brgkepler

1.3.2024

Die Erforschung von Exoplaneten und ihrer Atmosphären

Kristóf Szilas

8dbiun
Bundesrealgymnasium Kepler
Keplerstraße 1, 8020 Graz, AT
betreuende Lehrperson: Mag. Norbert Steinkellner

Abstract

Die Forschung nach Exoplaneten ist eine der spannendsten Teilgebiete der Astrophysik, welche auch ohne komplizierte mathematische Berechnungen verständlich erklärt werden kann. In dieser vorwissenschaftlichen Arbeit wurde der Fokus auf die atmosphärischen Eigenschaften und Prozesse eines extrasolaren Planeten gelegt. Zudem werden im Folgenden die Instrumente zur Beobachtung und Analyse der Planeten genauer erklärt. Die vorliegende Arbeit ist entstanden unter der Zusammenarbeit mit 2 Berufsastronomen des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt. Unter anderem dienen Messungen und Forschungsergebnisse aus mehreren wissenschaftlichen Arbeiten, sowie Fachliteratur der Princeton University als Grundlage für die in der Arbeit beschriebenen physikalischen Prozesse und Entdeckungen. Diese vorwissenschaftliche Arbeit ist für jene Person, die mehr über Exoplaneten erfahren möchte, als es der Lehrplan allgemeinbildender Schulen vorsieht.

Danksagung

Ich möchte mich herzlichst bedanken für Ihre freundliche und hilfsbereite Zusammenarbeit bei:

Mag. Norbert Steinkellner (BRG Kepler)

Dr. Szilárd Csizmadia (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt)

Dr. Kristine W. F. Lam (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt)

Inhalt

1. Einleitung 5
2. Der Grund für die Suche nach Planeten außerhalb unseres Sonnensystems 5
3. Methoden zur Erforschung von Exoplaneten 6
   3.1 Die Radialgeschwindigkeitsmethode 6
   3.2 Die Transitmethode 9
   3.3 Direkte Beobachtung (Imaging) 10
   3.4 Mikrolinseneffekt (Microlensing) 11
4. Wie entsteht eine Atmosphäre? 13
5. Atmosphärische Entweichungsprozesse 14
   5.1 Thermische hydrostatische Flucht 15
   5.2 Thermische hydrodynamische Flucht 16
   5.3 Nichtthermische Flucht 19
      5.3.1 Austausch von Ladungen 19
      5.3.2 Dissoziative Rekombination 20
      5.3.3 Ionenaustritt 20
      5.3.4 Aufnahme von Ionen 20
6. Wie werden die Atmosphären untersucht? 21
7. Was sind Anzeichen von außerirdischem Leben? 24
8. Temperatur von Planetenatmosphären 25
   8.1 Die Effektivtemperatur T_{eff} 26
   8.2 Die Gleichgewichtstemperatur T_{eq} 28
   8.3 Die Helligkeitstemperatur $T_b(\nu)$ 28
9. Planetare Albedo 29
   9.1 Der Phasenwinkel 30
   9.2 Einzelstreualbedo ω 30
   9.3 Die geometrische Albedo $A_g(\nu)$ 31
   9.4 Die Bindungsalbedo A_b und die sphärische Albedo A_s 32
   9.5 Die Beziehung zwischen der Bindungsalbedo und der geometrischen Albedo 32
   9.6 Die scheinbare Albedo 33
10. Instrumente zur Untersuchung von Exoplaneten 33
   Beispiel: James Webb Space Telescope 33
   10.1 Das Drei-Spiegel System 35
   10.2 Das Integrated Science Instrument Module 36
      10.2.1 Near-Infrared Camera (NIRCam) 36

10.2.2 Near-Infrared Spectrograph (NIRSpec) 37
10.2.3 Mid-Infrared Instrument (MIRI) 37
10.2.4 Fine Guidance Sensor/ Near Infrared Imager and Slitless Spectrograph (FGS/NIRISS) 38
11. Interessanteste Exoplaneten 39
11.1 Gliese-581-System 39
11.2 HD 209458 B 39
11.3 GJ 367 b 40
11.4 55 Cancri 40
12. Fazit 41
13. Quellen: 42

1. Einleitung

Seit der Entdeckung des ersten Planeten außerhalb des Sonnensystems ist die Erforschung von Exoplaneten zu einem der wichtigsten Teilgebiete der Astrophysik geworden. Im Laufe dieser vorwissenschaftlichen Arbeit werden verschiedene Methoden zur Suche nach extrasolaren Planeten näher erklärt, sowie diverse Instrumente für deren Untersuchung beschrieben. Der Fokus liegt aber auf den Atmosphären der Planeten. Woraus bestehen sie? Wie entwickelt sich eine Atmosphäre mit der Zeit? Unter welchen Bedingungen kann eine Atmosphäre überhaupt entstehen? Mithilfe des Lichtspektrums können die Atmosphären charakterisiert werden. Jedoch ist es oft sehr schwierig, eindeutige Aussagen über sie zu treffen. Diese vorwissenschaftliche Arbeit soll dazu dienen, das Thema verständlich zu erörtern und auf aktuelle Forschungsergebnisse aufmerksam zu machen.

2. Der Grund für die Suche nach Planeten außerhalb unseres Sonnensystems

Der wichtigste Grund, warum man nach extrasolaren Planeten sucht, ist, dass man Leben außerhalb unseres Sonnensystems finden will. Bisher hat man noch kein Anzeichen dafür gefunden, dass es an anderen Orten in unserer Galaxie, beziehungsweise im Universum biologisches Leben gibt. Es wurden bisher aber auch „nur“ 5569 Exoplaneten gefunden.[1] Es gibt aber Milliarden von Sternen, welche noch Planeten haben könnten. Weiterhin sind die Methoden der Forschung eingeschränkt und es können nur Planeten mit sehr bestimmten Eigenschaften bezüglich der Position entdeckt werden. Neben dem wissenschaftlichen Teil der Antwort auf diese sehr vielseitige Frage gibt es auch einen philosophischen Teil. Durch die Erforschung extrasolarer Planeten bekommen wir ein klareres Bild von unserem Platz im Universum. Wir könnten mit der Forschung ebenfalls Fragen wie, „Wie ist das Leben auf unserem Planeten entstanden?“ oder „Was vor unserer Zeit passiert ist?“ beantworten.

[1] Brennan, Discovery, 2023.

3. Methoden zur Erforschung von Exoplaneten

Es gibt dutzende Methoden, um extrasolare Planeten zu finden. Jedoch sind nicht alle gleich erfolgreich. Wenn man betrachtet, mit welchen Suchverfahren die meisten Exoplaneten gefunden wurden, dann sind die Radialgeschwindigkeitsmethode, bzw. die Transitmethode mit Abstand am besten. Beide sind zwar nur unter sehr bestimmten Voraussetzungen verwendbar, bewiesen sich bislang dennoch als sehr effektiv.

3.1 Die Radialgeschwindigkeitsmethode

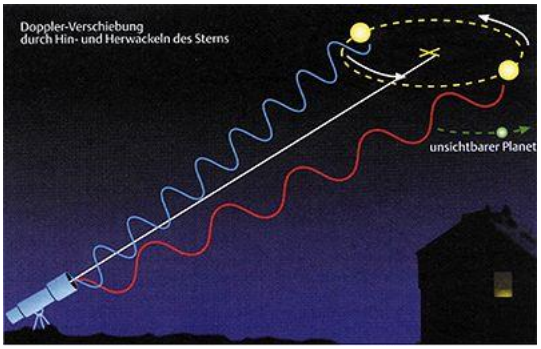

Abbildung 1

Diese Methode geht zurück auf den russisch-amerikanischen Astronomen Otto Struve. Er berechnete, dass ein Planet mit etwa einer Jupitermasse (Entfernung vom Stern: 1/50 AE) eine Schwankung in der Radialgeschwindigkeit des beobachteten Sternes von etwa 0,2 km/s hervorrufen würde. So eine Veränderung hätte man damals schon messen können. Wenn also Planet und sein Stern um ihr gemeinsames Massezentrum kreisen, so ist diese Bewegung des Sterns, auch wenn sie oft vernachlässigt wird, im Lichtspektrum erkennbar. Wie in den Abbildungen 1 und 2 zu erkennen ist, wird die Wellenlänge des Lichts aufgrund des Dopplereffektes kleiner, wenn der Stern sich auf uns zu bewegt (Blauverschiebung) und größer, wenn der Stern sich von uns wegbewegt (Rotverschiebung). Über diese periodische Änderung in der Wellenlänge lassen sich viele Eigenschaften, wie die Mindestmasse des Planeten, die Umlaufdauer um den Stern sowie die Exzentrizität berechnen. Andere Informationen, wie zum Beispiel der Radius, lassen sich mit dieser Methode aber nicht bestimmen. Auch bei unserer Sonne kann man die sogenannte Radialbewegung messen. Aufgrund der Masse des Jupiters beträgt diese ca. 13 m/s. Diese Methode ist aber nur gewinnbringend, wenn wir uns auf etwa einer Ebene mit dem Stern befinden. Schauen wir zum Beispiel „von oben“ auf das System dreht sich

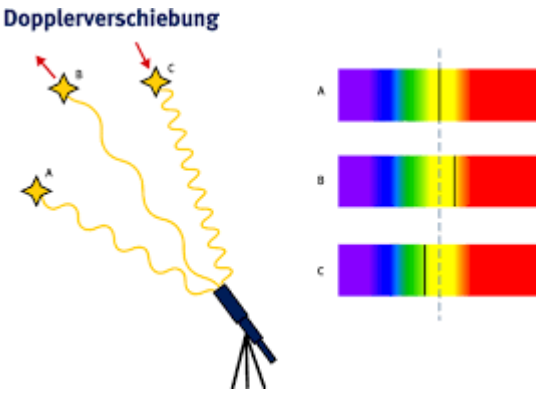

Abbildung 2

der Stern von uns aus gesehen im Kreis und nicht auf uns zu und von uns weg. Weiterhin bewirken kleinere Planeten eine geringere Dopplerverschiebung, welche schwerer zu bestimmen ist.[2]

Der Unterschied in Wellenlänge laut Dopplerverschiebung kann berechnet werden mit

$$(1) \quad \Delta\lambda \approx \frac{v_R * \lambda}{c}$$

v_R… gemessene Radialgeschwindigkeit des Sterns

λ….. Wellenlänge

c…… Lichtgeschwindigkeit im Vakuum

Mit der gemessenen Radialgeschwindigkeit und dem 3. Keplerschen Gesetz können nun weitere Parameter berechnet werden.

$$(2) \quad a_{Stern} + a_{Begleiter} = \sqrt[3]{\frac{G * T^2 * (M_{Stern} + M_{Begleiter})}{4\pi^2}}$$

a.… große Halbachse

G.... Gravitationskonstante

T…. Umlaufzeit

M.... Masse

Hierbei werden die Näherungen $M_{Stern} > M_{Begleiter}$ und $a_{Stern} < a_{Begleiter}$ verwendet.

Zur Bestimmung der großen Halbachse des Planeten verwendet man:

$$(3) \quad a_{Begleiter} * M_{Begleiter} = a_{Stern} * M_{Stern}$$

$$(4) \quad a_{Begleiter} = \sqrt[3]{\frac{M_{Stern} * G * T^2}{4\pi^2}}$$

Die Umlaufzeit des Begleiters lässt sich aus der Periode der Dopplerverschiebung im Lichtspektrum des Sterns erkennen. Ebenfalls gilt, dass der Stern im Abstand a vom

[2] Lam, 2023, Folie 5.

Massezentrum in der Zeit T sich einmal um das gemeinsame Zentrum der Masse dreht. So ergibt sich unter Anwendung von Formel 3:

$$(5) \quad T * v_{Stern} = 2\pi * a_{Begleiter}$$

v_{Stern}… Umlaufgeschwindigkeit des Sterns

$$(6) \quad M_{Begleiter} = \frac{M_{Stern}}{a_{Begleiter}} * \frac{v_{Stern} * T}{2\pi}$$

Die Masse des Planeten hängt somit von der Umlaufperiode und Umlaufgeschwindigkeit des Sterns ab. Diese Geschwindigkeit ist jedoch nicht direkt bestimmbar. Aus der Dopplerverschiebung kann nur die Radialgeschwindigkeit bestimmt werden. Es wird noch der Inklinationswinkel i benötigt.

$$(7) \quad v_{Stern} \sin(i) = v_{radial}$$

Mit den Formeln 4,6 und 7 ergibt sich:

$$(8) \quad M_{Begleiter} \sin(i) = v_{radial} * \left(\frac{M^2{}_{Stern} * T}{2\pi * G}\right)^{\frac{1}{3}}$$

Wie hier gezeigt können also Eigenschaften, wie Masse und große Halbachse über die Radialgeschwindigkeit berechnet werden. Die hier bestimmte Masse ist aber kein genauer Wert. Mit der Radialgeschwindigkeit kann lediglich eine Minimalgrenze für die Masse des Planeten errechnet werden.[3]

Der erste Exoplanet um einen sonnenähnlichen Stern wurde mit der Radialgeschwindigkeitsmethode gefunden. Im Jahr 1995 wurde 51 Peg b von Didier Queloz und Michel Mayor entdeckt mit einer Orbitalperiode von nur 4,23 Erdtagen. Bei seinem Stern verursacht 51 Peg b eine Änderung in der Radialgeschwindigkeit von 50 m/s. Zum Vergleich ist die durch die Erde hervorgerufene Änderung in der Radialgeschwindigkeit bei der Sonne etwa 0,04 m/s. Ebenfalls wurde die Minimalgrenze für die Masse errechnet. Dieser Wert beträgt 0,47 ±0,02 Jupitermassen. Die Oberflächentemperatur beträgt 1200 K, also mehr als 10x heißer als der Jupiter. [4]

[3] Mugrauer, 2023.
[4] Lam, 2023, Folie 9.

