

Seminararbeit

Planeten ohne Sterne

Jonathan Schmees

Astronomie, Jahrgang 12

Herr Riemer

07. März 2025, Bramsche



Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Definition und Grundlagen	2
2.1 Was sind Rogue Planets?	2
3 Entstehung freier Planeten.....	2
3.1 Entstehung aus Gaswolken	3
3.1.1 Vergleich zu Stern- und Planetenbildung	4
3.1.2 Unterschiede zu Braunen Zwergen	4
3.2 Ausstoß aus einem Planetensystem.....	5
3.2.1 Beispiel anhand unseres Sonnensystems	6
4 Erkennungsmethoden und Eigenschaften.....	8
4.1 Entdeckung durch astronomische Methoden	8
4.2 Physikalische und chemische Eigenschaften.....	10
5 Bedeutung für Astrobiologie	13
6 Fazit und Ausblick.....	14
7 Anhang	16
7.1 Quellenverzeichnis	16
7.2 Erklärungen	19

1 Einleitung

Seit jeher sind Planetenforscher und Astronomen von den unzähligen Himmelskörpern des Universums fasziniert. In der einfachen Astronomie versteht man unter Planeten Objekte, welche einen Stern umkreisen und in dessen Gravitationsfeld eingeschlossen sind. In den letzten Jahrzehnten rückte jedoch eine neue Klasse von Himmelskörpern in den Fokus der Forschung: sogenannte Rouge-Planets oder auch heimatlose Planeten genannt. Dabei handelt es sich um Planeten, die sich frei durch den interstellaren Raumbewegen, ohne dabei einen Stern zu umkreisen [13]. Forscher gehen davon aus, dass Rouge-Planets, ähnlich wie Sterne, durch das Kollabieren von Gas- und Staubwolken entstehen oder sogar ursprünglich Teil eines Sonnensystems waren und durch dynamische Wechselwirkungen mit anderen Planeten oder katastrophalen Ereignissen, wie etwa eine Supernova, aus ihrem System herausgeschleudert wurden [8]. Doch nicht nur ihre Entstehung, sondern auch ihre möglichen Eigenschaften machen Rouge-Planets zu einem spannenden Forschungsgebiet. Einige Theorien deuten darauf hin, dass diese einsamen Planeten möglicherweise Wasser beherbergen, welches trotz der extremen Kälte des Weltraums durch geothermische Prozesse aufgeheizt werden könnte [18]. Dies wirft die faszinierende Frage auf, ob solche Planeten möglicherweise Lebensformen enthalten könnten.

Diese Facharbeit befasst sich mit der Entstehung, den Erkennungs- und Nachweismethoden sowie den physikalischen und chemischen Eigenschaften von Rogue Planets. Darüber hinaus werde Ich die Bedeutung dieser Himmelskörper für die Astrobiologie und die astronomische Forschung beleuchten. Abschließend werde Ich ein Blick auf die Darstellung solcher Planeten in der Science-Fiction werfen und überprüfen, inwieweit diese Darstellungen mit den aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen übereinstimmen.

2 Definition und Grundlagen

2.1 Was sind Rogue Planets?

Rogue-Planets, oder auch als "heimatlose" oder "freie" Planeten bezeichnet, sind Himmelsobjekte von planetarer Masse, die nicht um einen Stern kreisen, sondern stattdessen frei im interstellaren Raum umherwandern. Im Unterschied zu herkömmlichen Planeten, die gravitativ an einen Stern gebunden sind, bewegen sich diese Objekte unabhängig von einem zentralen Himmelsobjekt. Sie heben sich auch von Braunen Zwergen ab, die zwar ebenfalls keine Sterne umkreisen jedoch durch ihre höhere Masse fähig sind im Inneren Deuteriumfusion¹ zu betreiben. Rogue Planets hingegen haben nicht genügend Masse für solche Fusionsprozesse [21].

Die exakte Anzahl dieser Planeten innerhalb unserer Milchstraße ist schwer feststellbar da sie kein eigenständiges Licht ausstrahlen und daher schwer zu erkennen sind [29]. Trotzdem deuten Untersuchungen darauf hin, dass es möglicherweise mehr dieser herrenlosen Planeten als Sterne gibt. Manche Schätzungen gehen davon aus, dass pro Stern zwischen 0.25 und 20 solcher Rouge-Planets existieren könnten. Daraus resultierend liegt nahe, dass es mindestens so viele Rouge-Planets wie Sterne in der Milchstraße gibt. Vermutlich sogar um einen Faktor von 4 bis 5 höher [18].

