 Metern gestartet, das Spitzer-Weltraumteleskop 2003 mit einem 85-cm-Spiegel. Im Weltraum vermeiden die Teleskope die Kontamination durch den thermischen Infrarot-Hintergrund der Erde, was präzise Infrarotbeobachtungen ermöglicht. Obwohl beide Teleskope nie für die Erforschung von Exoplaneten konzipiert waren, konnten dank ausgeklügelter Datenverarbeitungsroutinen und — im Falle von Hubble — durch Nachrüstungen während der Hubble-Wartungsmissionen viele Exoplaneten von Jupitergröße und auch kleinere Exoplaneten atmosphärisch charakterisiert werden.

Nachdem das Spitzer-Weltraumteleskop im Januar 2020 abgeschaltet wurde, verlor die Exoplanetengemeinschaft die Möglichkeit, Exoplaneten in Transmission oder Emission im Infraroten bei Wellenlängen von mehr als 2 Mikrometern vom Weltraum aus zu beobachten. Dies war ein großer Verlust, da Moleküle wie Wasser (H_2O) oder Kohlenstoffdioxid (CO_2), an denen wir in der Atmosphäre anderer Planeten interessiert sind, charakteristische Merkmale im Infraroten aufweisen. Die starke Absorption von Kohlenstoffdioxid wurde von dem Astrophysiker und Wissenschaftskommunikator Carl Sagan erwähnt, als er 1985 vor dem Kongress über den Klimawandel aussagte. Es folgt ein direktes Zitat von Carl Sagan, als er sich während der Anhörung an die Kongressmitglieder wandte:

„Die Luft zwischen uns ist durchsichtig, außer in Los Angeles und anderen Orten dieser Art. Im normalen sichtbaren Teil des Spektrums können wir uns gegenseitig sehen. Aber wenn unsere Augen empfindlich wären, sagen wir, bei 15 Mikrometern im Infraroten, könnten wir einander nicht sehen. Die Luft zwischen uns wäre schwarz. Und das liegt in diesem Fall am Kohlenstoffdioxid. Kohlenstoffdioxid absorbiert sehr stark bei 15 Mikrometern. Und auch bei anderen Wellenlängen im Infraroten. Ebenso gibt es Bereiche des Infrarotspektrums, in denen

Wasserdampf absorbiert, in denen wir uns nicht sehen könnten, wenn wir so weit voneinander entfernt wären, wie wir es in diesem Raum sind.“

Die Suche nach Atmosphären auf felsigen Exoplaneten, die Moleküle wie Wasser, Kohlendioxid oder Sauerstoff enthalten, erfordert ein präzises Infrarotteleskop. Glücklicherweise wurde das JWST nach vielen Verzögerungen am Weihnachtstag 2021 gestartet und bietet den Wissenschaftlern nun wieder die Möglichkeit, Planeten in diesen Infrarot-Wellenlängen mit noch nie dagewesener Präzision zu untersuchen. Seine bahnbrechende Präzision ist auf viele Faktoren zurückzuführen, wie z. B. einen großen Spiegeldurchmesser von 6,5 Metern und die thermische Stabilität des Teleskops. JWST gibt uns daher zum ersten Mal die Möglichkeit, auf gemäßigten felsigen Welten nach Atmosphären mit einem hohen mittleren Molekulargewicht aus Kohlenstoffdioxid (CO_2), Sauerstoff (O_2) und Stickstoff (N_2) zu suchen.