3.2 Die Transitmethode

Auch die Transitmethode geht auf Otto Struve zurück. Seine Vermutung war, dass wenn der Lichtverlust mehr als 0,02 Magnituden beträgt und die projizierte Fläche ein fünfzigstel des Sterns ist, so kann der Transit von der Erde aus wahrgenommen werden.[5] Mit dieser Methode wurden über drei Viertel aller bisher bekannten Exoplaneten gefunden.[6] Hier wird das Licht, welches von einem Stern absorbiert wird, analysiert. Wenn sich ein Exoplanet von uns aus betrachtet, wie in Abbildung 3 dargestellt, vor den Stern bewegt, so wird ein Teil des Lichts für eine gewisse Zeit blockiert. Wenn dieser sogenannte „Dip“ in der Lichtkurve des Sterns periodisch immer wieder gleich auftritt, so kann man sich sicher sein, dass es aufgrund eines Planeten geschieht und nicht infolge eines anderes Himmelsobjektes, wie ein Komet. Allerdings ist diese Methode nur von Vorteil, wenn wir auf einer Bahn mit dem Planeten sind. Anderenfalls wird kein Teil des Sterns vom Licht verdeckt und wir können den Transit nicht bestimmen. Aus der Lichtkurve lässt sich die Umlaufperiode des Exoplaneten, der Planetenradius, die Inklination und vieles mehr ableiten. Auch die Albedo, also das Rückstrahlungsvermögen des Planeten, kann aus dem reflektierten Licht bestimmt werden. Mit der Transitmethode wurde der erste extrasolare Planet im Jahr 2000 entdeckt. Für HD 209458 b wurde eine Umlaufdauer von 3,5250 ± 0,0003 Tagen und eine Masse von 0,62 ± 0,05 Jupitermassen bestimmt.[7] Der Transit von Exoplaneten wird sowohl von der Erde als auch aus dem Weltraum mit Sonden beobachtet. Eines der erfolgreichsten Suchmaschinen auf der Erde ist der WASP (Wide Angle Search for Planets) mit 2 Observatorien einmal in Südafrika und einmal in Spanien. Damit wurde zum Beispiel WASP-39b

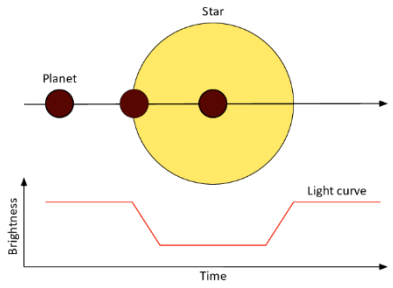

Abbildung 3

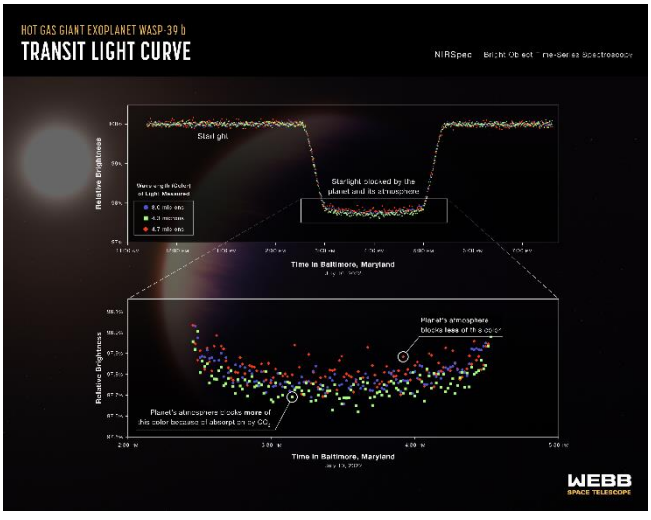

Abbildung 4

[5] Lam, 2023, Folie 19.
[6] Brennan, Discovery, 2023.
[7] Charbonneau et al. 2002.

gefunden. Dessen Lichtkurve ist in Abbildung 4 erkennbar. Der Gasriese hat nur eine sehr kurze Orbitalperiode. In 4,1 Erdtagen kreist er um das Massezentrum. Mit etwa 0,28 Jupitermassen ist er so groß wie der Saturn. Die Lichtkurve zeigt aber nicht nur, wie viel vom Licht blockiert wurde, sondern auch welche Wellenlängen genau. Daraus erkennt man welche Stoffe vermehrt in der Atmosphäre auftauchen. Licht mit einer Wellenlänge 4,7 µm kaum blockiert wird, während 4,3 µm aufgrund der CO_2-Absorption sehr stark blockiert werden.[8] Der Exoplanet LHS 475b in Abbildung 5 hat eine noch viel kürzere Umlaufdauer von nur 2,1 Erdtagen. Anhand des Transits, wurde ebenfalls bestimmt, dass der Planet fast genau den gleichen Durchmesser wie die Erde hat und somit ein Gesteinsplanet sein muss. Da er sich so nah am Zentralstern befindet, ist es noch gar nicht sicher, ob dieser Planet überhaupt eine Atmosphäre aufweisen kann.[9]

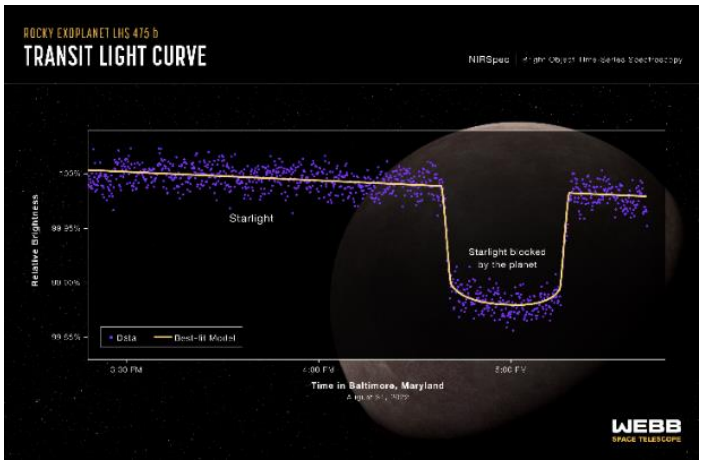

Abbildung 5

3.3 Direkte Beobachtung (Imaging)

Die Suche nach Exoplaneten ist alles andere als einfach. Körper im Weltraum können nur gesehen werden, wenn sie selbst leuchten oder von einem anderen Objekt beleuchtet werden. Ein Stern hat die milliardenfache Lichtstärke eines Planeten. Das ist so, als würde man versuchen, die Flamme einer Kerze neben einem Leuchtturm in 1000 Kilometer Entfernung zu erkennen. Deswegen ist es einfacher, Exoplaneten auf indirekte Weise zu beobachten und nach Veränderungen der Helligkeit oder der Bewegung eines Sterns zu suchen. Und obwohl die Radialgeschwindigkeits- und Transitmethode mit Abstand die erfolgreichsten Suchmethoden sind, gibt es Wissenschaftler, die auf andere Weise ebenfalls einen extrasolaren Planeten nachgewiesen haben, z.B. durch Imaging. So wurden bereits 68

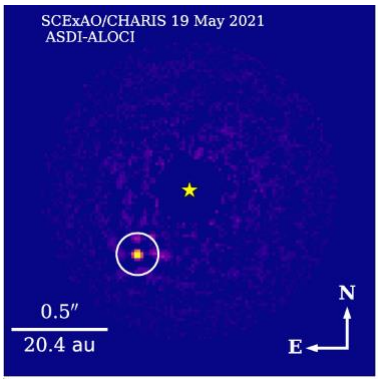

Abbildung 6

[8] Brennan, WASP-39b, 2023.
[9] vgl. Hustac et al., 2022.

Exoplaneten nachgewiesen.[10] Dabei wird im Infrarotbereich beobachtet, weil in dem Wellenlängenbereich ein sonnenähnlicher Stern nur etwa 100-mal so hell ist wie der Jupiter.[11] Diese Methode lässt sich nur anwenden, wenn der Exoplanet sehr groß, hell und jung ist.[12] Zudem muss er sich sehr weit vom Stern befinden.[13] Die Orbitalperiode beträgt bei diesen Planeten mehrere hundert bis tausend Jahre. Eine zweite Erde oder einen Jupiterzwilling kann man beim heutigen technischen Stand des Imaging aber nicht finden. Das erste Mal war diese Methode beim Stern HR 8799, welcher mit einer scheinbaren Helligkeit von 5,96 Magnituden auch mit bloßem Auge sichtbar ist, im Sternbild Pegasus erfolgreich. Um ihn wurden 4 Exoplaneten direkt beobachtet. Die Aufnahmen wurden aus dem Keck Observatorium auf Hawaii gemacht. Die hier beigefügte Abbildung (Abb. 6) ist eine neuere Aufnahme aus 2021. Die Planeten um den Stern wurden aber bereits 2008 entdeckt.

3.4 Mikrolinseneffekt (Microlensing)

Gegenüber anderen Methoden hat Microlensing einen sehr großen Vorteil. Man kann Exoplaneten entdecken, welche sich vergleichsweise sehr weit von uns entfernt befinden. Mit der Radialgeschwindigkeitsmethode kann man Exoplaneten in Entfernungen von bis zum 100 Lichtjahren entdecken und mit dem Transit ist man beschränkt auf wenige hundert Lichtjahre. Microlensing ermöglicht aber Planeten zu finden, welche sich in der Nähe des Zentrums der Galaxie befinden, also tausende Lichtjahre von uns entfernt.

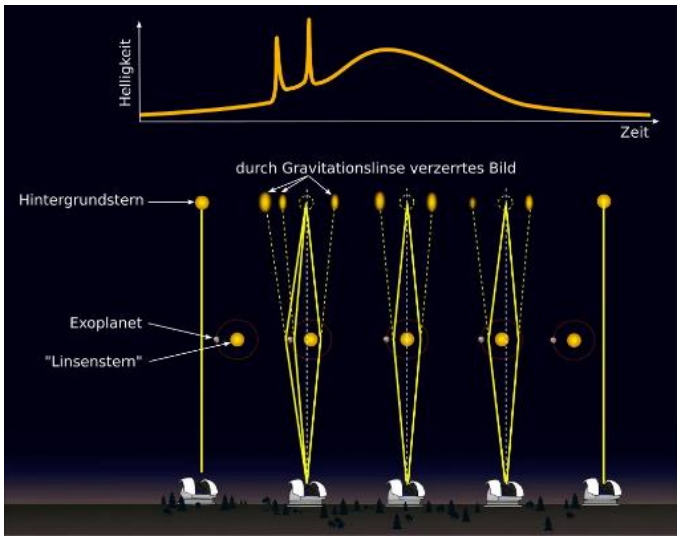

Abbildung 7

[10] Brennan, Discovery 2023.
[11] Las Cumbres Observatory, 2023.
[12] vgl. Büker, 2013.
[13] vgl. Piper, 2011, S.17f.

Wenn ein Linsenstern (Abb. 7) mit einem Planeten sich zwischen dem Beobachter und dem Hintergrundstern vorbeibewegt, können 2 Veränderungen im Helligkeitsverlauf beobachtet werden. Erstens wird das Licht des Hintergrundsterns durch den Linsenstern gekrümmt, wodurch während des Transits ein langsamer, glockenähnlicher Helligkeitsanstieg und -abfall sichtbar wird. Der Exoplanet, welcher um den Linsenstern kreist, wirkt wie eine weitere Linse und krümmt das Licht so, dass 2 sprunghafte, charakteristische Helligkeitsanstiege in der Lichtkurve entstehen, welche im Durchschnitt einen Tag dauern. Die Intensität und Dauer des Helligkeitsanstieges liefern sehr genaue Informationen über den Planeten, wie seine Masse, Orbitalperiode, oder die Entfernung zum Zentralgestirn. Abbildung 8 zeigt eine Monte Carlo Simulation für den Wide Field Infrared Survey Explorer, welche auf einen Exoplaneten hinweist. Die Lichtkurve des Sterns lässt auf einen Abstand von 0,01 AE zum Planeten hindeuten. Zudem hätte dieser Planet 787,9 Erdmassen. [14]

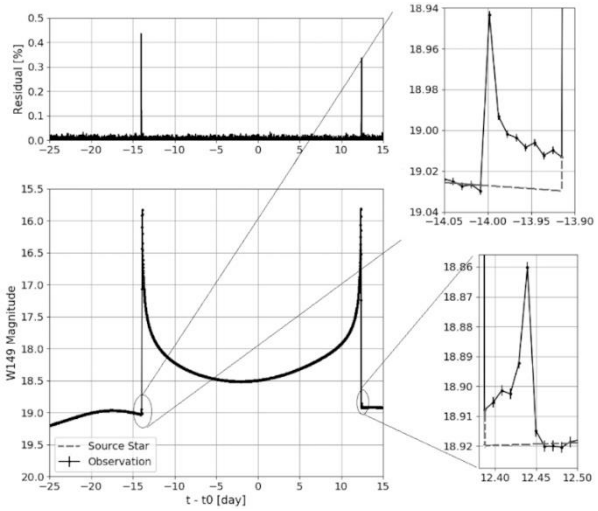

Abbildung 8

Im Jahr 2006 wurde mit Hilfe des Mikrolinseneffektes ein Exoplanet mit lediglich 5 Erdmassen gefunden, welcher 22.000 Lichtjahre von uns entfernt ist. Zu dem Zeitpunkt war er der weitentfernteste Planet, welcher je gefunden wurde und zugleich auch der mit der geringsten Masse.OGLE-2003-BLG-235L b war der erste Exoplanet, der mit Hilfe des Mikrolinseneffekts entdeckt wurde.[15] Der Zentralstern befindet sich im Sternbild Schütze.

Die besten Ergebnisse bekommt man jedoch, wenn man die verschiedenen Suchmethoden miteinander kombiniert. Allein mit der Radialgeschwindigkeit oder dem Transit lässt sich die tatsächliche Masse des Planeten nicht bestimmen. Jedoch bekommt man diesen Wert durch die Kombination beider Methoden heraus.

[14] Bagheri, 2019.
[15] vgl. Piper, 2011, S.58f.

4. Wie entsteht eine Atmosphäre?

Der Entstehungsprozess einer Atmosphäre beginnt schon gleich nach der Entstehung des Planeten. Bei Gesteinsplaneten kommen die Gase von vulkanischen Aktivitäten. Auf der Erde war die ursprüngliche Atmosphäre dominiert von CO_2 und N_2. Ebenfalls gab es durch die vulkanischen Gasausbrüche Wasserdampf, NH_3, CH_4, und H_2. Der Gehalt an Wasserstoff in der damaligen Atmosphäre ist umstritten. Manche Schätzungen gehen bis 30% Anteil im Volumen. Zum Vergleich liegt der heutige Wasserstoffanteil in der Atmosphäre bei weniger als 0,001%. Diese riesigen Mengen an Wasserstoff gingen in den ersten paar hundert Millionen Jahren der Erdgeschichte durch atmosphärische Entweihungsprozesse verloren. Wie Gase nach außen entweichen, wird im Laufe der vorwissenschaftlichen Arbeit näher erläutert. H_2 tritt heute durch Entweichungsprozesse immer noch aus der Erdatmosphäre aus. Das CO_2 der Uratmosphäre wurde zum größten Teil im Ozean gelöst, wobei verschiedenste Carbonat-Verbindungen entstanden. Heute liegt der Kohlenstoffdioxidanteil der Atmosphäre bei etwa 0,041%. Der Sauerstoff kam vor ca. 2,4 Mrd. Jahren dazu. Dieser wurde zuerst von sich autotroph ernährenden Cyanobakterien, welche als erste Lebensform auf der Erde Photosynthese betreiben konnten, hergestellt. Damals war der O_2-Anteil viel geringer, weil der ursprüngliche Sauerstoff bei den chemischen Reaktionen mit dem Erdgestein aufgebraucht wurde. Der Grund für den großen Anteil an Stickstoff in der Atmosphäre ist noch nicht klar. Auch die Venus hatte anfänglich eine Atmosphäre wie die Erde. Der Anteil an Wasserstoff und Wasserdampf ist ebenfalls nach außen hin verloren gegangen. Die Entweichungsprozesse wurden durch Sonnenwinde nur verstärkt. Aufgrund des schwachen magnetischen Feldes und der kleineren Distanz zur Sonne sind diese viel stärker als bei uns. Der Mars hatte in seinen ersten 0,5 bis 1 Milliarden Jahren eine mit einem hohen Anteil an Treibhausgasen geprägte Atmosphäre. Nur durch die Existenz dieser Gase kann man die Beweise für flüssiges Wasser in dieser zeitlichen Periode erklären. Treibhausgase waren nötig, um den Planeten warm genug zu halten, sodass das Wasser in flüssiger Form bestehen kann. Der Mars hat, wie auch die Venus, ein schwaches Magnetfeld, wodurch Sonnenwinde einen größeren Einfluss haben als auf der Erde. Hinzu kommen die geringe Masse und damit auch geringe Anziehungskraft des Planeten, weswegen Gase leichter entweichen können. Den größten Teil seiner Atmosphäre hat

der Mars verloren, wodurch heute die Oberflächentemperaturen auf dem Planeten zu niedrig sind, damit Wasser in flüssiger Form bestehen kann. [16]

Der Entwicklungsprozess von Planeten ist nie gleich und von verschiedensten Faktoren abhängig. Deswegen ist es bei Exoplaneten oft schwierig zu sagen, wie ihre Atmosphären entstanden sind. Weiterhin sind die meisten bisher gefundenen Exoplaneten, verglichen mit den Planeten unseres Sonnensystems, eher exotisch. Wir können sagen welche Gase in der Atmosphäre enthalten sind, jedoch nur spekulieren, wie sie entstanden ist.