3 Entstehung freier Planeten

Die Entstehung von Rogue-Planets ist ein faszinierendes Thema der modernen Astronomie. Ihre Bildung kann auf verschiedene Weisen erfolgen, wie etwa der Entstehung aus Gaswolken oder dem Ausstoß aus einem bereits bestehenden Planetensystem [21].

¹ Deuteriumfusion ist die Verschmelzung zweier Deuteriumkerne zu Helium, die in Sternen und braunen Zwergen Energie freisetzt.

3.1 Entstehung aus Gaswolken

Rogue-Planets können tatsächlich eigenständig entstehen, ohne dass sie aus einem bestehenden Planetensystem ausgestoßen wurden. Dies geschieht innerhalb von Gaswolken, die unter ihrer eigenen Gravitation in sich zusammenfallen [18]. Während dieses Prozesses entstehen oft Sterne, doch in manchen Fällen reichen die Bedingungen nicht aus, um die Kernfusion in Gang zu setzen. Dies kann dazu führen, dass sich substellare Objekte² bilden, die keine eigenen Energiequellen besitzen und somit als freie Planeten durch den interstellaren Raum treiben. Besonders in dichten Sternhaufen, wie Kugelsternhaufen³, gibt es zahlreiche solcher planetenähnlichen Objekte, die keine Bindung zu einem Stern aufweisen ([1] S.38-39). Ein wichtiger Faktor bei der Entstehung dieser freien Planeten ist die Fragmentierung⁴ der Gaswolke. Entscheidend für diesen Prozess ist das Gleichgewicht zwischen der Schwerkraft, die das Gas zusammenzieht, und dem inneren Druck, der dem Kollaps entgegenwirkt. Wenn der Druck in der Gaswolke hoch bleibt, kann die Gravitation nicht dominieren. Sinkt der Druck jedoch, etwa durch Abkühlung des Gases durch Strahlung, gewinnt die Schwerkraft die Oberhand, und der Kollaps wird unumkehrbar [18]. Anstatt dass eine Wolke jedoch als Ganzes in sich kollabiert und einen einzigen massereichen Stern bildet, spaltet sie sich im Regelfall in kleinere Teilbereiche auf. Diese kleineren Fragmente verdichten sich voneinander unabhängig, sodass eine Vielzahl von Objekten mit unterschiedlichen Größen entstehen. Während einige von ihnen schwer genug sind, um Braune Zwerge⁵ oder sogar Sterne⁶ zu werden, gibt es auch Fragmente, die nur eine geringe Masse erreichen ([1] S. 40-41). Die leichtesten Himmelskörper, die sich auf diese Weise in einer Gaswolke bilden können, besitzen etwa die fünffache Masse des Jupiters. Dies bringt sie in den Bereich der Rouge-Planets [18].

² Substellare Objekte sind Himmelskörper mit zu geringer Masse, um eine stabile Wasserstofffusion in ihrem Kern zu betreiben.

³ Kugelsternhaufen sind dichte, kugelförmige Ansammlungen alter Sterne, die gravitativ gebunden sind.

⁴ Fragmentierung bezeichnet den Prozess, bei dem eine größere Gaswolke in kleinere Teile zerfällt.

⁵ Braune Zwerge sind Himmelskörper mit zu geringer Masse, um eine dauerhafte Wasserstofffusion in ihrem Kern aufrechtzuerhalten

⁶ Selbstleuchtende Himmelskörper, die Energie durch Kernfusion von Wasserstoff erzeugen.

3.1.1 Vergleich zu Stern- und Planetenbildung

Die Bildung von freien Planeten unterscheidet sich sowohl von der klassischen Bildung eines Sterns, als auch von der Planetenentstehung. Sterne entstehen durch das Kollabieren von großen Gas- und Staubwolken, wobei die dabei entstehende Masse ausreicht, um die für einen Stern essentielle Wasserstofffusion im Kern des Sternes zu initiieren. Dieser Prozess kann zwischen hunderttausenden bis hin zu einigen Millionen Jahren dauern [2]. Planeten hingegen formen sich in protoplanetaren Scheiben⁷ um junge Sterne durch Anlagerung von Materie [5]. Planeten in Sonnensystemen bilden sich durch Akkretion. Das bedeutet, dass sich Staub und kleinere Partikel anziehen und nach und nach zu größeren Körpern zusammenwachsen [16]. Bei Rogue-Planeten findet dieser Prozess nicht statt. Sie entstehen nicht durch Zusammenlagerung von Material, sondern direkt als eigenständige Himmelskörper innerhalb von Gaswolken, ähnlich wie Sterne, nur mit deutlich geringerer Masse. [18]