Es gibt im Allgemeinen zwei Techniken zur Untersuchung der Atmosphären von transitierenden Exoplaneten. Die erste Methode, die während eines Transits zum Einsatz kommt, wird Transmissionsspektroskopie genannt: Wenn ein Planet seinen Wirtsstern aus unserer Sicht als Beobachter verdeckt, durchdringt ein Teil des Sternenlichts die Atmosphäre des Planeten, falls es eine gibt. Bestimmte Wellenlängen werden dabei von den Bestandteilen der Atmosphäre absorbiert. Diese fehlenden Wellenlängen werden dann von uns beobachtet, und wir können auf die Elemente und Moleküle schließen, aus denen die Gashölle um den Planeten besteht. Die andere Methode zur Charakterisierung der Atmosphären von Exoplaneten findet etwa eine halbe Umlaufbahn nach dem Transit statt, wenn der Planet hinter seinem Wirtsstern verschwindet; wir nennen das eine „Bedeckung“. Während der Bedeckung selbst beobachten wir nur das Licht des Sterns. Der vom Planeten ausgesandte Lichtstrom wird durch den Stern verdeckt. Unmittelbar bevor und nachdem sich der Planet hinter seinem Stern versteckt, beobachten wir jedoch die Emission, die von der Tagseite des Planeten ausgeht. Anhand dieses Guck-guck-Spieles mit dem Planeten messen wir ein Emissionsspektrum — die Methode wird daher als Emissionsspektroskopie bezeichnet — und können Elemente oder Moleküle in der Atmosphäre des Planeten nachweisen oder direkt seine Oberfläche untersuchen. Wenn wir die Emissionen untersuchen, die nicht nur von der Tagseite des Planeten, sondern auch von den anderen Seiten des Planeten während der Umlaufbahn des Planeten um seinen Wirtsstern ausgehen, beobachten wir eine so genannte Phasenkurve. Diese Art von Beobachtungen kann uns dann Aufschluss über globale Prozesse wie den Wärmetransport durch die Winde in der Planetenatmosphäre geben.

K2- und Spitzer-Phasenkurven des ultrakurzperiodischen Gesteinsplaneten K2-141 b deuten auf eine dünne Gesteinsdampfatmosphäre hin

In Kapitel 2 haben wir mit Spitzer eine solche Phasenkurve für einen Lava-Exoplaneten namens K2-141 b beobachtet. Diese Lavaplaneten zeichnen sich durch sehr kurze Umlaufzeiten und sehr heiße Tagessseiten aus. Bei einer Umlaufzeit von nur 7 Stunden wird der Planet von seinem Stern so stark aufgeheizt, dass die durchschnittliche Tagessseitentemperatur bei über 2000 Kelvin liegt. Das reicht

aus, um das Gestein auf der Planetenoberfläche zu schmelzen, was zu einem tageseitigen Magmaozean und möglicherweise zu einer dünnen Gesteinsdampf-atmosphäre führt, die durch die Verdampfung von Gestein entsteht. Letzteres ist besonders interessant, da die Untersuchung der verdampften Atmosphäre möglicherweise Aufschluss über die Zusammensetzung der Planetenoberfläche geben könnte. In meiner Arbeit habe ich frühere Kepler-Beobachtungen von K2-141 b mit neuen Spitzer-Daten kombiniert. Das Weltraumteleskop Spitzer hat den Stern etwa 70 Stunden lang beobachtet und dabei 10 kontinuierliche Umläufe des Planeten erfasst. Durch die Kombination der optischen Daten von Kepler mit den Infrarotbeobachtungen von Spitzer können wir die von Kepler beobachtete tiefe Bedeckung vorläufig auf eine solche Gesteinsdampf-atmosphäre zurückführen. Die wahre Beschaffenheit des Planeten kann jedoch nur durch weitere Beobachtungen festgestellt werden. Glücklicherweise wurden bereits JWST-Beobachtungen des Planeten durchgeführt, und die Auswertung ist derzeit im Gange. Aufgrund seiner Wellenlängenabdeckung und Präzision wird JWST unser Verständnis der Atmosphären von Lavaplaneten verbessern.