5. Atmosphärische Entweichungsprozesse

Der Verlust von Stoffen in der Atmosphäre bestimmt die Zusammensetzung der Atmosphäre, sowie ob der Planet überhaupt eine Atmosphäre hat. Wenn der Planet noch sehr jung ist, entweichen meistens die leichten Gase. Es kann aber durchaus sein, dass schwerere Elemente ebenfalls entweichen, falls zum Beispiel der Planet sehr nach am Zentralstern ist. Manche Supererden[17], welche sich sehr nah an ihrem Zentralstern befinden, haben so ihre ganze Atmosphäre verloren. Die Verlustrate von Gasen hat einen enormen Einfluss auf die Fotochemie. Der Wasserstoff auf der Erde entsteht bei der Photolyse von wasserstoffhaltigen Molekülen. Also wenn chemische Bindungen durch elektromagnetische Wellen getrennt werden. Das kann zum Beispiel H_2O oder H_2S aus vulkanischen Emissionen sein. Der größte Teil an Wasserstoff wird sofort durch atmosphärische Oxidation verloren. Wasserstoff kann aber bei Exoplaneten in der Atmosphäre bleiben, wenn die Fluchtgeschwindigkeit dort höher ist als die zweite kosmische Geschwindigkeit des jeweiligen Planeten (Bsp. Erde: >11,19 km/s). Diese kann errechnet werden, indem man die Formeln für die kinetische Energie E_{kin} mit der für die Gravitationsenergie E_g gleichsetzt, da zum Erreichen der Fluchtgeschwindigkeit die Gravitationskraft der Erde überwunden werden muss:[18]

$$\frac{1}{2}mv^2 = G * \frac{m * M}{r}$$

$$v^2 = 2G * \frac{M}{r}$$

[16] vgl. Seager, 2010, S.135f.
[17] terrestrische Planeten außerhalb unseres Sonnensystems.
[18] vgl. Seager, 2010, S.121f.

$$v = \sqrt{2G * \frac{M}{r}}$$

m… Masse des Teilchens

M… Masse des Planeten

G… Gravitationskonstante

v… Geschwindigkeit

r… Planetenradius

Obwohl es verschiedene Arten von Entweichungsprozessen gibt, basiert jeder auf denselben 3 Schritten. In der ersten Phase werden die Gase aus den unteren Schichten der Atmosphäre nach oben transportiert. Als Zweites erfolgt die Umwandlung dieser Stoffe aus ihrer atmosphärischen Form (meist molekular) in ihre Fluchtform (meist atomar oder ionisiert). Die dritte Phase ist das eigentliche Entweichen in den Weltraum. Es gibt hauptsächliche 3 Möglichkeiten, wie Gase entweichen können:[19]

5.1 Thermische hydrostatische Flucht

Wenn die thermische Geschwindigkeit von den Teilchen größer ist als die Fluchtgeschwindigkeit auf dem jeweiligen Planeten, so kann das Teilchen die Atmosphäre verlassen und man spricht von thermischer hydrostatischer Flucht.[20]

$$\sqrt{\frac{2 * k_B * T_{exo}}{m}} > \frac{1}{6} * \sqrt{\frac{2 * G * M_p}{r_p}} \quad (9)$$

k_B…… Boltzmann Konstante

T_{exo}…. Temperatur in der Exosphäre des Planeten

m……. Atom-/Molekülmasse

G…….. Gravitationskonstante

M_p…... Masse des Planeten

r_p…..… Radius des Planeten

[19] vgl. Seager, 2010, S.122.
[20] ebd. S.124.

Man darf allerdings nicht die thermische Geschwindigkeit eines Moleküls mit der Fluchtgeschwindigkeit direkt vergleichen, da es sich bei den austretenden Teilchen meist um solche im hochenergetischen Teil der Geschwindigkeitsverteilung handelt. Deswegen wird die Ungleichung einseitig mit dem Faktor $\frac{1}{6}$ multipliziert. So kann man das Entweichen des Gases basierend auf den Geschwindigkeiten im Hochenergieschweif abschätzen. In der Abbildung 9 sind die thermischen Geschwindigkeiten verschiedener Elemente mit einem Sechstel der Fluchtgeschwindigkeit von den Planeten unseres Sonnensystems verglichen. Dabei wird deutlich, dass eine indirekte Proportionalität zwischen der Ordnungszahl des Elements im PSE und dessen Fluchtgeschwindigkeit besteht. Nur Wasserstoff und Helium haben eine thermische Geschwindigkeit, welche hoch genug ist, um die Erdatmosphäre zu verlassen. Teilchen werden in der Exosphäre eines Planeten verloren, weshalb die relevante Temperatur in Formel 9 die Temperatur der Exosphäre ist. Wie in Abbildung 10 zu erkennen ist, ist sie die oberste Schicht der Atmosphäre. Der Boden der Exosphäre ist die Exobasis, definiert als die Höhe, in der die Atmosphäre kollisionsfrei wird. D. h., dass der durchschnittliche Abstand zwischen Teilchenkollisionen größer ist, als die partikelspezifische atmosphärische Skalenhöhe. [21]

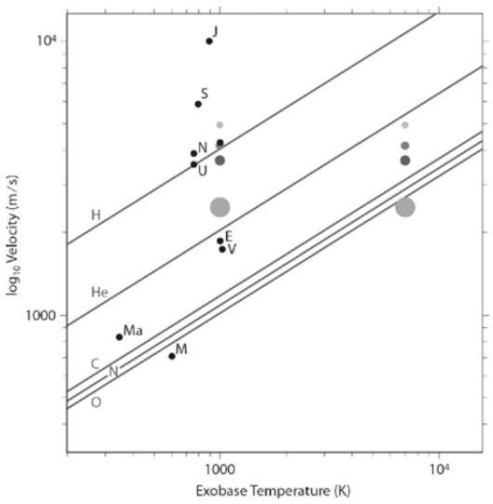

Abbildung 9

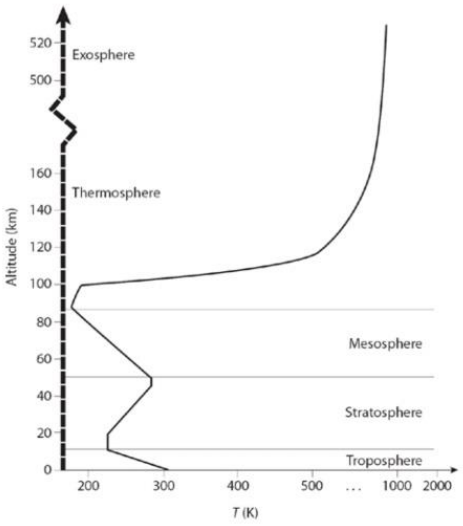

Abbildung 10

5.2 Thermische hydrodynamische Flucht

Wenn die Flucht der Teilchen aus der Atmosphäre so schnell geschieht, dass sich die Atmosphäre wie eine dichte Flüssigkeit verhält und nach außen ausdehnt, spricht man von

[21] vgl. Seager, 2010, S.125.

thermischer, hydrodynamischer Flucht. Dafür muss die Atmosphäre durch einen Stern so stark erhitzt werden, dass die Teilchen so energiereich sind, dass die Schwerkraft das Entweichen nicht aufhalten kann. Dafür wird eine große Menge an extremer UV-Strahlung (10nm bis 121nm) benötigt. Während der hydrodynamischen Flucht können die schwereren Elemente, wie Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff von den leichteren Elementen wie Wasserstoff mitgenommen werden. Jedoch können diese schweren Elemente, abhängig von der atmosphärischen Zusammensetzung, auch selbstständig fliehen und brauchen den Wasserstoff nicht. Diese Art von Gasentweichung passiert normalerweise nur früh im Leben eines Planeten. In unserem Sonnensystem ist Pluto wahrscheinlich der einzige Körper, welcher auf hydrodynamische Weise Atmosphäre verliert. Hauptsächlich sind es die Moleküle Methan (CH_4) und Stickstoff (N_2).[22]

Es ist nicht möglich, mit 100%-iger Wahrscheinlichkeit zu sagen, ob ein Planet hydrostatisch oder hydrodynamisch seine Atmosphäre verliert, jedoch kann man mit Annäherungen ein ziemlich klares Bild davon bekommen. Grundsätzlich gilt: Je mehr Energie der Atmosphäre zugeführt wird, desto höher ist die Fluchtrate. Je schneller die Flucht, desto mehr Energie wird aufgebraucht. Dann entsteht nahe der Exobasis ein negativer Temperaturgradient, weil die Strahlungsleistung die Abkühlungsrate nicht überwinden kann. Abnehmende Temperatur bei zunehmender Höhe wäre also ein kleines Indiz für hydrodynamische Flucht, wenn sie beobachtbar wäre. Um die hydrostatische Flucht abzuschätzen, gibt es die sogenannte energiebegrenzte Flucht. Bei Exoplaneten ist sie nützlich, um wichtige Unsicherheiten bei der EUV-getriebenen Flucht zu veranschaulichen. Die potenzielle Gravitationsenergie eines Planeten lässt sich in Joule berechnen mit:

$$(10) \quad E_p = -\frac{G * M_p * m_{atm}}{\beta r_p}$$

G…… Gravitationskonstante

M_p..… Masse des Planeten

m_{atm}...Masse der Atmosphäre des Planeten

βr_p..… Radiale Ausdehnung der Exosphäre des Planeten

[22] vgl. Seager, 2010, S.128.

m_{atm} nehmen wir an, dass sie so klein ist, dass die radiale Atmosphärenstruktur ignoriert werden kann. Die auftretende extreme ultraviolette Leistung in $J*s^{-1}$ auf dem Planeten beträgt:

$$(11) \quad P_{UV} = \pi * r_p^2 * F_{EUV}$$

Hierbei nehmen wir an, dass der Radius, wo die Energie der elektromagnetischen Strahlung absorbiert wird, nah genug am Planetenradius ist. Mithilfe der Formeln 10 und 11, sowie einem durchschnittlichen EUV-Fluss $\langle F_{EUV} \rangle$ in der aktiven Phase bekommt man für die Lebensdauer der Planetenatmosphäre die Gleichung:

$$(12) \quad \tau \sim \left[\frac{G}{\pi}\right] * \left(\frac{M_p}{r_p^3}\right) * \frac{m_{atm}}{\beta \eta \langle F_{EUV} \rangle}$$

Bei der energiebegrenzten Flucht wird angenommen, dass ein gewisser Teil η der einfallenden UV-Strahlung die Atmosphäre erwärmt und somit den Fluss vorantreibt. Zu beachten ist, dass η<1 und β>1. Diese Gleichung gilt unter der Voraussetzung, dass die Exosphäre so stark erhitzt wird, dass die relevanten Elemente (H oder O) entweichen können. [23]

Formel 12 ist bestenfalls nur eine Annährung, da es große Unsicherheiten bei den Messwerten vorliegen. Erstens weiß man die Dichte des Planeten nur, wenn er sich im Transit beobachten lässt. Tut er das nicht und man nimmt an, dass es sich um einen Gesteinsplaneten handelt, variiert die angenommene Dichte um den Faktor 5. Noch unsicherer ist die anfängliche Masse der ausgegasten planetaren Atmosphäre. Dieser Wert könnte weniger als 1% der Gesamtmasse des Planeten betragen, jedoch bei einem anfänglich sehr wasserreichen Planeten bis zu 20%. Genauso unbekannt ist der einfallende Fluss an extrem ultravioletter Strahlung. Alle Sterne haben während ihrer Sättigungsphase[24] einen erhöhten EUV-Fluss, in welcher die Werte an das Tausendfache des heutigen EUV-Flusses der Sonne herankommen. Das ist besonders für Supererden besorgniserregend, welche um Sterne der Spektralklasse M kreisen. Bei Ihnen kann die Sättigungsphase bis zu 8 Mrd. Jahre dauern. Wenn die Atmosphäre diese Phase nicht überlebt, kann danach eine neue entstehen, solange die Ausgasungsrate höher ist als die Fluchtrate und genug Material vorhanden ist, um eine Atmosphäre zu bilden. Tatsächliche Berechnungen für

[23] vgl. Seager, 2010, S.129.
[24] ebd. S. 131.

hydrodynamische Flucht basieren auf den hydrodynamischen Gleichungen der Strömungsmechanik. Solche Berechnungen erfordern die stellare EUV-Strahlung sowie die Masse und Bestandteile der oberen Atmosphäre. Diese Rechnungen ergeben Fluchtflüsse, sowie Dichte- und Temperaturstrukturen in der Exosphäre und Thermosphäre.[25]

5.3 Nichtthermische Flucht

Wenn durch Kollisionsprozesse zwischen geladenen Teilchen Atome entstehen, welche energiereich genug sind, um aus der Planetenatmosphäre in den Weltraum zu entkommen, spricht man von nichtthermischen Fluchtmechanismen. Solche Kollisionsprozesse ermöglichen es schwereren Atomen, wie Sauerstoff oder Stickstoff, dessen thermische Geschwindigkeit zu gering ist, die Atmosphäre des Planeten zu verlassen. Die nichtthermische Flucht ist aber nur ein Überbegriff für eine Vielzahl von Prozessen. Welche von ihnen in einer Atmosphäre vorherrscht, hängt unter anderem von der Temperatur in der Exosphäre, vom Abstand zwischen Planeten und Stern, vom Vorhandensein eines Magnetfeldes, von der Art des Sterns, bzw. von der Fluchtgeschwindigkeit des Planeten ab. Ein paar dieser Unterarten von nichtthermischen Fluchtprozessen werden hier aufgelistet:[26]

5.3.1 Austausch von Ladungen

Hierbei handelt es sich um einen Zusammenstoß zwischen einem geladenen Ion und einem nach außen neutralen Atom, wobei die überschüssige Energie des Ions auf das Atom übertragen wird.

$$H + H^{+*} \rightarrow H^{+} + H^{*}$$

$*$… übrige kinetische Energie

Die EUV-Strahlung des Sterns bewirkt die Photolyse von Atomen, wodurch Ionen entstehen. Aufgrund der Magnetosphäre haben die Ionen sehr hohe Energien. Es wird vermutet, dass beim Wasserstoffverlust der Ladungsaustausch von H+ Ionen und H Atomen der dominierende Prozess ist. Dieser ist sogar schneller als die Freisetzung von Wasserstoff. An Reaktionen mit Ladungsaustausch sind ebenfalls andere energiereiche Protonen und thermische Atome wie Sauerstoff beteiligt.[27]

[25] vgl. Seager, 2010, S.130f.
[26] ebd. S.132f.
[27] ebd. S.133.