3.1.2 Unterschiede zu Braunen Zwergen

Braune Zwerge und Rogue-Planeten weisen deutliche Unterschiede in ihrer Entstehung und ihren physikalischen Eigenschaften auf. Sie gelten als substellare Objekte, die sich zwischen Sternen und Planeten einordnen lassen. Der wichtigste Unterschied zwischen diesen beiden Objekttypen liegt in ihrer Masse und ihren Fusionsprozessen. Braune Zwerge besitzen eine Masse zwischen der unteren Grenze für Wasserstofffusion (etwa das 75-Fache der Jupitermasse) und der Grenze für die Deuteriumfusion (etwa das 13-Fache der Jupitermasse). Während Sterne durch Wasserstofffusion stabilisiert werden, reicht die Masse eines Braunen Zwergs nicht aus, um diesen Prozess zu starten. Allerdings können in Braunen Zwergen begrenzte Fusionsprozesse stattfinden [3]. Deuteriumfusion beginnt ab etwa 13 Jupitermassen. Rogue-Planeten hingegen haben eine Masse unterhalb der Grenze für die Deuteriumfusion und können somit keinen Fusionsprozesse durchlaufen [21].

Ein wesentlicher Unterschied zwischen Braunen Zwergen und Rogue-Planeten liegt in ihren thermischen Eigenschaften. Braune Zwerge sind Himmelskörper mit Massen zwischen etwa 13 und 75 Jupitermassen. In ihren frühen

⁷ Protoplanetare Scheiben sind rotierende Ansammlungen aus Gas und Staub um junge Sterne

Entwicklungsstadien können sie Deuterium fusionieren, was ihnen ermöglicht, Wärme zu erzeugen und über längere Zeiträume abzustrahlen. Dieser Fusionsprozess hält jedoch nur etwa 10 bis 50 Millionen Jahre an [24]. Danach kühlen sie kontinuierlich ab. Im Gegensatz dazu sind Rogue-Planeten Himmelskörper, die nicht genügend Masse besitzen, um irgendeine Form von Kernfusion zu initiieren.

Während Braune Zwerge aufgrund ihrer anfänglichen Fusionsprozesse länger Wärme abstrahlen, verlieren Rogue-Planeten ihre Restwärme relativ schnell und kühlen ab [26].

3.2 Ausstoß aus einem Planetensystem

Rogue-Planeten können entweder isoliert entstehen wie kleine Sterne oder in einem Planetensystem gebildet und dann durch dynamische Prozesse aus diesem herausgeschleudert werden [10]. Im Folgenden werde ich die wissenschaftlichen Theorien beleuchten, die erklären, wie Planeten aus ihrem Ursprungssystem ausgestoßen werden.

In dicht besetzten Planetensystemen können gravitative Wechselwirkungen zwischen Planeten zu chaotischen Bahnentwicklungen führen, die gegebenenfalls zum Ausstoß eines Planeten führen können [26]. Insbesondere wenn mehrere große Planeten auf engen oder instabilen Umlaufbahnen kreisen, kann es zu einem Drei-Körper-Prozess kommen, bei dem nahe Begegnungen zwischen zwei Planeten, welche zum Beispiel um einen Stern kreisen, den einen nach innen ziehen und den anderen nach außen schleudern. Gewinnt ein Planet dabei genügend Energie, überschreitet er die Fluchtgeschwindigkeit und verlässt das System vollständig [15].

Nicht nur interne Wechselwirkungen, sondern auch Begegnungen mit externen Sternen können Planeten aus ihrem Heimatsystem verdrängen. Junge Planetensysteme entstehen meist in Sternhaufen, wo benachbarte Sterne einander nahekommen können. Ein Vorbeiflug eines anderen Sterns, ein sogenannter Stellar Flyby, übt gravitative Gezeitenkräfte auf das Planetensystem aus und kann vor allem äußere Planeten aus ihren Umlaufbahnen reißen. Wenn ein fremder Stern einem Planetensystem ausreichend nahekommt, ist es durchaus möglich, dass sofort einer oder mehrere Planeten herausgeschleudert werden. In

einigen Fällen wird ein Planet jedoch nicht unmittelbar frei, doch die Störung reicht oft schon aus um das System aus dem Gleichgewicht zu bringen. Dadurch werden die Planetenbahnen instabil, und innerhalb von einigen hunderttausend Jahren nach der Begegnung wird der beeinflusste Planet dann durch seine immer extremer werdende Umlaufbahn aus dem System entfernt. Mit anderen Worten kann ein enger Vorbeiflug wie ein Auslöser wirken, der zu einem späteren Planetenausstoß führt [20].