PACMAN: Eine Pipeline zur Reduzierung und Analyse von Hubble Wide Field Camera 3 IR Grism Daten

In Kapitel 3 stelle ich ein öffentlich zugängliches Werkzeug vor, mit dem Astronomen auf Exoplanetenbeobachtungen zugreifen und diese verarbeiten können, die von einem der Instrumente des Hubble-Weltraumteleskops aufgenommen wurden. Der ursprüngliche Code wurde in den letzten zehn Jahren in vielen Publikationen verwendet und ist nun unter dem Namen PACMAN für jedermann zugänglich. Das Hubble-Instrument Wide Field Camera 3 (WFC3) wurde während einer Wartungsmission im Jahr 2009 installiert. Der Spektralbereich der WFC3 erfasst vor allem die molekulare Infrarotabsorption von Wasser, was den erfolgreichen Nachweis von Wasser in den Atmosphären von über einem Dutzend Exoplaneten ermöglichte. Die Analyse von Hubble-Daten stellt jedoch eine Herausforderung dar, da verschiedene Codes (auch: Pipelines) in der Vergangenheit zu widersprüchlichen Ergebnissen in der Literatur geführt haben. Um die Reproduzierbarkeit von Forschungsergebnissen zu gewährleisten, ist es gute wissenschaftliche Praxis, die für die Datenreduktion und -analyse verwendeten Programme als Open-Source-Software anzubieten. Dieser Ansatz erleichtert den Vergleich verschiedener Pipelines und senkt die Hürden für Neulinge auf dem Gebiet der Exoplanetenatmosphären. Der Quellcode von PACMAN und Beispiele für die Verwendung des Codes, um ein Transmissions- oder Emissionsspektrum eines Exoplaneten zu erhalten, sind daher online zu finden.

Keine dicke Kohlenstoffdioxidatmosphäre auf dem felsigen Exoplaneten TRAPPIST-1 c

In Kapitel 4 haben wir eines der ersten Ergebnisse von JWST veröffentlicht, das einen felsigen Exoplaneten analysiert und Einblicke in seine atmosphärische Beschaffenheit bietet. In den letzten Jahrzehnten hat sich unser Verständnis von Exoplaneten erheblich erweitert und gezeigt, dass kleine Planeten in der Milchstraße recht häufig sind. Man schätzt, dass etwa 20 bis 50 % der Sterne einen