5.3.2 Dissoziative Rekombination

Durch Photoionisation entstandene Elektronen oder durch molekulare Photolyse entstandene Atome können überschüssige kinetische Energie transportieren. Darüber hinaus können die Atome und Ionen, welche durch Photolyse entstanden sind, rekombinieren und die Stöße können einige Elektronenvolt an kinetischer Energie erzeugen. Die dissoziative Rekombination tritt auf, wenn ein Ion in molekularer Form sich mit einem freien Elektron verbindet. Dabei entsteht eine Population energiereicher Atome, welche die Atmosphäre verlassen können. Die photochemische Flucht ist in unserem Sonnensystem heute nur für Mars relevant. [28]

5.3.3 Ionenaustritt

Unter Ionenaustritt versteht man über Magnetfeldlinien entweichende Ionen, die zu einem planetarischen Magnetschweif offen sind. Besonders in den Polarregionen der Erde ist dies ein wichtiger Prozess. Daher wird dieser nichtthermische Fluchtvorgang auch als Polarwind bezeichnet.[29]

5.3.4 Aufnahme von Ionen

Ionenaufnahme erfolgt, wenn der Sonnenwind mit der Ionosphäre eines Planeten interagiert. Über die geladenen Teilchen im Sonnenwind erstreckt sich das Magnetfeld des Sterns auf die Planeten und wird dann als interplanetares Magnetfeld bezeichnet. Die in der Planetenatmosphäre enthaltenen Ionen werden vom solaren interplanetaren Magnetfeld aufgefangen und können vom Planeten weg beschleunigt werden. Das eigene Magnetfeld eines Planeten, wie das der Erde, kann das Entweichen der Atmosphäre verhindern, indem es den Sonnenwind ablenkt. Bei Exoplaneten ohne Magnetfeld kann der Sonnenwind bis tief in die Exosphäre eindringen und das Sonnenwindplasma kann neutrale Teilchen ionisieren und mitreißen.[30]

Welcher der 3 Hauptprozesse in der Atmosphäre eines Planeten dominant ist, hängt von der Masse des Planeten, der Komposition der oberen Atmosphäre, dem Abstand zum Zentralstern, der exosphärischen Temperatur, sowie dem Vorhandensein eines Magnetfeldes ab. Wenn eines

[28] vgl. Seager, 2010, S.134.
[29] ebd. S.134.
[30] ebd. S.134.

dieser Daten unbekannt ist, fällt es schwer vorherzusagen, wie die Gase entweichen. Weiterhin ist die UV-Strahlung eines Sterns von zentraler Bedeutung bei der Flucht der Gase ins All. Die extreme ultraviolette Strahlung erwärmt die Exosphäre und verstärkt die atmosphärische Entweichung. Diese Strahlung ist jedoch nur schwer messbar ohne ein UV-fähiges Weltraumteleskop. Und selbst dann ist man auf nahelegende Sterne beschränkt aufgrund der Absorption durch interstellares Medium. Der Sonnenwind anderer Sterne kann ebenfalls nicht bestimmt werden, spielt aber eine signifikante Rolle bei der nichtthermischen Flucht. Werte wie EUV-Strahlung und Sonnenwind können also nicht gemessen und müssen deshalb auf Basis anderer Parameter geschätzt werden.[31]

6. Wie werden die Atmosphären untersucht?

Die Atmosphären von Exoplaneten können aufgrund ihrer Entfernung von uns nicht direkt beobachtet werden. Jedoch kann man das Licht des Sterns, welches die Atmosphäre des Exoplaneten passiert hat, untersuchen und somit die chemische Zusammensetzung bestimmen. Es gibt 3 verschiedene Arten von Spektroskopie.

1. Die Transmissionsspektroskopie
2. Die Reflexionsspektroskopie
3. Die thermale Emissionsspektroskopie

Bei der Reflexionsspektroskopie wird jenes Licht untersucht, welches vom Stern ausgesandt wird, an der Atmosphäre des Exoplaneten in Richtung Erde reflektiert wurde. Dies passiert hauptsächlich während der Okkultation[32], kann aber theoretisch zu jedem Zeitpunkt der Orbitalperiode stattfinden. Die thermale Emissionsspektroskopie funktioniert bei Planeten, welche heiß genug sind, um so viel Hohlraumstrahlung zu emittieren, dass es nachweisbar ist (Schwarzer Strahler).

[31] vgl. Seager, 2010, S.122.
[32] Vorbeiziehen eines scheinbar größeren Objektes vor einem anderen.

Das Transmissionsspektrum liefert die meisten Hinweise über die Atmosphäre. Dabei wird jenes Licht analysiert, welches vom Stern ausgesandt wird und die Atmosphäre des Exoplaneten passiert hat. Das Spektrum der Atmosphäre wird erstellt, indem man das während des Transits aufgenommene Spektrum vom Spektrum des Sterns subtrahiert. Die in der Atmosphäre enthaltenen chemischen Stoffe absorbieren einen Teil des Lichts und aus dem Spektrum lässt sich erkennen, welche Wellenlängen genau absorbiert wurden. Wenn beispielsweise die Wellenlänge 240 nm im Spektrum fehlt, so wäre Sauerstoff in dieser Atmosphäre.[33] CO_2 absorbiert bei der Wärmestrahlung die Wellenlängen 4,26 µm und 15 µm.[34] HD 189733b war der erste Exoplanet, dessen Atmosphäre von der Erde aus mittels Spektroskopie analysiert werden konnte.[35] Dabei konnte festgestellt werden, dass der Planet eine natriumreiche Atmosphäre besitzt. Diese Entdeckung wurde im Jahr 2008 mit dem Hobby-Eberly Teleskop in Texas gemacht. Von der Erde aus ist man aber leider aufgrund von Lichtverschmutzung sehr stark eingeschränkt. Vom Weltall aus sind die Ergebnisse weitaus vielversprechender. Deswegen konnte man nach Untersuchungen mit dem James Webb Space Teleskop weitere Verbindungen wie Eisenoxid, Wasser und Zink (II)-sulfid in der Atmosphäre nachgewiesen werden (siehe Abb. 11). Für diese Untersuchungen wurde das Instrument MIRI (Mid-Infrared-Instrument) auf dem JWST verwendet, welches im Wellenlängenbereich von 5 µm bis 28 µm arbeitet. Das Hubble Space Telescope hat Daten über die Atmosphäre von einem Planeten, welcher um den Stern HD 209458 kreist, bereits im Jahr 2002 geliefert. Dieser war ebenfalls der erste extrasolare Planet, bei welchem Natrium in der Atmosphäre gefunden wurde.[36] Bei dem Planeten um HD 209458 handelt es sich um einen heißen Jupiter. Diese Art von Exoplaneten hat eine sehr umfangreiche Komposition der Atmosphäre. Verschiedenste Elemente und Verbindungen wie Kalium (eng. Potassium), Helium, Wasser sowie Salzverbindungen befinden sich dort.[37] Der erste Exoplanet, bei welchem Wasserdampf entdeckt werden konnte, war der neptunähnliche K2-18 b im Jahr

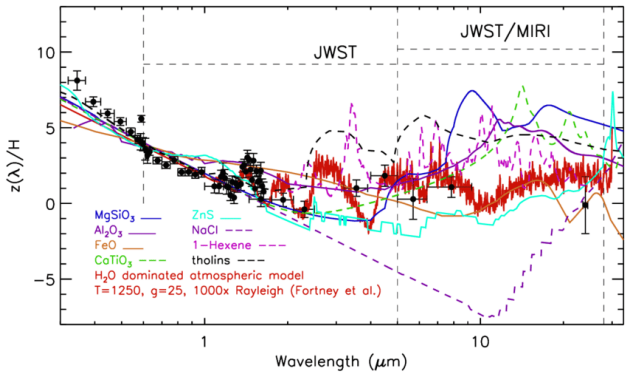

Abbildung 11

[33] Helmich, 2020.

[34] Universität Heidelberg, 2024.
[35] Redfield et al. 2008.
[36] Charbonneau et al. 2002.
[37] Barstow et al. 2016.

2019.[38] Er befindet sich in der habitablen Zone seines Sterns. Die Daten dafür kamen von der Kepler Mission. Über den ersten durch das James Webb Telescope gefundenen Exoplaneten wurde die wissenschaftliche Arbeit am 11.01.2023 veröffentlicht.

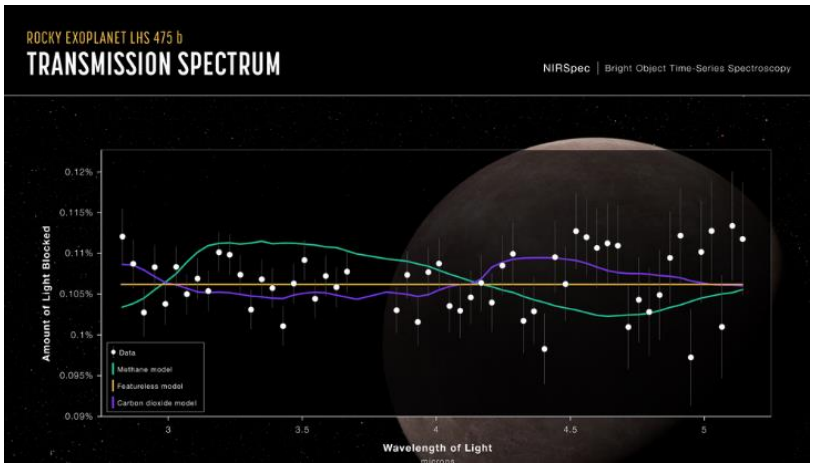

Abbildung 12

Das Spektrum (Abb. 12) von LHS 475 b wurde am 31.08.2023 aufgenommen. Daraus ist noch nicht klar zu sagen, welche Elemente in der Atmosphäre vorhanden sind oder ob der Planet überhaupt eine Atmosphäre aufweist. Die grüne Linie im Spektrum zeigt eine Atmosphäre ausschließlich aus Methan. Die gelbe Linie zeigt das Spektrum eines Planeten ohne eine Atmosphäre. Die lila Linie ist eine Kohlenstoffatmosphäre. Diese sind sehr dünne Atmosphären und so nur sehr schwer nachweisbar, weil man sie selbst mit den Messgeräten vom Webb Teleskop nur schwer von keiner Atmosphäre unterscheiden kann. Es sind noch weitere Untersuchungen notwendig um eine eindeutige Aussage treffen zu können. Mit Hilfe der Transmissionspektroskopie kann nicht nur die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre untersucht werden, sondern auch Eigenschaften wie Temperatur, Dichte und Druck, bzw. deren Veränderung innerhalb der Atmosphäre vom Boden bis zur Thermopause[39] können ermittelt werden. Anhand dieser physikalischen und chemischen Eigenschaften der Atmosphäre ist erkennbar, ob der Planet für biologisches Leben geeignet ist.[40]

[38] Benneke et al. 2019.
[39] Grenzschicht zwischen Exosphäre und Thermosphäre.
[40] Stevenson, 2023.

7. Was sind Anzeichen von außerirdischem Leben?

Wenn man Leben auf einem anderen Planeten finden will, muss man nach Bioindikatoren suchen. Das sind Anzeichen auf Leben in der Atmosphäre eines Planeten. Ein Bioindikator wäre beispielsweise Sauerstoff. Sollte jemand aus zum Beispiel 200 Lichtjahren Entfernung ein Transmissionsspektrum von der Atmosphäre der Erde aufnehmen, wüsste diejenige Person sofort, dass es Leben auf unserem Planeten gibt. Die Mengen an Sauerstoff sind dafür klare Indikatoren (siehe Abbildung 13). O_2 ist ein sehr reaktionsfreudiges Gas und sein Anteil in der Atmosphäre kann nur erhalten bleiben, wenn das Gas kontinuierlich produziert wird. Das geht nur durch pflanzliche Photosynthese, wobei Kohlenstoffdioxid und Wasser in Glukose, Wasser und Sauerstoff umgewandelt werden.