3.2.1 Beispiel anhand unseres Sonnensystems

Die Hypothese eines zusätzlichen Planeten, der im frühen Sonnensystem durch gravitative Wechselwirkungen hinausgeschleudert wurde, stützt sich auf Modelle der Planetenentstehung. Insbesondere das Nice-Modells deuten darauf hin, dass unser Sonnensystem mehr als die heute vier bekannten Gasriesen besaß, und dass ein solcher "überschüssiger" Planet in der chaotischen Frühphase nach der Entstehung des Sonnensystems aus dem System geschleudert wurde [25].

Das Nice-Modell, benannt nach der Stadt Nizza, ist eine der führenden Theorien zur Erklärung der heutigen Struktur des Sonnensystems. Es beschreibt, wie die großen Planeten Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun in geringem Abstand zur Sonne entstanden sind, sich dann in ihre heutigen Umlaufbahnen migrierten und durch gravitative Wechselwirkungen gegenseitig beeinflussten. Während dieser Phase wurden zahlreiche kleine Himmelskörper entweder ins innere Sonnensystem gelenkt oder nach außen in den Kuipergürtel geschleudert [17]. Diese Umverteilung könnte erklären, warum es vor etwa 4 Milliarden Jahren zu einer Phase intensiver Einschläge kam, dem sogenannten späten schweren Bombardement [27]. Außerdem entstanden dabei die heutigen Strukturen des Asteroiden⁸- und Kuipergürtels⁹ [14]. Anfangs standen die Gasriesen vermutlich in einer engen Formation zueinander, bevor sie durch dynamische Instabilität auseinanderdrifteten. Computermodelle zeigen, dass sich ihre Bahnen mit der Zeit chaotisch veränderten. Diese gravitative Umordnung soll sich einige hundert Millionen Jahre nach der Entstehung des Sonnensystems ereignet haben. Hinweise darauf liefern unter anderem Analysen von Kuipergürtel-Objekten sowie

⁸ Asteroiden-Gürtel bezeichnet die Region zwischen Mars und Jupiter, in der sich die meisten Asteroiden unseres Sonnensystems befinden.

⁹ Kuiper-Gürtel ist eine Region jenseits der Neptunbahn, die zahlreiche kleine eisige Körper, darunter Zwergplaneten, umfasst.

das Kratermuster des Mondes, das auf eine Störung in dieser Zeit hindeutet [25]. Ein Problem des ursprünglichen Nice-Modells war, dass sich Jupiter und Saturn langsam bewegten und dabei die Bahnen der inneren Planeten störten. Dadurch hätten Erde, Venus oder Mars aus ihrer Bahn geraten oder sogar zusammenstoßen können. Da das innere Sonnensystem heute aber stabil ist, musste eine andere Erklärung gefunden werden.

Eine Lösung für dieses Problem bietet das Jumping-Jupiter-Szenario. Dieses Modell besagt, dass der Jupiter seine Umlaufbahn nicht langsam, sondern abrupt verändert hat. Eine enge Begegnung mit einem weiteren Planeten hätte Jupiter dazu gebracht, nach außen zu springen. Durch diesen plötzlichen Bahnsprung konnten gefährliche Resonanzwechsel¹⁰ vermieden werden, wodurch die Bahnen der inneren Planeten stabil blieben. Simulationen legen nahe, dass der Jupiter dabei möglicherweise mit Saturn, Uranus oder Neptun interagiert und so das Sonnensystem in seine heutige Form brachte [14].