Planeten von ähnlicher Größe wie die Erde beherbergen. Die Messung der Dichte dieser Exoplaneten lässt den Schluss zu, dass sie in der Regel eine ähnliche Gesteinszusammensetzung wie unser eigener Planet aufweisen. Unser Wissen über die atmosphärische Zusammensetzung dieser terrestrischen Planeten ist jedoch nach wie vor begrenzt, und wir wissen immer noch nicht, wie oft Gesteinsplaneten ihre Atmosphären behalten. Dank der Fähigkeiten von JWST können wir nun nach weiteren erdähnlichen Atmosphären suchen, die aus Molekülen wie Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff und Stickstoff bestehen. Von besonderem Interesse für die Astronomen ist ein System namens TRAPPIST-1. Dieser nahe gelegene, kleine Stern beherbergt sieben transitierende terrestrische Planeten, was uns die Möglichkeit bietet, kleine Planeten mit einer ganzen Reihe von Temperaturen zu untersuchen. Von diesen Planeten kreisen drei in der Region um den Stern, in der die Temperaturen für flüssiges Wasser auf der Planetenoberfläche geeignet sein könnten, der so genannten bewohnbaren Zone. Aufgrund der Nähe des Sterns, der geringen Größe und der relativ niedrigen Temperatur sind die Planeten ideale Kandidaten für eine Charakterisierung der Atmosphäre. Dies bietet uns eine einzigartige Gelegenheit, nach Atmosphären auf kleinen Planeten außerhalb des Sonnensystems zu suchen. Es ist erwähnenswert, dass kleine Sterne wie TRAPPIST-1 die häufigste Art von Sternen in der Milchstraße sind. Daher ist die Frage, ob Planeten, die kleine Sterne umkreisen, ihre Atmosphären behalten können, derzeit eine der wichtigsten offenen Fragen auf dem Gebiet der Exoplaneten. Wenn wir herausfinden, dass Planeten, die diese Sterne umkreisen, tatsächlich während ihrer gesamten Existenz eine beträchtliche Atmosphäre behalten haben, wäre dies ein hoffnungsvoller Hinweis auf die mögliche Bewohnbarkeit der zahlreichen Gesteinsplaneten, die von kleinen Sternen beherbergt werden. Wenn wir jedoch feststellen, dass Planeten um kleine Sterne keine Atmosphären haben, könnte dies darauf hindeuten, dass sonnenähnliche Sterne eine günstigere Umgebung für die Entstehung von Leben bieten. Um bei der Lösung dieser offenen Fragen einen Schritt weiterzukommen, haben wir mit dem Mid-Infrared Instrument (MIRI) an Bord des JWST vier Beobachtungen des Exoplaneten TRAPPIST-1 c beobachtet. Bei unseren Beobachtungen nutzten wir die starke Absorption von CO₂ bei 15 Mikrometern (wie in dem obigen Zitat von Carl Sagan erwähnt), um nach einer Atmosphäre auf TRAPPIST-1 c zu suchen. Wir können keine starke Absorption durch CO₂ feststellen, was uns dazu veranlasst, bestimmte atmosphärische Szenarien auszuschließen, insbesondere solche, die von CO₂ dominiert werden. Stattdessen stimmen unsere Ergebnisse eher mit dünneren Atmosphären oder blankem Gesteinsoberflächen überein. So können wir zum Beispiel eine Atmosphäre auf TRAPPIST-1 c, die der eines schlecht belüfteten Raumes ähnelt, d.h. CO₂-Konzentrationen von 1000 ppm auf Meereshöhe, sicher ausschließen. Interessanterweise ist TRAPPIST-1 c, der außerhalb der bewohnbaren Zone des Sterns liegt, in Bezug auf Größe, Masse und Sterneinstrahlung ähnlich wie die Venus. Eine der wichtigsten wissenschaftlichen Entdeckungen dieses Kapitels ist, dass der Planet im Gegensatz zur Venus keine Hochdruckatmosphäre hat, die hauptsächlich aus Kohlenstoffdioxid besteht. Dies ist die erste Studie zur Charakterisierung eines Exoplaneten, der der Venus ähnelt oder mit der Erde einigermaßen vergleichbar ist. Die Ergebnisse werden dazu beitragen, den Ursprung und die Entwicklung von Gesteinsplaneten, die kleine Sterne umkreisen,

zu verstehen, und so die künftige Erforschung dieser Systeme leiten.

Ein Hubble WFC3-Infrarot-Blick auf das Transmissionsspektrum des heißen, aufgeblähten Sub-Saturns KELT-11 b

In Kapitel 5 verwenden wir die in Kapitel 3 vorgestellte Open-Source-Pipeline PACMAN, um Hubble-Beobachtungen des heißen Jupiter-Exoplaneten KELT-11 b zu analysieren und mehr über seine atmosphärischen Eigenschaften zu erfahren. Dank der kurzen Umlaufzeit des Planeten und seiner hohen Gleichgewichtstemperatur ist er ein hervorragendes Ziel für Atmosphärenstudien. Wir haben uns das Sternenlicht angesehen, als der Planet vor seinem Stern vorbeizog, und analysiert, wie es sich in Abhängigkeit von der Wellenlänge und der Zeit verändert. Wir fanden heraus, dass eine übliche Methode zur Analyse der Spektren von transitierenden Exoplaneten, die von Hubble aufgenommen wurden, möglicherweise nicht immer zuverlässig ist. Das von uns beobachtete Transmissionsspektrum des Planeten deutete auch auf eine mögliche Kontamination durch den Stern selbst hin. Oberflächenmerkmale des Sterns, wie stellare Flecken, können das Spektrum beeinflussen — ein Phänomen, das häufig bei kleineren, kühleren Sternen beobachtet wird, bei größeren Sternen wie unserer Sonne jedoch weniger zu erwarten ist. Unsere Studie unterstreicht die Bedeutung einer robusten Datenreduktion und einer gründlichen Interpretation des Transmissionsspektrums von Planeten, selbst bei Zielen mit hohem Signal-Rausch-Verhältnis wie heißen Jupitern. Wird die Kontamination durch den Wirtstern nicht berücksichtigt, könnte dies zu Fehlinterpretationen führen, die dem Planeten atmosphärische Merkmale zuschreiben, die eigentlich von Molekülen in der Sternatmosphäre stammen.