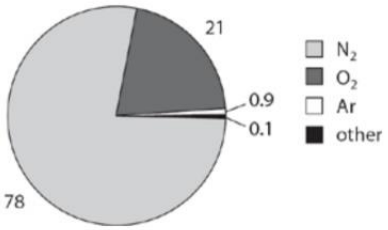

Abbildung 13

$$6\,CO_2 + 12\,H_2O \rightarrow\ C_6H_{12}O_6 + 6\,H_2O + 6\,O_2$$

Gäbe es nämlich kein Leben auf unserem Planeten, dann wäre die Atmosphäre zum größten Teil von Kohlenstoffdioxid dominiert. So wie es schon einmal vor ca. 4 Milliarden Jahren auf der Erde war. Oder heute immer noch auf der Venus (siehe Abbildung 14). Ein anderer Bioindikator auf der Erde ist das Wasser in flüssiger Form. Ohne Wasser gibt es nämlich kein Leben, so wie wir es kennen. Auch die großen Mengen an Ozon sind ein Indikator für Leben auf der Erde. O_3 entsteht bei der Aufspaltung von Sauerstoff durch die UV-Strahlung der Sonne.[41] N_2O ist ebenfalls ein Bioindikator, da es nur bei mikrobiellen Redoxreaktionen entsteht, auch wenn nur in geringen Mengen.[42] Es gibt aber auch Bioindikatoren, welche auf eine völlig andere Weise auf Leben hindeuten. Sollte jemand aus 78 Lichtjahren Entfernung ein Spektrum von der Erdatmosphäre analysieren, so wäre ein rapider Temperaturanstieg und ein erhöhter Anteil an radioaktiven Substanzen erkennbar. Das

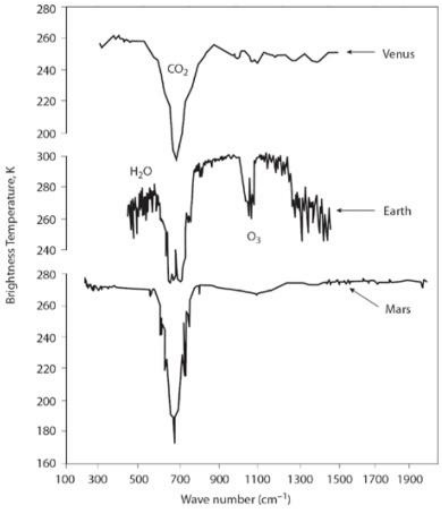

Abbildung 14

[41] vgl. Seager, 2010, S.92.
[42] ebd. S.360.

ist den amerikanischen Atombomben zu verdanken, welche über Hiroshima und Nagasaki abgeworfen wurden. Sie enthielten chemische Stoffe, wie u. A. Plutonium, welche nur synthetisch hergestellt werden können.[43] Wenn man also in der Atmosphäre eines Exoplaneten Stoffe finden würde, welche nicht auf natürliche Weise vorkommen, wäre das auch ein glasklarer Beweis für intelligentes Leben. Allerdings ist es auch möglich, dass es Planeten mit solchen Lebensformen gibt, die wir nicht kennen, weil sie auf der Erde nicht vorkommen. In diesem Fall können wir nicht wissen, was ein Bioindikator ist und was nicht. Unter den bisher ≈5000 Exoplanet und ≈9000 Kandidaten[44] für Exoplaneten gibt es keinen einzigen Planeten, wo man mit einhundertprozentiger Wahrscheinlichkeit sagen könnte, dass es dort Leben gibt.[45]

8. Temperatur von Planetenatmosphären

Um die Atmosphäre eines Planeten beschreiben zu können, reicht nicht eine einzige Temperaturangabe. Genauso wie auf der Erde ändern sich Temperaturen auf jedem Planeten mit der Höhe, mit waagerechter Position sowie von Tag auf Nacht und von Jahreszeit zu Jahreszeit. Welchen Wert soll man also verwenden? Die Temperatur ist ein wichtiger Parameter, welcher in erster Linie den chemischen Gleichgewichtszustand eines Planeten und damit das entstehende Spektrum bestimmt. Deswegen werden im Folgenden die 3 am häufigsten verwendeten Temperaturen erläutert, welche zur Beschreibung eines Planeten verwendet werden.[46]

[43] vgl. Csizmadia, 2023.
[44] Ein wahrscheinlicher Exoplanet entdeckt mit einem Teleskop, welcher noch nicht nachgewiesen wurde. Ein Kandidat muss durch 2 weitere Beobachtungen verifiziert werden.
[45] Brennan, Discovery 2023.
[46] vgl. Seager, 2010, S.53.

8.1 Die Effektivtemperatur T_{eff}

Die Effektivtemperatur wird als Proxy für die globale Temperatur der Atmosphäre eines Planeten verwendet. Sie ist definiert als die Temperatur eines schwarzen Strahlers in gleicher Entfernung, wie der Planet, welcher dieselbe Form und den gleichen gesamten Strahlungsfluss hat, wie der Planet. Hier bezieht sich der Gesamtfluss auf den über alle Wellenlängen oder Frequenzen integrierten Fluss. T_{eff} ist prinzipiell ein Messwert, bei dem der Gesamtfluss in Oberflächenfluss (z. B. der auf den Planeten gestrahlte Fluss) umgerechnet und die Temperatur eines schwarzen Strahlers mit demselben Gesamtfluss ermittelt wird. Laut dieser Definition kann man mit Hilfe von Formel 13 eine Gleichung für T_{eff} ableiten. Dazu wird noch die Planck Funktion benötigt, welche die Intensität der Schwarzkörperstrahlung in Abhängigkeit von der Zeit T und Frequenz v beschreibt.[47]

$$(13) \quad B(T,v) = \frac{2 * h * v^3}{c^2} * \frac{1}{e^{\frac{h*v}{k*T}} - 1}$$

h… Planck´sche Konstante

k… Boltzmann´sche Konstante

c… Lichtgeschwindigkeit im Vakuum

Nun wird der Schwarzkörperfluss über alle Frequenzen integriert unter der Annahme, dass der Oberflächenfluss über die gesamte Oberfläche des Objektes gleichmäßig ist.

$$(14) \quad F_s \equiv \int_0^\infty F_s(v)dv = \pi \int_0^\infty B(t,v)dv \equiv \sigma_r * T_{eff}^4$$

σ_r… Stefan-Boltzmann Konstante

F_s… Oberflächenfluss des Planeten

[47] vgl. Seager, 2010, S.53f.

Die Abbildungen 15 und 16 zeigen die Definition der Effektivtemperatur auf 2 verschiedenen Sterne. Dabei ist die gestrichelte Linie die jeweilige Schwarzkörperstrahlung. HD 149026 (Abb. 15) hat einen Sternenfluss ähnlich dem eines Schwarzen Strahlers. GJ 436 (Abb. 16) weicht jedoch erheblich von der Schwarzkörperstrahlung ab. Die Effektivtemperatur beschriebt die globale Temperatur auf der Höhe, wo der Großteil der Strahlung den Planeten, bzw. Stern verlässt. Manchmal wird diese Höhe auch als Photosphäre oder Oberfläche des Planeten bezeichnet, unabhängig davon, ob die Höhe auf der Planetenoberfläche liegt oder nicht. T_{eff} kann sich stark von der Oberflächentemperatur unterscheiden, wie es bei der Venus der Fall ist. Dort beträgt die Effektivtemperatur etwa 230 K. Dieser Wert kommt von der Wolkendecke, welche die feste Oberfläche des Planeten verdecken. Der massive Treibhauseffekt auf dem Planeten bewirkt auch, dass die Oberflächentemperatur der Venus mit 730K fast 500 K höher ist als ihre Effektivtemperatur. T_{eff} variiert sehr stark bei Planeten. Die kältesten Planeten des Sonnensystems, Uranus und Neptun, haben T_{eff}=59 K. Jupiters Effektivtemperatur beträgt 124 K, während die Erde ca. 255 K hat. Bei Exoplaneten kann man den Effektivwert der Temperatur leider nicht messen. Es gibt jedoch Schätzungen, die so weit gehen, dass einige heiße Jupiter eine Effektivtemperatur von mehr als 2000 K haben könnten.[48]

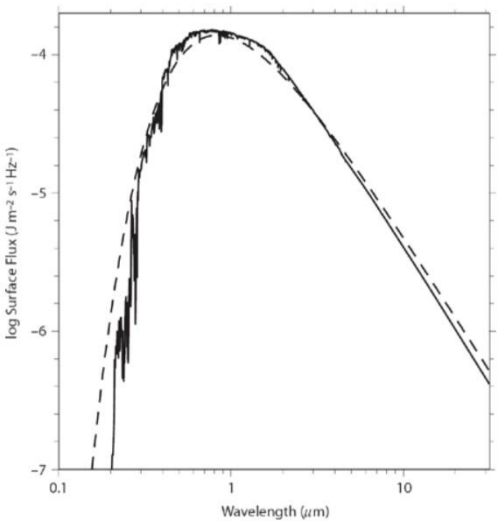

Abbildung 15

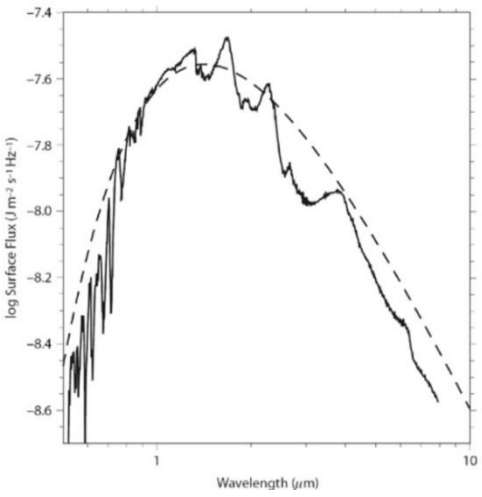

Abbildung 16

[48] vgl. Seager, 2010, S.55.

8.2 Die Gleichgewichtstemperatur T_{eq}

T_{eq} ist eine Schätzung für die Effektivtemperatur eines Planeten ohne innere Leuchtkraft. Sie ist eine theoretische Zahl und bezieht sich nicht auf Flussmessungen des Planeten. Physikalisch betrachtet ist die Gleichgewichtstemperatur die Effektivtemperatur, die ein isothermer Planet erreicht, nachdem er ein vollständiges Gleichgewicht mit der Strahlung seines Zentralsternes erreicht hat.[49]

8.3 Die Helligkeitstemperatur $T_b(\nu)$

Der Strahlungsfluss eines Exoplaneten bei verschiedenen Wellenlängen oder Frequenzen ist die Größe, welche wir von der Erde aus messen können. Für physikalische Berechnungen sind Temperaturen eines Exoplaneten relevanter als dessen Strahlungsfluss. Dieser hängt von der Entfernung des Planeten zur Erde ab, wohingegen die Temperatur abstandsunabhängig ist. Gemessene Flüsse von Exoplaneten werden deshalb also gerne als Temperatur angegeben.

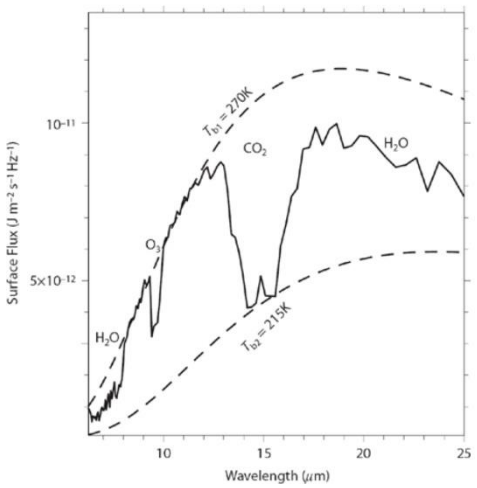

Abbildung 17

Um Fluss in Temperatur umzuwandeln, wird das Stefan-Boltzmann Gesetz angewandt. Die Helligkeitstemperatur geht davon aus, dass sich der Planet nur in dem Frequenzbereich, in dem der Fluss gemessen wird, wie ein Schwarzer Strahler verhält. Während Schwarze Strahler eine konstante Helligkeitstemperatur haben, können Planeten mit Spektren, die von einem Schwarzen Strahler abweichen, ein $T_b(\nu)$ haben, welche je nach Wellenlänge oder Frequenz sich verändern kann (siehe Abb. 17). Die Helligkeitstemperatur ist definiert als die Temperatur eines schwarzen Strahlers mit derselben Form und Entfernung wie der Exoplanet und mit dem gleichen Strahlungsfluss wie der Planet in einem spezifischen Frequenzbereich. Deswegen ist der Ausdruck $T_b(\nu)$ von der Frequenz ν abhängig. Abbildung 17 verdeutlicht noch einmal die Definition der Helligkeitstemperatur. Die durchgezogene Linie stellt den Oberflächenfluss der Erde dar, welcher vom Mars Global Surveyor gemessen wurde. Die gestrichelten Kurven zeigen die Schwarzkörperflüsse bei unterschiedlichen Temperaturen und dass die Helligkeitstemperatur je nach Wellenlänge variieren kann. Aus dem Spektrum der Erde sehen wir, dass T_b (12 μm) ≈ 270 K und T_b (14,2 μm) ≈ 215 K. Die

[49] vgl. Seager, 2010, S.56f.

Helligkeitstemperatur ist zurzeit die einzige Temperatur, welche wir für Exoplaneten bestimmen können, weil dafür nur eine Frequenz oder Wellenlänge beobachtet werden muss. Um von der Helligkeitstemperatur auf die Effektivtemperatur zu kommen, muss auf einen Computercode für eine Modellatmosphäre zurückgegriffen werden.[50]

9. Planetare Albedo

Die Albedo ist ein Maß für das Rückstrahlungsvermögen einer Planetenatmosphäre oder einer Oberfläche. Genauer gesagt ist es das Verhältnis des von einem Planeten gestreuten Licht zum vom Planeten empfangenen Licht. Ebenso wie bei der Temperatur gibt es keine einzelne Albedo, die die Atmosphäre oder Oberfläche des Planeten beschreibt. Sie ist dennoch wichtig, weil sie uns Informationen über die Wolken- und Oberflächenbedingungen des Planeten liefert. Weiterhin kontrolliert die Albedo die Energiebilanz des Planeten, sowie die Effektivtemperatur. Ob ein Planet hell oder dunkel ist, hängt ebenso vom Rückstrahlungsvermögen ab. Ein Planet mit einem hohen Anteil an stark reflektierenden Wolken ist hell, wohingegen ein Planet ohne Wolken und Atmosphäre normalerweise dunkel ist. Venus ist der hellste von allen bisher bekannten Planeten und streut 75% der einfallenden Energie. Dafür sind die Wolken aus Schwefelsäure verantwortlich, welche den gesamten Planeten bedecken. Die Erde verfügt über stark reflektierende Wasser- und Eiswolken, welche aber nur etwa die Hälfte der Erdoberfläche überdecken. Das hat zur Folge, dass die Erde nur etwa 30% der einfallenden Energie streut. Eiskörper können auch hell sein, wobei junges Eis stärker reflektiert als altes. Bemerkenswert ist, dass Enceladus, der sechstgrößte Saturnmond, über Wassergeysire verfügt, welche frisches Eis produzieren und den Mond besonders hell erscheinen lassen. Der Merkur besitzt keine Atmosphäre, Wolken oder Eis und ist sehr dunkel. Er streut kaum ein Zehntel der einfallenden Strahlung. Im Folgenden werden die am häufigsten verwendeten Albedos und die Beziehung zwischen ihnen erläutert.[51]

[50] vgl. Seager, 2010, S.58.
[51] ebd. S.60.