Der Planetenforscher David Nesvorný hat dieses Szenario ausführlich in Simulationen getestet. Zunächst zeigte sich aber ein neues Problem. Wenn man in den Modellen nur die vier heutigen Gasriesen zulässt, führte ein Jupiter-Sprung meist dazu, dass Uranus oder Neptun aus dem System geworfen wurde. Dies Szenario steht jedoch mit der Existenz der vier äußeren Planeten unseres Sonnensystems im Widerspruch [14]. Tatsächlich verlor in Nesvornýs Berechnungen eine Mehrheit der simulierten Vier-Planeten-Systeme einen Planeten, sodass am Ende nur drei übrigblieben. Nur in ganz wenigen Fällen, circa 2 bis 3% der Simulationen, resultierte ein stabiles Sonnensystem ähnlich dem Heutigen. Auf Grund von diesen Schwierigkeiten entwickelte Nesvorný ein erweitertes Modell mit fünf anfänglichen Riesenplaneten. Er fügte einen zusätzlichen eisriesenähnlichen Planeten (etwa von der Masse Uranus oder Neptuns) zwischen Saturn und Uranus ein. Das Ergebnis war durchschlagend: In tausenden von Simulationen mit diesem Fünf-Planeten-Nice-Modell wurde nun in einem erheblichen Anteil der Fälle ein Planet aus dem System ausgestoßen, während vier Planeten übrigblieben – und diese vier entsprachen den Bahnen von Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun. Die Erfolgsrate, ein der Realität entsprechendes System zu erhalten, stieg auf etwa 23%. Dieses Ergebnis entspricht einer ungefähr zehnfachen Verbesserung gegenüber dem Modell mit vier Planeten [17]. Mit anderen Worten deuten die Simulationen darauf hin, dass

¹⁰ Resonanzwechsel bezeichnet die Veränderung der Bahn eines Himmelskörpers durch Wechselwirkungen mit einem anderen Körper

das äußere Sonnensystem mit hoher Wahrscheinlichkeit mehr als vier Planeten besaß und einer davon durch gravitative Wechselwirkungen hinausgeworfen wurde.

4 Erkennungsmethoden und Eigenschaften

Rogue Planeten zu identifizieren ist durchaus schwierig, da sie kein Licht abstrahlen oder reflektieren. Eine Hauptmethode zur Erkennung dieser Planeten ist der Gravitationslinseneffekt. Dabei wirkt die Schwerkraft eines Rogue-Planeten wie eine Linse, die das Licht eines weiter entfernten Sterns verstärkt, wenn er sich davor bewegt. Diese Technik ermöglicht es, die Anwesenheit solcher Planeten zu erkennen [21]. Eine weitere Methode ist die Infrarotbeobachtungen, da einige dieser Planeten eine geringe Eigenwärme abstrahlen. Die Eigenschaften von Rogue-Planeten variieren je nach ihrer Masse und Zusammensetzung. Einige könnten erdähnlich sein, während andere die Größe von Jupiter erreichen oder sogar übertreffen. Da sie keinen Stern umkreisen, sind sie oft extrem kalt und existieren in völliger Dunkelheit. Dennoch könnten einige über interne Wärmequellen verfügen [18].

4.1 Entdeckung durch astronomische Methoden

Die zuverlässigste Methode, einen Rogue-Planeten aufzuspüren, ist der gravitative Mikrolinseneffekt, eine spezielle Form des Gravitationslinseneffekts [23]. Wenn ein frei fliegender Planet von unserer Sichtlinie aus zufällig vor einem fernen Stern vorbeizieht, krümmt seine Schwerkraft die Raumzeit und verstärkt kurzzeitig das Licht des Hintergrundsterns. Aus Sicht der Astronomen erscheint der entfernte Stern für einige Stunden oder Tage ein kleines bisschen heller. Dieses Aufblitzen ist einmalig und wiederholt sich nicht, da der Planet nicht an den Stern gebunden ist und nach dem Vorbeizug weiterzieht [4]. Mithilfe solcher Mikrolinsen-Ereignisse konnten bereits mehrere Rogue-Planeten nachgewiesen werden. Die Analyse der Lichtkurve (Helligkeitsänderung über die Zeit) liefert Hinweise auf die Masse des Objekts. So wurde z. B. ein Objekt mit Erdmasse als frei fliegender Planet identifiziert, eines der kleinsten bekannten Exemplare. Allerdings sind diese Ereignisse extrem selten, da drei Objekte (Hintergrundstern, Planet und Beobachter) nahezu perfekt ausgerichtet sein müssen. Würde man nur

einen einzelnen Stern beobachten, müsste man im Durchschnitt fast eine Million Jahre warten, um einmal ein Mikrolinsen-Ereignis zu sehen. Deshalb überwachen Projekte wie OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment) und MOA Millionen von Sternen im galaktischen Zentrum, um die wenigen zufälligen Aufblitz-Ereignisse herauszufiltern [23]. Diese Methode hängt nur von der Masse des Planeten ab und nicht von seinem Licht, weshalb sie ideal ist, um selbst kalte, dunkle Planeten aufzuspüren [12].