Die β Pictoris b Hill Sphere Transit-Kampagne - II. Suche nach den Signaturen der β Pictoris-Exoplaneten durch Zeitverzögerungsanalyse der δ Scuti-Pulsationen

In Kapitel 6 schließlich untersuchen wir ein nahe gelegenes Planetensystem namens β Pictoris. Dieses System ist das nächstgelegene Sternsystem, in dem wir direkt Gasriesenplaneten entdeckt haben, zusammen mit einer faszinierenden zirkumstellaren Scheibe und Anzeichen von transitierenden Exokometen. Wir haben die stellaren Pulsationen des Sterns untersucht, um die Signaturen der bekannten Planeten β Pictoris b und c zu erkennen und auch nach noch unbekanntem Begleitern zu suchen. Ein Stern und seine Planeten umkreisen immer einen gemeinsamen Schwerpunkt, was zu einer kleinen periodischen Abstandsänderung zwischen uns und dem Wirtstern führt. Durch die Messung der Ankunftszeit der Sternpulsationen könnten wir periodisch verfrühte oder verspätete Ankünfte feststellen, die auf Begleiter hinweisen, die die Lichtlaufzeit der Signale verändern. Wir analysierten photometrische Daten von verschiedenen boden- und weltraumgestützten Observatorien, um die Stabilität der Pulsationen zu untersuchen. Aufgrund des starken Rauschens in den Daten konnten wir die Signale der Planeten nicht erkennen. Unsere Analyse deutet auch darauf hin, dass die Pulsationen des Sterns selbst im Laufe der Zeit driften, was es schwierig macht, Exoplaneten anhand der Pulsationszeiten von Sternen wie β Pictoris zu entdecken. Obwohl wir mit dieser Methode die Signaturen der Planeten nicht sehen konnten, wirft unsere Studie ein Licht auf die Grenzen und Möglichkeiten der Pulsationszeitmessung bei der

Entdeckung von Exoplaneten.

Frühere Beobachtungen felsiger Exoplaneten mit dem Hubble Space Telescope oder dem Spitzer Space Telescope konnten in erster Linie eine von Wasserstoff dominierte Zusammensetzung der Atmosphäre ausschließen. Dank der bemerkenswerten Fähigkeiten von JWST haben wir nun jedoch die Möglichkeit, realistischere, erdähnliche Atmosphären auf gemäßigten felsigen Welten zu finden. Die Häufigkeit und die Bedingungen, unter denen diese kleinen Welten Atmosphären besitzen, sind nach wie vor ungewiss. Wenn wir feststellen, dass Planeten, die kleine Sterne umkreisen, keine Atmosphären haben, könnte dies darauf hindeuten, dass sonnenähnliche Sterne eine günstigere Umgebung für die Entstehung von Leben bieten. In jedem Fall werden die bevorstehenden Entdeckungen mit JWST einen entscheidenden Meilenstein in unserem Verständnis der Atmosphären, Oberflächen und der potenziellen Bewohnbarkeit von Gesteinsplaneten darstellen. Auch wenn die Entdeckung von Biosignaturen auf beobachtbaren Exoplaneten mit JWST eine Menge Glück und Beobachtungszeit erfordert, sind die Aussichten für die kommenden Jahrzehnte mit dem Aufkommen der ELTs und potenziellen zukünftigen Missionen wie dem Habitable Worlds Observatory (HWO) und der ESA-Mission Large Interferometer For Exoplanets (LIFE) vielversprechend. Die zuverlässigste Methode, um festzustellen, ob ein terrestrischer Exoplanet eine Atmosphäre besitzt, ist die Untersuchung seiner Wärmeemission, seines reflektierten Lichts oder seines Transmissionsspektrums. Richten wir also unsere Observatorien auf Gesteinsplaneten und begeben wir uns auf diese Entdeckungsreise!