9.1 Der Phasenwinkel

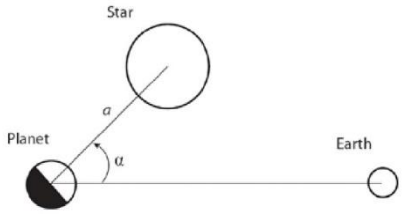

Abbildung 18

Bevor man die Planetenalbedo bestimmt, muss erst der Phasenwinkel α definiert werden. Dieser ist der Winkel zwischen Stern, Planet und Betrachter (siehe Abbildung 18). Laut dieser Definition entspricht α=0° einer Vollphase, α>170° einer dünnen Sichelscheibe und bei α=180° wird der Planet überhaupt nicht beleuchtet. Im Sonnensystem zeigen nur Merkur und Venus alle Beleuchtungsphasen von der Erde aus betrachtet. Die äußeren Gas- und Eisriesen zeigen nur wenige Grade im Phasenwinkel von der Erde aus. Die Vollphase, also α=0°, ist eine natürliche Konfiguration zur Beobachtung, wenn die Sonne, die Erde und der Planet in einer Linie ausgerichtet sind. Bei der Untersuchung von Exoplaneten hängt der Bereich der sichtbaren Planetenphasen von der Bahnneigung des Planeten-Stern-Systems ab. Zum Beispiel zeigt ein Planet mit einer Bahnneigung von 90° alle Phasen von der Erde aus gesehen (ausgenommen alle Phasen direkt in der Nähe von α=0°), wenn sich der Planet hinter dem Stern befindet. Ein Planet mit einer Bahnneigung von 0° (auch „Face-on" Bahnneigung genannt) hat jedoch eine konstante, „halbe" Phase. Im Gegensatz zu den Planeten des Sonnensystems werden nicht alle Exoplaneten mit α=0° sichtbar sein. Aufgrund der Zufälligkeit bei der Umlaufbahnneigung von Exoplaneten kann es sein, dass bei einigen Planeten kein α=0° auftritt. In der Realität kommt ein Phasenwinkel von 0° für Exoplaneten nicht vor, da der Planet hinter dem Zentralstern und somit für uns unsichtbar wäre. Für unsere Zwecke gehen wir jedoch davon aus, dass eines kleines α nah genug an α=0 liegt.[52]

9.2 Einzelstreualbedo ω

Der Einzelstreualbedo ω ist der Anteil des einfallenden Lichts, der von einem bestimmten Teilchen in der Planetenatmosphäre gestreut wird. Der Einzelstreualbedo eines Wassereiskristalls in der Erdatmosphäre kann bis zu 0,8 betragen. Der von einem Pflanzenblatt liegt im sichtbaren Wellenlängenbereich bei weniger als 0,1. Einzelstreualbedos sind von der Wellenlänge abhängig und weisen zudem große Abweichungen in der Erdatmosphäre auf. Verschiedene Wolkenarten können Albedos von 0,35 bis 0,8 haben und Sandwüsten können zwischen 0,2 und 0,35 liegen. Im unteren Reflexionsbereich befindet sich das Wasser, also die Ozeane, mit ω≤0,05. Der

[52] vgl. Seager, 2010, S.62f.

Einzelstreualbedo ist also kein globaler Wert für einen Planeten. Dennoch verursachen die reflektierenden Eigenschaften einzelner Gas-, Wolken- oder Oberflächenpartikel die globale Albedo durch komplexe Mehrfachstreuung einfallender Strahlung. Die gerichteten Streueigenschaften jedes einzelnen Teilchens sind von maßgeblicher Bedeutung für die Albedo des gesamten Planeten. Wenn überhaupt, sind es nur ganz wenige Teilchen in der Natur, die Strahlung isotrop streuen. Manche Teilchen, wie auch Eiskristalle streuen die einfallende Strahlung zurück. Diese gerichtete Streueigenschaft wird als „bidirektionale Streueigenschaft“ (engl.: bidirectional reflection distribution function oder kurz: BRDF) bezeichnet. [53]

9.3 Die geometrische Albedo $A_g(v)$

Das Verhältnis des Flusses eines Planeten bei einem Phasenwinkel von 0° zum Fluss von einer Lambert-Scheibe in derselben Entfernung und mit derselben Querschnittsfläche wie der Planet (d.h. einer Oberfläche, die den gleichen Raumwinkel einschließt) bezeichnet man als geometrische Albedo $A_g(v)$. Diese Definition stammt aus frühen Beobachtungen des Sonnensystems. Um die Albedo der Planeten des Sonnensystems zu messen, wurden fotographische Helligkeiten mit einem Foto einer gleichmäßig beleuchteten Lambert-Scheibe verglichen. Die Lambert-Scheibe ist ein Konzept der Optik, bei welcher angenommen wird, dass Licht, das auf eine ideal diffuse Oberfläche fällt, gleichmäßig in alle Richtungen gestreut wird, unabhängig vom Einfallswinkel, wodurch eine gleichmäßige Helligkeitsverteilung auf der Oberfläche entsteht. Diese relative Messung eliminierte instrumentelle Fehler. Die geometrische Albedo ist nicht der Anteil einfallender Energie, sondern lediglich ein Verhältnis. Deswegen kann $A_g(v)$ auch unter Umständen größer als 1 sein. Die geometrische Albedo einer Lambert Kugel ist $A_g(v)= 2/3<1$, obwohl die Definition einer Labert Kugel darin besteht, dass jegliche Strahlung gestreut und keine absorbiert wird. Das bedeutet, dass bei der Kugel ein Drittel der einfallenden Strahlung außerhalb der Sichtlinie gestreut wird. Der Eismond Enceldaus des Saturns hat eine geometrische Albedo von 1,38 für die sichtbare Wellenlänge. Eis kann einen sehr starken Rückstreueffekt haben, wodurch die reflektierte Strahlung größer ist als die Streustrahlung der jeweiligen Lambert-Scheibe. Obwohl es bei Exoplaneten nicht möglich ist $A_g(v)$ zu bestimmen, ist die geometrische Albedo sehr hilfreich bei der Klassifizierung theoretischer Modelle.[54]

[53] vgl. Seager, 2010, S.61f.
[54] ebd. S. 63f.

9.4 Die Bindungsalbedo A_b und die sphärische Albedo A_s

A_b ist der Anteil der einfallenden Strahlung, welcher vom Planeten zurück in den Weltraum gestreut wird. Sie umfasst die in alle Richtungen gestreute Strahlung und die Strahlung bei allen Frequenzen. Laut Definition ist $A_b \leq 1$. Die sphärische Albedo hat dieselbe Definition wie die Bindungsalbedo nur für eine bestimmte Frequenz.

$$A_B = \int_0^\infty A_s(v)dv$$

Sowohl A_S als auch A_B sind vom Spektrum des Zentralsterns des Planeten abhängig. [55]

9.5 Die Beziehung zwischen der Bindungsalbedo und der geometrischen Albedo

Um die Bindungs- oder sphärische Albedo zu messen, müsste man den Planeten bei allen Phasenwinkeln beobachten. Es sind aber normalerweise nicht alle Phasenwinkel von der Erde aus zu sehen. Um A_b und A_s abzuschätzen ist es hilfreich sie mit der geometrischen Albedo in Beziehung zu setzen. Für eine Lambert-Kugel ist $A_g(v)$ kleiner als A_s um den Faktor 2/3. Man kann das so verstehen, dass bei der Lambert-Kugel die gesamte Strahlung zurück ins All gestreut wird und weil die sphärische Albedo die Strahlung aller Winkel einschließt, gilt: $A_s \equiv A_B = 1$. Die geometrische Albedo ist jedoch nur die Albedo bei Phasenwinkel 0 und umfasst nur die gestreute Strahlung in Richtung des Betrachters. Also ist sie weniger als 1. In Abbildung 19 ist die komplette geometrische Albedo von Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun mit ihren Bindungsalbedos verglichen. „Totale geometrische Albedo“ bedeutet in diesem Fall die über alle Wellenlängen integrierte geometrische Albedo. Die durchgezogene Linie (A_{gTot}/A_B=0,67) steht für das isotrope Lambert´sche Reflexionsvermögen (konstant für alle Einfallswinkel). Die gestrichelte Linie ist, wo $A_{gTot}=A_B$. Alle Gasriesen mit tiefen Atmosphären müssen sich rechts von dieser Linie befinden. Der Keil zwischen den beiden Linien definiert einen Begrenzungsbereich. Er begrenzt die photometrischen Eigenschaften der meisten kugelförmigen Körper mit tiefen

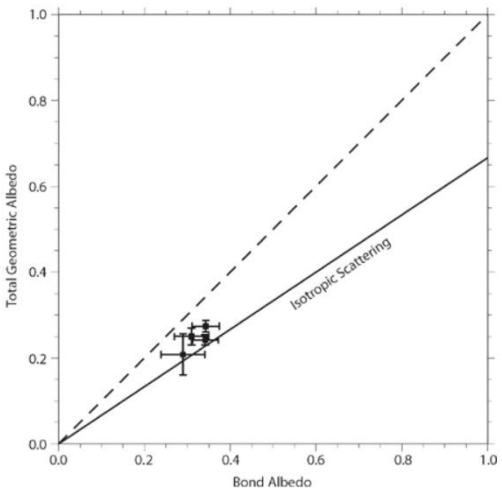

Abbildung 19

[55] vgl. Seager, 2010, S.67f.

Atmosphären. Die eingezeichneten Punkte sind in der Reihenfolge (nach zunehmender A_B) Uranus, Neptun, Saturn und Jupiter.[56]

9.6 Die scheinbare Albedo

Für Exoplaneten sind keine der bisher aufgeführten Albedos von großem Vorteil. Die geometrische Albedo ist definiert bei einer Vollphase $\alpha=0°$, wo der Planet sich hinter dem Stern befindet und nicht beobachtbar ist. Sphärische und Bindungsalbedo sind ebenfalls nicht messbar, weil nicht alle Phasenwinkel der Exoplaneten sichtbar sind. Mit Direct Imaging werden viele Phasen, wo der Planet sehr nah am Zentralstern ist, nicht messbar sein. Darüber hinaus wird der Exoplanet von der Erde aus betrachtet nicht alle Phasen durchlaufen, es sei denn, die Umlaufbahn des Planeten befindet sich direkt auf unserer Sichtlinie. Deswegen verwendet man bei Exoplaneten oft die scheinbare Albedo. Diese ist definiert, als das Verhältnis zwischen dem Streufluss, der vom Planeten in Richtung Beobachter austritt, und dem Streufluss einer perfekt reflektierender Lambert-Kugel mit der gleichen Größe wie der Planet, demselben Phasenwinkel und derselben Entfernung vom Beobachter. Mit anderen Worten ist sie der Reflexionsgrad eines Planeten in Richtung des Betrachters zu einem bestimmten Zeitpunkt. Die scheinbare Albedo ist die einzige Albedogröße, welche theoretisch nach einer einzelnen Beobachtung für einen Planeten mit einer bekannten Größe abgeleitet werden kann. Sie ist eine Funktion des Phasenwinkels und der Frequenz.[57]

10. Instrumente zur Untersuchung von Exoplaneten

Beispiel: James Webb Space Telescope

Das JWST begann am 25. Dezember 2021 um 13:20 mitteleuropäischer Sommerzeit auf der Ariane 5 seine Reise in die Tiefen des Universums aus dem Raumfahrtzentrum in Französisch-Guyana.[58] Mit Kosten von mehr als 10 Milliarden USD sind die Instrumente der Raumsonde auf dem neusten Stand der Technik. Der Spiegel ist mit einem Durchmesser von 6,5m der größte, welcher je ins Weltall befördert wurde. Aufgrund ihrer Größe musste die Raumsonde

[56] vgl. Seager, 2010, S.70.
[57] ebd. S.72.
[58] National Aeronautics and Space Administration, Mission Timeline, 2024.

beim Transport in der Rakete gefaltet werden.[59] James Webb kann viel weiter in die Vergangenheit zurückschauen als Hubble, weil andere Wellenlängen untersucht werden können, wie aus Abbildung 20 zu entnehmen ist.[60] Das Licht welches vom JWST untersucht wird, wurde von Sternen ausgesadt, welche bereits 1-2 Milliarden Jahre nach dem Urknall lebten. Die Wellenlänge dieses Lichts liegt aufgrund der gravitativen Rotverschiebung im Infrarotbereich. Neben den Daten über das frühe Universum liefert James Webb ebenfalls zahlreiche Informationen über Exoplaneten. Sowohl von Kandidaten als auch über bereits bekannte. Das Webb ist ein Infrarotteleskop, welches 2 große Herausforderungen beim Bau darstellte. Der Spiegel muss sehr groß sein, um genug Licht einfangen zu können. Zudem muss er gekühlt sein, um ungewollte Wärmestrahlung zu vermeiden. Deswegen trennt der Sonnenschutz das Teleskop in 2 Teile: Die warme Seite und die kalte Seite. Die kalte Seite, wo sich der Hauptspiegel befindet, zeigt dabei von der Erde weg und die warme Seite ist auf uns gerichtet. Hier befinden sich auch die integrierten Instrumente. Das äußere Design vom JWST ist sehr offen, damit er von alleine auf passive Weise sehr kalt werden kann. Die Elemente der Raumsonde müssen auf kryogene Temperaturen, also weniger als 50 K, heruntergekühlt werden, damit sie ordnungsgemäß arbeiten können. Das James Webb Space Teleskop wurde aber bei Raumtemperatur zusammengebaut und bei der Abkühlung auf kryogene Temperaturen schrumpfen Materialien um einen gewissen Grad. Deswegen wurden die einzelnen Bestandteile bewusst „falsch“ gebaut, damit die Komponenten zur passenden Größe schrumpfen und richtig arbeiten können.[61]

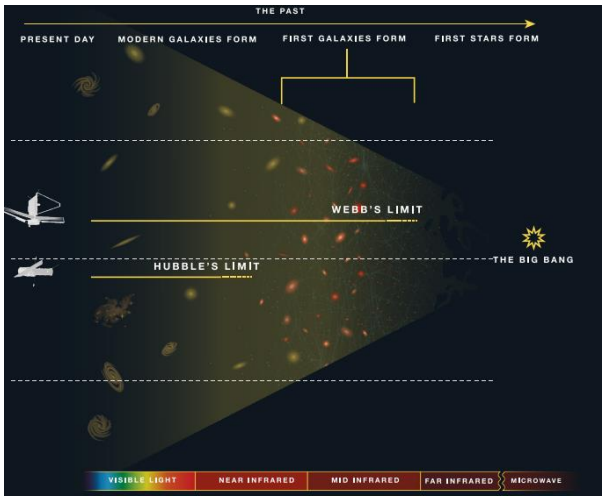

Abbildung 20

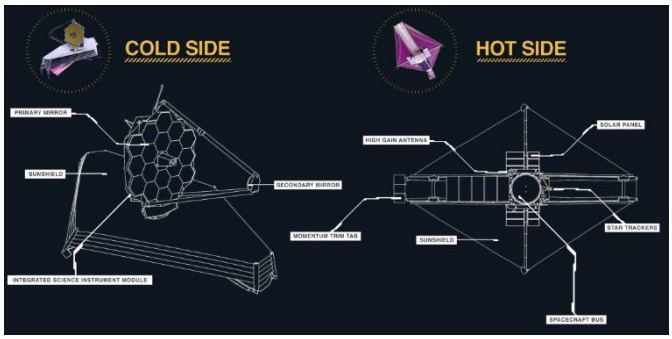

Abbildung 21

[59] National Aeronautics and Space Administration, Media Kit, 2023, S.23.
[60] ebd. S.9.
[61] ebd. S.38.