Neben Gravitationslinsen-Ereignissen spielt die Infrarotastronomie eine wichtige Rolle bei der Suche nach Rogue-Planeten. Weil diese Objekte kein Sonnenlicht reflektieren, sind sie im sichtbaren Licht fast unsichtbar. Große Rogue-Planeten, wie etwa Gasriesen, besitzen jedoch nach ihrer Entstehung noch interne Wärme und leuchten schwach im Infraroten [7]. Insbesondere junge Rogue-Planeten, welche nur wenige Millionen Jahre alt sind, sind noch heiß genug, um im Infrarotbereich direkt nachweisbar zu sein. Leistungsfähige Infrarot-Teleskope können solche Wärmesignaturen vor dem kalten Weltraumhintergrund aufspüren und die Planeten direkt abbilden. So entdeckte ein Astronomen-Team 2021 mithilfe mehrerer ESO-Teleskope über 70 neue Rogue-Planeten in einer nahegelegenen Sternentstehungsregion (Sco-Cen-Assoziation), indem es deren schwaches Glimmen im Infraroten registrierte. Dies war die bis dahin größte entdeckte Gruppe solcher freien Planeten und ein Beleg dafür, dass Infrarotsuchen in jungen Sternhaufen äußerst effektiv sein können [7]. Auch das neue James-Webb-Weltraumteleskop (JWST) nutzt seine hohe Infrarot-Empfindlichkeit, um Rogue-Planeten aufzuspüren und zu untersuchen. JWST konnte kürzlich sechs freifliegende Planeten in der jungen Sternentstehungsregion¹¹ NGC 1333 identifizieren. Diese Entdeckung gelang durch eine äußerst tiefe Aufnahme im Nahinfrarot, bei der Webb die Spektren¹² aller Objekte in diesem Sternhaufen vermessen hat. Direkte Infrarotbeobachtungen ermöglichen es zudem, auf die Atmosphären solcher Objekte zu schließen. Da Rogue-Planeten kein grelles Sternenlicht in ihrer Nähe haben, welches sie überstrahlen könnte, kann man das Infrarot-Spektrum vergleichsweise klar empfangen [28].

¹¹ Sternentstehungsregion ist ein Bereich in einer Molekülwolke, in dem neue Sterne durch den Zusammenbruch von Gas und Staub entstehen.

¹² Spektren sind die Verteilung von Licht oder Strahlung über verschiedene Wellenlängen

4.2 Physikalische und chemische Eigenschaften

Da Rouge Planeten nicht an einen Stern gebunden sind und dementsprechend frei durchs All fliegen sind ihre Größen und Massen vielfältig.[8] Man hat Objekte in Jupiter-Größenordnung und darüber hinaus entdeckt, aber auch deutlich kleinere. Tatsächlich waren die ersten entdeckten Rogue-Planeten riesig, etwa so groß wie Jupiter oder sogar größer [11]. Moderne Beobachtungen deuten jedoch an, dass die meisten umherirrenden Planeten eher erdgroß oder noch leichter sind. So ergab eine Studie 2022, dass es in unserer Milchstraße Milliarden solcher Waisenplaneten geben könnte, die überwiegend ungefähr die Masse der Erde oder weniger besitzen [8]. Inzwischen wurde sogar ein freischwebendes Objekt mit nur Mars- bis Erdmasse mit dem Gravitationslinseneffekt nachgewiesen. Es ist der bislang kleinste bekannte Rogue-Planet [23].

Die Zusammensetzung von freien Planeten variiert je nach ihrer Masse und Entstehungsgeschichte. Größere Exemplare im Bereich von Jupiter-Massen sind meist Gasriesen, die überwiegend aus Wasserstoff und Helium bestehen und ähnlich aufgebaut sind wie Jupiter oder Saturn. Beobachtungen eines freien Planeten namens PSO J318.5-22 (~6 Jupitermassen) zeigen zum Beispiel, dass er in Farbe und Energieabstrahlung jungen Gasriesen gleicht. Solche Objekte enthalten vermutlich dichte Wasserstoff-Helium-Hüllen mit kleineren Kernen aus Gestein und Eis im Inneren, wie unsere bekannten Gasplaneten [19]. Rogue-Planeten können jedoch prinzipiell alle Planetentypen umfassen. Wenn etwa ein erdähnlicher Gesteinsplanet aus seinem Heimatsystem herausgeschleudert wird, so würde er aus Silikaten und Eisen (Erdkruste und -kern) bestehen wie ein typischer Gesteinsplanet. Ebenso könnten eisreiche Welten (ähnlich der Neptun oder gefrorene Ozeanplaneten) als Rogue-Planeten existieren. Wichtig für die Definition ist lediglich, dass ihre Masse unterhalb der Grenze liegt, ab der Deuteriumfusion einsetzt, also weniger als etwa das 13-Fache der Jupitermasse. Oberhalb dieser Grenze spricht man von Braunen Zwergen (vgl. Seite 4) oder auch fehlgeschlagenen Sternen. Viele der freischwebenden Planeten in jungen Sternhaufen, zum Beispiel in der Orionregion, haben tatsächlich Massen unter 13 Jupitermassen. Einige von ihnen entstehen wohl direkt aus kollabierenden Gaswolken wie kleine braune Zwerge, was ebenfalls auf eine hauptsächlich gasförmige Zusammensetzung hindeutet [31]. Insgesamt lassen sich Rogue-