10.1 Das Drei-Spiegel System

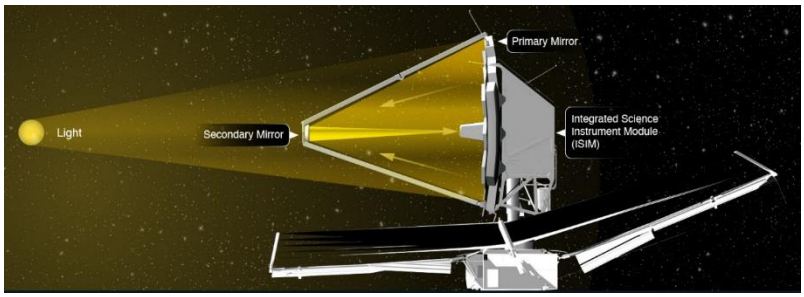

Abbildung 22

Der Hauptspiegel besteht aus 18 einzelnen konkaven, Hexagon förmigen Spiegeln mit jeweils 1,32m in Durchmesser und 20kg Gewicht. Die sechseckige Form erlaubt es einen annähernd kreisförmigen Spiegel zu bauen, ohne große Räume zwischen den Teilchen lassen zu müssen. Wenn es nicht die Aufteilung in Sechsecke gäbe, so bräuchte der Spiegel noch viel mehr Stützelemente im Außenskelett. Jedes Hexagon wurde beweglich gemacht, sodass sie sich so ausrichten können, dass sie als eine einzige große Optik funktionieren. Die annähernd kreisförmige Form hilft das Licht auf den kompaktesten Bereich der Detektoren zu fokussieren. Der sekundäre Spiegel ist im Durchmesser nur mehr 74cm und hat eine konvexe Form. Wie in der Abbildung 22 zu sehen ist, wird er von drei 7,6 m langen Armen in Position gehalten. Der tertiäre und der Umlenkspiegel (eng. fine steering mirror) befinden sich im Aft Optics Subsystem (AOS) in der Mitte des Hauptspiegels. Die Abbildung verdeutlicht weiterhin den Weg des Lichts vom Primärspiegel über den sekundären Spiegel, welcher es auf den tertiären Spiegel lenkt und schließlich den Umlenkspeigel, wonach es von den wissenschaftlichen Instrumenten analysiert wird, welche sich hinter dem Hauptspiegel im Integrated Science Instrument Module (ISIM) befinden. Die Spiegel des Webb bestehen aus Beryllium und sind mit einer mikroskopisch dünnen Goldschicht bedeckt. Diese Schicht ist etwa einhundert Nanometer (ca. 700 Atome) dünn und somit eintausendmal dünner als ein menschliches Haar. Es wurde Beryllium gewählt, weil das Metall leicht und für sein Gewicht dennoch stark ist und weil es seine Form auch im kryogenen Temperaturbereich relativ gut beibehält. Zudem ist Beryllium ein guter Strom- und Wärmeleiter und nicht magnetisch. Allerdings wurden die Segmente mit besonderer Rücksicht auf den gefährlichen Staub des Metalls gebaut. Dessen Schlucken oder Einatmen kann zu diversen Atemwegserkrankungen führen.[62][63]

[62] National Aeronautics and Space Administration, Media Kit, 2023, S.39.
[63] National Aeronautics and Space Administration, Web´s Mirrors, 2023.

10.2 Das Integrated Science Instrument Module

Im ISIM sind die 4 wissenschaftlichen Instrumente des James Webb integriert, welche das aufgenommene Licht analysieren. Diese befinden sich auf der kalten Seite der Raumsonde (siehe Abbildung 21), geschützt von elektromagnetischer Strahlung von der Sonne, der Erde und dem Mond. Die Nahinfrarot Instrumente (NIRCam, NIRSpec, FGS/NIRISS) haben eine Betriebstemperatur von 39 K und werden durch ein passives System gekühlt. Das Mittelinfrarot-Instrument (MIRI) arbeitet bei einer Temperatur von 7 K. Dafür wird ein Helium-Kühlschrank und ein Kryokühlersystem verwendet. Die Instrumente können in 2 übergreifenden Betriebsmodi arbeiten: Fotographie und Spektroskopie. Eine Vielzahl von Werkzeugen, wie Kameras, Spektrographen und Koronagraphen werden verwendet, um das Maximum aus jeder Observation herauszuholen. Jeder Apparat im ISIM hat sein eigenes Sichtfeld, einzigartig in Fläche, Form und Ausrichtung.

10.2.1 Near-Infrared Camera (NIRCam)

Die NIRCam ist die Hauptkamera des Webb, mit welcher die meisten Bilder entstehen. Das Gerät kann aber auch für Spektroskopie genutzt werden. Es arbeitet im Bereich von 0,6µm bis 5µm. Licht mit dieser Wellenlänge wird von Staubwolken nicht aufgehalten und kann diese einfach durchdringen. Deswegen sehen wir sie nicht und können noch weiter ins Universum schauen. Es entstehen dabei Bilder von den ersten Galaxien und Sternen. Auch fotografiert die NIRCam Objekte aus der Milchstraße, wie z. B. im Kuiper Gürtel. Die Kamera hat insgesamt 10 Detektorreihen, bestehend aus Quecksilber-Kadmium-Tellurid (HgCdTe). Die NIRCam ist mit Koronagraphen ausgestattet, welche uns ermöglichen, Bilder von überbeleuchteten Objekten zu machen, indem das Licht ihrer jeweiligen zentralen Lichtquelle blockiert wird. So können wir Planeten untersuchen, welche nahelegende Sterne umkreisen. Auch Trümmerscheiben um ältere Sterne werden durch Koronagraphen sichtbar. Zudem sind auch Spektrographen in der NIRCam enthalten, mit welchen die Helligkeit jeder einzelnen Wellenlänge genau analysiert wird. Das Sichtfeld der Kamera ist etwa 2,2 x 2,2 Bogenminuten groß. Zum Vergleich hat der Vollmond einen Durchmesser von 31 Bogenminuten am Nachthimmel. Die Nahinfrarot Kamera stammt von einem Team der University of Arizona und dem Lockheed Martin´s Advanced Technology Center.[64][65]

[64] vgl. Piper, 2011, S.148.
[65] National Aeronautics and Space Administration, Media Kit, 2023, S.45.

10.2.2 Near-Infrared Spectrograph (NIRSpec)

Der NIRSpec ist ein sehr vielseitiges Instrument des James Webb. Er arbeitet im selben Wellenlängenbereich, wie die NIRCam. Zusätzlich zur Einzelspaltspektroskopie zur Erfassung von Spektren spezifischer Objekte kann der NIRSpec bis zu 100 Objekte gleichzeitig beobachten und analysieren. Er ist somit der erste Spektrograph im Weltraum mit dieser Multiobjektfähigkeit. Die Bezeichnung dafür ist „Microshutter-Array“. Die Mikroverschlusszellen des NIRSpec verfügen über einen Deckel, welcher sich öffnet und schließt, wenn ein magnetisches Feld angelegt wird. Jede von den insgesamt 62000 Zellen ist etwa so breit wie ein menschliches Haar und kann einzeln gesteuert werden. So können einzelne Teile des Himmels blockiert werden, um andere Teile besser sehen zu können. Die gesamte Apparatur ist dabei nicht größer als eine Briefmarke. Die Zellen bestehen alle aufgrund der hohen Belastbarkeit des Metalls aus Siliziumnitrid (Si_3N_4). Viele Objekte, welche vom James Webb beobachtet werden, sind so dunkel und weit entfernt, dass selbst mit dem 6,5m Hauptspiegel mehrere hundert Stunden für ein einziges Spektrum nötig sind. Das Instrument wurde von Airbus Industries für die ESA gebaut. Das Microshutter-Array, sowie die Detektor-Subsysteme kamen allerdings von NASA. Die Daten für Abbildung 12 stammen vom NIRSpec.

10.2.3 Mid-Infrared Instrument (MIRI)

MIRI ist ebenfalls mit Kameras, Spektrographen und Koronagraphen ausgerüstet. Es untersucht Wellenlängen im Bereich von 5 µm bis 28,3 µm. In diesem Bereich kann man, wie in Abbildung 23 zu sehen ist, Planeten, Kometen und Asteroiden beobachten. Staub wird vom Sternenlicht erwärmt, weswegen er auch zu sehen ist. Auch protoplanetare Scheiben kann man im mittleren Infrarot untersuchen. Zusätzlich verfügt es über eine integrierte Feldeinheit, welche eine Kombination aus Kamera und Spektrograph ist. Sie wird verwendet, um Spektren über ein Sichtfeld zu erfassen und zu kartieren. MIRI ist sowohl für die Untersuchung der Rotverschiebung entfernter Galaxien, neu entstehender Sterne, schwach sichtbarer Kometen sowie von Objekten im Kuipergürtel verantwortlich. Das

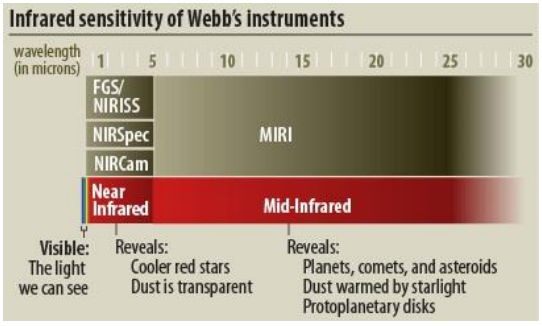

Abbildung 23

Instrument muss noch kälter als die anderen gehalten werden, weil es noch weiter ins All sehen kann. Der 2-stufige Kryokühler des Webb funktioniert wie ein unglaublich effizienter Kühlschrank. Er pumpt ein wärmeabsorbierendes Gas durch das Instrument und senkt die Temperatur bei der ersten Stufe auf 18 K. Bei der zweiten Stufe bringt das Joule-Thomson Kreislaufkühlsystem die MIRI-Detektoren auf 7 K. Diese arsendotierten Detektoren bestehen aus Silizium und verfügen über eine Auflösung von 1024 x 1024 Pixeln. Das ist nur die Hälfte der Auflösung von den Detektoren des Nahinfrarotbereiches.[66]

10.2.4 Fine Guidance Sensor/ Near Infrared Imager and Slitless Spectrograph (FGS/NIRISS)

NIRISS ist ebenfalls ein Fotographie- und Spektroskopie Tool des Webb. Es ist jedoch das einzige Instrument, welches mit einer Aperturmaske ausgestattet ist. Diese ermöglicht uns, hochauflösende Bilder von sehr hellen Objekten zu machen. Die Maske besteht aus einer Metallplatte mit 7 sechseckigen Löchern, welche vor den Detektoren platziert sind. Auch NIRISS arbeitet, wie die anderen Nahinfrarotinstrumente, im Wellenlängenbereich von 0,6 μm bis 5 μm. NIRISS hat einmal den *Wide-Field Slitless Spectroscopy* Modus, indem das Gesamtspektrum eines weiten Sichtfeldes, wie Teil einer Galaxie oder mehrere Galaxien, analysiert wird. Der andere Modus ist die Single Object Slitless Spectroscopy, bei welcher das Spektrum eines Objekts in einem Sichtfeld untersucht wird. Zum Beispiel das eines Sterns.[67]

Im selben Gehäuse wie NIRISS befindet sich auch das FGS. Der Fine Guidance Sensor ist ein Kamerasystem, welches dafür sorgt, dass das James Webb Space Telescope während der gesamten Beobachtung stabil bleibt und in die gleiche Richtung zeigt. Das FGS erkennt und identifiziert während der Beobachtung sogenannte Leitsterne und sorgt dafür, dass das Webb auf diese Sterne fixiert ist. Dafür sind 2 HgCdTe Detektorreihen eingebaut.

Die Instrumente wurden von der kanadischen Weltraumorganisation entwickelt. Honeywell International, sowie die Université de Montréal waren an der Entwicklung ebenso beteiligt.[68]

[66] National Aeronautics and Space Administration, Media Kit, 2023, S. 45.
[67] ebd. S.45.
[68] vgl. Piper, 2011, S.148.

11. Interessanteste Exoplaneten

11.1 Gliese-581-System

Das System, benannt nach Wilhelm Gliese, ist von uns nur 20,3 Lichtjahre entfernt. Das Zentralgestirn ist ein Roter Zwergstern mit 1/3 der Masse der Sonne. Um ihn kreisen 6 Planeten. Gliese 581 c mit 5-facher Erdmasse und Gliese 581 d mit 8-facher Erdmasse sind beide Supererden. Das heißt nur, dass sie große terrestrische (Gesteins-) Planeten sind und nicht, dass der Planet bewohnbar ist. Mit 1,9 Erdmassen ist Gliese 581 e der erdähnlichste Planet des Systems. Leider ist der Planet aber zu nah am Zentralstern (0,03 AE) und somit nicht in der habitablen Zone. So kann der Planet auch keine Atmosphäre haben, denn bei so einer geringen Distanz haben stellare Winde schon jegliche Atmosphäre abgetragen.[69]

11.2 HD 209458 B

Der 150 Lichtjahre entfernte Planet ist ebenfalls bekannt als Osiris (ägyptischer Gott). Obwohl er nur etwa 2/3 Jupitermassen hat, ist er etwas größer als der Jupiter. Das liegt daran, dass der Planet sehr nah am Zentralstern ist und deswegen die Atmosphäre enorm aufgeheizt wird. Bekannt wurde der Planet durch seinen einzigartigen „Kometenschweif“. Dieser entsteht durch die extremen Entweichungsprozesse der Atmosphäre, hauptsächlich ausgelöst durch die Sonnenwinde. Untersuchungen durch Hubble ergaben, dass die Atmosphäre große Mengen an Wasserstoff enthält und die Winde auf dem Planeten Geschwindigkeiten bis 10000 km/h erreichen. In Abbildung 24 ist der Transit des Exoplaneten zu erkennen.[70]

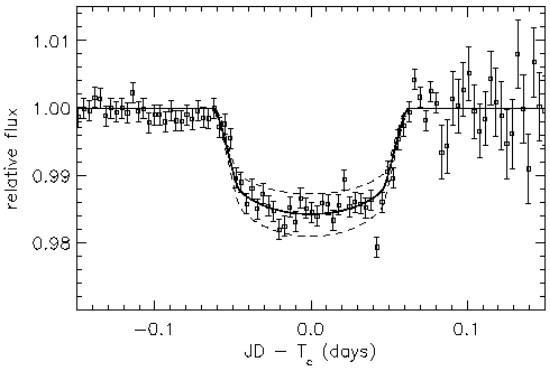

Abbildung 24

[69] vgl. Piper, 2011, S. 122f.
[70] ebd. S.126f.

11.3 GJ 367 b

Der merkurähnliche Planet wurde 2021 von einem Team des DLR unter der Leitung von Dr. Lam und Dr. Csizmadia entdeckt. Er ist aufgrund einer Orbitalperiode von gerade einmal 7,7 Stunden sehr interessant. Die Dichte des Planeten lässt sich aus der Masse und dem Radius herleiten. Wegen der hohen Dichte von GJ 367 b wird angenommen, dass der Planet fast ausschließlich aus Eisen besteht. Der Stern, um welchen er kreist, ist ein Roter Zwergstern der Spektralklasse M mit einer Effektivtemperatur von 3519 ± 70 K. In Abbildung 25 wird Masse dem Radius gegenübergestellt. Hier wird deutlich, dass der Eisenanteil um die 90% sein muss. Der berechnete Wert liegt bei 86 ± 5%.[71]

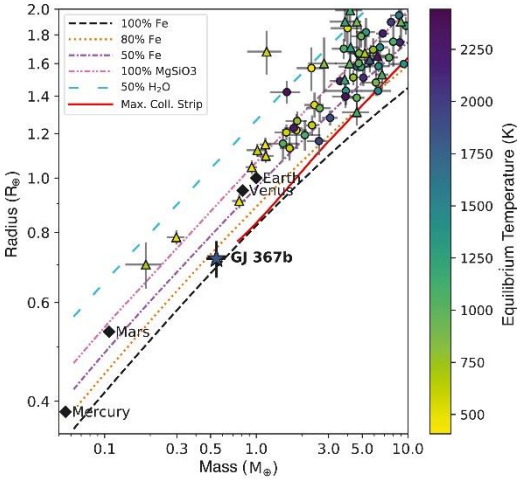

Abbildung 25

11.4 55 Cancri

Das 55 Cancri System ist ein Doppelsternsystem welches 41 Lichtjahre von der Sonne entfernt ist und sich im Sternbild Krebs befindet. Die 2 Sterne sind aber als 1000 Astronomische Einheiten voneinander entfernt. Das System hat 5 bisher bekannte Planeten. Der äußerste Planet ist ein Gasriese und nur 6 AE vom Stern entfernt.[72]

[71] Lam, 2021.
[72] vgl. Piper, 2011, S.132f.

12.Fazit

Allein mithilfe des Lichts, welches von den extrasolaren Planetensystemen kommt, kann man sehr viele Aussagen über die einzelnen Planeten treffen. Die Exoplanetenforschung ist allerdings noch ein sehr junges Feld der Wissenschaft mit vielen unbeantworteten Fragen. Beispielsweise kann die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre eines Exoplaneten untersucht werden. Man kann jedoch nur vermuten, wie sie entstanden ist. Weiterhin weiß man wenig darüber, wie sich Exoplanetensysteme über längere Zeiträume (>10.000a) verhalten, weil man sie erst seit etwa 30 Jahren kennt. Zukünftige Forschungsprojekte, wie Ariel oder Plato sind trotz allem sehr vielversprechend und werden dazu beitragen, unser Verständnis über diese Planeten zu erweitern. Die Instrumente der Weltraumsonden werden immer präziser und können mehr Informationen aus dem Licht erfassen. Auch wenn wir in der nahen Zukunft die Exoplaneten nicht bereisen werden können, gibt es dennoch sehr viele weitere Meilensteine, die in den nächsten Jahren, bzw. Jahrzehnten erreicht werden können. Eine riesige Errungenschaft wäre zum Beispiel das Direct Imaging von erdähnlichen Planeten. Diese Suchmethode ist zurzeit leider noch beschränkt auf große und junge Gasriesen, jedoch ist es vorstellbar, dass mit verbesserten Instrumenten die Suche auf andere Planetenarten ausgeweitet werden kann.

Das Verfassen dieser Arbeit hat mir große Freude bereitet und mich dazu motiviert, auch nach meiner Schullaufbahn mich mit dem Thema auseinanderzusetzen.

13.Quellen:

Literaturquellen:

Bakheri, Fatemeh: Detection of exoplanet as a binary source of microlensing events in WFIRST survey. Royal Astronomical Society, Volume 490, Issue 2: Oxford 2019

Barstow, J. K.: A Consistent Retrieval Analysis Of 10 Hot Jupiters Observed in Transmission. The Astrophysical Journal, Volume 834, Number 1: USA 2016

Benneke, Björn: Water Vapor and Clouds on the Habitable-zone Sub-Neptune Exoplanet K2-18b. The Astrophysical Journal Letters, Volume 887, Number 1, USA 2019

Charbonneau, David: Detection of an Extrasolar Planet Atmosphere. The Astrophysical Journal, Volume 568, Number 1: USA 2002

Piper, Sven: Exoplaneten: Die Suche nach der zweiten Erde. Springer Berlin Heidelberg. Berlin: 2011

Redfield, Seth: Sodium Absorption from the Exoplanetary Atmosphere of HD 189733b Detected in the Optical Transmission Spectrum. The Astrophysical Journal Volume 673 Number 1: USA 2008

Seager, Sara: Exoplanet Atmospheres: Physical Processes. Princeton University Press. New Jersey: 2010

Interview:

Szilas, Kristóf: Persönliches Interview zum Thema „Exoplaneten“. Geführt mit Csizmadia, Szilárd, PhD. Trahütten am 23.04.2023 [AC, Transkript]

Vortrag:

Lam, Kristine (2023): The world of exoplanets. (Vortrag, 17.08.2023). Ispánk (Ungarn)

Internetquellen:

Berg, Ingo: Mikrolinsenereignisse. 19.12.2023.
https://beltoforion.de/de/exoplaneten/microlensing.php [Zugriff: 15.01.2024]

Berg, Ingo: Radialgeschwindigkeitsmethode. 19.12.2023
https://beltoforion.de/de/exoplaneten/radialgeschwindigkeitsmethode.php [Zugriff: 16.01.2024]

Brennan, Pat: Discovery. 13.01.2024. https://exoplanets.nasa.gov/discovery/exoplanet-catalog/ [Zugriff: 13.01.2024]

Brennan, Pat: WASP-39b. https://exoplanets.nasa.gov/exoplanet-catalog/5673/wasp-39-b/ [Zugriff: 17.09.2023]

Büker, Michael: Wie lassen sich Exoplaneten aufspüren? 01.11.2013.
https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/exoplaneten/nachweismethoden/ [Zugriff: 19.10.2023]

Charbonneau, David et al.: Detection of Planetary Transits Across a Sun-like Star. 23.11.1999. https://www.hao.ucar.edu/research/stare/preprint.pdf [Zugriff: 02.08.2023]

Helmich, Ulrich: Ozonschicht. Wirkung der Ozonschicht. 13.04.2020. https://www.u-helmich.de/che/lexikon/O/ozonschicht.html#:~:text=Sauerstoff%2DMolek%C3%BCle%20(O2),energiereich%20genug%20f%C3%BCr%20diese%20Photolyse. [Zugriff: 19.12.2023]

James, Andy: Scientific Instruments on the James Webb Space Telescope: Near-Infrared Camera (NIRCam). 15.07.2021.
https://webbtelescope.org/contents/media/images/01FA0SZSEW1TZ51BHG0EGW2EZP [Zugriff: 18.09.2023]

James, Andy: Scientific Instruments on the James Webb Space Telescope: Near-Infrared Imager and Slitless Spectrograph (NIRISS). 15.07.2021.
https://webbtelescope.org/contents/media/images/01FA0T0WM3X65FFXM0JBR4C5ZB?page=2&filterUUID=ef24fd3f-003b-4ec2-8f6b-f799c444d092 [Zugriff: 18.09.2023]

Kasang, Dieter: Aufbau der Atmosphäre. 22.08.2023. https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Aufbau_der_Atmosph%C3%A4re#Chemische_Zusammensetzung [Zugriff. 18.09.2023]

Lam, Kristine et al.: GJ 367b: A dense, ultrashort-period sub-Earth planet transiting a nearby red dwarf star. 02.12.2021 https://www.science.org/doi/10.1126/science.aay3253 [Zugriff: 02.08.2023]

Las Cumbres Observatory: Direct Imaging. https://lco.global/spacebook/exoplanets/direct-imaging/#:~:text=Direct%20imaging%20uses%20infrared%20wavelengths,times%20brighter%20at%20visual%20wavelengths [Zugriff: 19.09.2005]

Mugrauer, Markus: Radialgeschwindigkeit. https://www.astro.uni-jena.de/EXO/radvel/radvel.pdf [Zugriff: 12.10.2023]

National Aeronautics and Space Administration: Media Kit. https://www.webb.nasa.gov/content/webbLaunch/assets/documents/WebbMediaKit.pdf [Zugriff: 15.02.2023]

National Aeronautics and Space Administration: Mission Timeline. https://webbtelescope.org/news/milestones/mission-timeline#:~:text=December%2025%2C%202021%3A%20NASA's%20James,in%20French%20Guiana%2C%20South%20America. [Zugriff: 15.02.2024]

National Aeronautics and Space Administration: Webb´s Mirrors. https://jwst.nasa.gov/content/observatory/ote/mirrors/index.html [Zugriff: 15.02.2024]

Sing, David et al.: Transmission spectral properties of clouds for hot Jupiter exoplanets. 14.05.2014. https://www.researchgate.net/publication/266204160_Transmission_spectral_properties_of_clouds_for_hot_Jupiter_exoplanets [Zugriff: 02.08.2023]

The planetary society: Space-Warping Planets: The Microlensing Method. https://www.planetary.org/articles/space-warping-planets-the-microlensing-method [Zugriff: 19.10.2023]

Universität Heidelberg. https://www.physi.uni-heidelberg.de/~eisele/schuelerlabor/SpektroskopieUmweltphysikExperimente.pdf [Zugriff: 15.02.2024]

Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 1:

Mugrauer, Markus: Radialgeschwindigkeit https://www.astro.uni-jena.de/EXO/radvel/radvel.pdf [Zugriff: 10.02.2024]

Abbildung 2:

K. P. Haupt: Radial und Tangential: Dopplereffekt am Beispiel des Lichtes. Blau- und Rotverschiebung. 01.03.2021 https://physikkursq3lichtundquanten.blogspot.com/2021/03/p-159-radial-und-tangential.html?utm_source=feedburner&utm_medium=feed&utm_campaign=Feed:+WasIstDennNunLichtVonMaxwellZuGequetschtenPhotonen+%28Was+ist+denn+nun+Licht?++Von+Maxwell+zu+gequetschten+Photonen%29&m=1 [Zugriff: 10.02.2024]

Abbildung 3:

Cowley, Michael; Hughes, Steven: Characterization of transiting exoplanets by way of differential photometry. 08.06.2016. https://www.researchgate.net/publication/262113563_Characterization_of_transiting_exoplanets_by_way_of_differential_photometry [Zugriff: 10.02.2024]

Abbildung 4:

Hustac, Leah; Olmsted, Joseph: Exoplanet WASP-39 b (NIRSpec Transit Light Curves). 25.08.2022. https://webbtelescope.org/contents/media/images/2022/042/01GB31JJZT8NSEZQCJ8BE5EY56?keyword=wasp [Zugriff: 10.02.2024]

Abbildung 5:

Stevenson, Kevin et al.: Exoplanet LHS 475 b (NIRSpec Transit Light Curve). 11.01.2023. https://webbtelescope.org/contents/media/images/2023/102/01GNVXWS67QNTC7Z10FN2CJB1H?keyword=lhs [Zugriff: 10.02.2024]

Abbildung 6:

Currie, Thayne et al.: Direct Imaging and Astrometric Detection of a Gas Giant Planet Orbiting an Accelerating Star. 13.04.2023. https://arxiv.org/pdf/2212.00034.pdf [Zugriff: 10.02.2024]

Abbildung 7:
Berg, Ingo: Mikrolinsenereignisse. 19.12.2023.
https://beltoforion.de/de/exoplaneten/microlensing.php [Zugriff: 10.02.2024]
Abbildung 8:

Bakheri, Fatemeh: Detection of exoplanet as a binary source of microlensing events in WFIRST survey. Royal Astronomical Society, Volume 490, Issue 2: Oxford 2019 [Zugriff: 10.02.2024]

Abbildung 9:

Seager, Sara: Exoplanet Atmospheres: Physical Processes. Princeton University Press. New Jersey: 2010 [Zugriff: 10.02.2024]

Abbildung 10:

Seager, Sara: Exoplanet Atmospheres: Physical Processes. Princeton University Press. New Jersey: 2010 [Zugriff: 10.02.2024]

Abbildung 11:

Sing, David et al.: Transmission spectral properties of clouds for hot Jupiter exoplanets. 14.05.2014.
https://www.researchgate.net/publication/266204160_Transmission_spectral_properties_of_clouds_for_hot_Jupiter_exoplanets [Zugriff: 10.02.2024]

Abbildung 12:

Stevenson, Kevin et al.: Exoplanet LHS 475 b (Transmission Spectrum). 11.01.2023.
https://webbtelescope.org/contents/media/images/2023/102/01GNVWTAZKPVD1GNC0HZF52YTB?keyword=lhs [Zugriff: 10.02.2024]

Abbildung 13:

Seager, Sara: Exoplanet Atmospheres: Physical Processes. Princeton University Press. New Jersey: 2010 [Zugriff: 10.02.2024]

Abbildung 14:

Seager, Sara: Exoplanet Atmospheres: Physical Processes. Princeton University Press. New Jersey: 2010 [Zugriff: 10.02.2024]

Abbildung 15:

Seager, Sara: Exoplanet Atmospheres: Physical Processes. Princeton University Press. New Jersey: 2010 [Zugriff: 10.02.2024]

Abbildung 16:

Seager, Sara: Exoplanet Atmospheres: Physical Processes. Princeton University Press. New Jersey: 2010 [Zugriff: 10.02.2024]

Abbildung 17:

Seager, Sara: Exoplanet Atmospheres: Physical Processes. Princeton University Press. New Jersey: 2010 [Zugriff: 10.02.2024]

Abbildung 18:

Seager, Sara: Exoplanet Atmospheres: Physical Processes. Princeton University Press. New Jersey: 2010 [Zugriff: 10.02.2024]

Abbildung 19:

Seager, Sara: Exoplanet Atmospheres: Physical Processes. Princeton University Press. New Jersey: 2010 [Zugriff: 10.02.2024]

Abbildung 20:
National Aeronautics and Space Administration: Media Kit
https://www.webb.nasa.gov/content/webbLaunch/assets/documents/WebbMediaKit.pdf
[Zugriff: 10.02.2024]
Abbildung 21:
National Aeronautics and Space Administration: Media Kit
https://www.webb.nasa.gov/content/webbLaunch/assets/documents/WebbMediaKit.pdf
[Zugriff: 10.02.2024]

Abbildung 22:
National Aeronautics and Space Administration: Media Kit
https://www.webb.nasa.gov/content/webbLaunch/assets/documents/WebbMediaKit.pdf [Zugriff: 10.02.2024]

Abbildung 23:
National Aeronautics and Space Administration: Instruments
https://webb.nasa.gov/content/observatory/instruments/miri.html [Zugriff: 10.02.2024]
Abbildung 24:
Charbonneau, David et al.: Detection of Planetary Transits Across a Sun-like Star. 23.11.1999. https://www.hao.ucar.edu/research/stare/preprint.pdf [Zugriff: 02.08.2023]

Abbildung 25:
Lam, Kristine et al.: GJ 367b: A dense, ultrashort-period sub-Earth planet transiting a nearby red dwarf star. 02.12.2021 https://www.science.org/doi/10.1126/science.aay3253 [Zugriff: 10.02.2024]

Selbstständigkeitserklärung VWA

Name: Kristóf Szilas

Selbstständigkeitserklärung

Ich erkläre, dass ich diese vorwissenschaftliche Arbeit eigenständig angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Graz, 28.02.2024

Ort, Datum

Unterschrift