Planeten also grob in zwei Kategorien einteilen. Zum einen die Gasriesen und zum anderen die kleineren felsigen oder eisigen Körper.

Ohne die wärmende Strahlung eines Zentralsterns¹³ stellt sich die Frage, ob Rogue-Planeten überhaupt nennenswerte Atmosphären über einen längeren Zeitraum halten können. Grundsätzlich besitzt ein Planet genügend Gravitation, um Gase an sich zu binden. Schwere Gasplaneten werden ihre dichten Wasserstoff-Helium-Hüllen behalten, da diese Gase gravitativ an den Planeten gebunden sind. Allerdings kann die Temperatur ohne Stern stark absinken, sodass leichtere Gase möglicherweise verflüssigen oder ausfrieren. Dennoch haben theoretische Arbeiten ergeben, dass spezifisch zusammengesetzte Atmosphären auch im kalten interstellaren Medium stabil bleiben können. David J. Stevenson prognostizierte 1998, dass ein erdgroßer Rogue-Planet eine dichte Atmosphäre besitzen könnte. Die Voraussetzung dafür wäre ein sehr dicker wasserstoffhaltiger Atmosphärenmantel, der durch seinen eigenen Druck wie eine Decke die Wärme einschließt. Solch eine H₂-reiche Hülle könnte trotz fehlender Sonneneinstrahlung ein Einfrieren verhindern. Tatsächlich würde ein erdgroßes Objekt genug Gravitation haben, um leichte Gase wie Wasserstoff/Helium nicht ins All entweichen zu lassen. Zusätzlich ist ohne Stern auch weniger energiereiche UV-Strahlung vorhanden, die die Atmosphäre sonst abtragen könnte [26].

Da Rogue-Planeten ohne Sternlicht auskommen müssen, sind sie im Allgemeinen sehr kalt. Ihre Oberflächentemperaturen liegen typischerweise weit unter denen planetarer Objekte in habitablen Zonen¹⁴. Da direktes Sonnenlicht vollkommen fehlt, hängt die Temperatur allein von der internen Wärmeproduktion und eventuell von Restwärme der Entstehung ab. Interstellarer Raum ist extrem kalt und die Hintergrundtemperatur¹⁵ (Mikrowellenhintergrund) liegt bei nur ~2,7 K (-270 °C). Ein Rogue-Planet ohne nennenswerte Wärmequellen würde sich demnach dieser Temperatur annähern. Beobachtungen zeigen, dass viele freie Jupitertypen Temperaturen von einigen hundert Kelvin aufweisen. So hat das Objekt

¹³ Zentralstern ist der Hauptstern eines Systems, um den Planeten, Asteroiden oder andere Himmelskörper kreisen.

¹⁴ Habitable Zone bezeichnet den Bereich um einen Stern, in dem die Bedingungen für flüssiges Wasser auf einem Planeten möglich sind

¹⁵ Hintergrundtemperatur (Mikrowellenhintergrund) ist die durchschnittliche Temperatur des Universums

WISE 0855 etwa 250 K ($\approx -23\text{ °C}$) an seiner Wolkenobergrenze. Diese Temperatur ist vergleichbar mit einem kalten Wintertag auf der Erde, was für einen Körper ohne Sonne jedoch erstaunlich warm ist. Diese Wärme bezieht er vollständig von seinem Inneren her [9].

Innere Wärme Quellen sind also ein entscheidender Faktor, der Rogue-Planeten vor dem Kältetod bewahren kann. Bei großen Gasplaneten ist die wichtigste Quelle die Gravitationsenergie. Nach ihrer Entstehung besitzen sie überschüssige Wärme, die sie nach und nach abstrahlen. Durch das Auskühlen zieht sich der Planet langsam zusammen, was wiederum potenzielle Gravitationsenergie in Wärme umwandelt. Das ist ähnlich wie bei einem Gummiball, der zusammengedrückt wird. Durch die Verformung entsteht Wärme. Bei einem Planeten ist der Effekt viel stärker, weil riesige Massen beteiligt sind. Der Jupiter selbst strahlt heute noch etwa 60% mehr Energie ab, als er von der Sonne erhält. Dies ist ein Hinweis auf anhaltende Kontraktionswärme. Ein isolierter bzw. ausgestoßener Jupiter würde diese innere Wärme weiterhin ausstrahlen und erst über sehr lange Zeiträume auskühlen. Ähnliches gilt für Braune Zwerge und massive Rogue-Planets. Sie glimmen im jungen Zustand durch Kontraktionswärme und kühlen über Milliarden Jahre langsam aus [22]. Bei Objekten nahe der 13-Jupiter-Masse-Grenze kommt hinzu, dass sie anfangs auch kurzfristig Deuteriumfusion betrieben haben könnten. Der Vorrat an Deuterium ist jedoch begrenzt und dieser Fusionsprozess ist nach wenigen Millionen Jahren erschöpft. Doch er liefert in der Frühphase zusätzliche Energie [30].

Kleinere, felsige Rogue-Planeten haben andere Wärmequellen. Hier spielt die Radioaktivität im Kern eine große Rolle. Wie bei der Erde würden solche Planeten durch den Zerfall radioaktiver Elemente (z.B. Uran, Thorium, Kalium) in ihrem Inneren kontinuierlich Wärme freisetzen. Diese geothermale Energie kann zwar an der Oberfläche sehr gering ausfallen, aber unter bestimmten Umständen kann sie ausreichen, um flüssige Habitate zu ermöglichen. Stevenson berechnete, dass der radioaktive Zerfall in einem erdgroßen Planeten die Oberfläche über dem Schmelzpunkt von Wasser halten könnte, wenn eine starke Wasserstoffatmosphäre den Wärmeverlust hemmt [8].

5 Bedeutung für Astrobiologie

Wenn wir über Leben nachdenken, stellen wir uns meist eine Welt vor, die von der Energie eines Sterns ernährt wird, so wie die Erde von der Sonne. Pflanzen nutzen das Sonnenlicht für die Photosynthese, und fast alle Ökosysteme basieren direkt oder indirekt auf dieser Energiequelle. Doch es gibt auch Ausnahmen: Und zwar existieren tief in den Ozeanen Lebensformen, die vollkommen unabhängig von Sonnenlicht leben. Sie gedeihen in der Nähe hydrothermaler Schlote¹⁶, wo heiße Mineralquellen chemische Energie liefern, die Mikroorganismen als Nahrungsquelle nutzen. Dieses Prinzip könnte auch auf einem Rogue-Planeten funktionieren [18]. Rogue-Planeten könnten wie bereits erwähnt ursprünglich ein Teil eines Sonnensystems gewesen sein und später durch gravitative Wechselwirkungen hinausgeschleudert worden oder direkt als isolierte Objekte entstanden sein (vgl. Seite 2-5). Ein solcher Planet hätte keine intensive Sternenstrahlung erhalten, was bedeutet, dass er seine ursprüngliche Atmosphäre wahrscheinlich besser behalten könnte. Ohne die zerstörerische Wirkung von Sternwinden oder UV-Strahlung könnte eine dichte, stabile Atmosphäre besser gewisses Maß an Oberflächenwärme erhält [26].

Die wichtigste Voraussetzung für Leben, wie wir es kennen, ist Wasser in flüssiger Form. Während die Oberfläche eines Rogue-Planeten in den meisten Fällen gefroren oder extrem kalt wäre, könnte es also im Inneren noch Wärmequellen geben. Wenn der Planet geologische Aktivitäten aufweist, also tektonische Prozesse wie auf der Erde, könnte Wärme aus dem Inneren nach außen dringen. Diese geothermische Energie könnte unter dicken Eisschichten flüssige Ozeane erhalten, ähnlich wie es für die Eismonde Europa und Enceladus in unserem Sonnensystem auch vermutet wird. Radioaktiver Zerfall tief im Inneren eines solchen Planeten könnte also Wärme freisetzen, sodass unter bestimmten Bedingungen zumindest für eine gewisse Zeit sogar flüssiges Wasser auf der Oberfläche existieren könnte. Sollte eine Atmosphäre vorhanden sein, könnte sie als eine Art Wärmedecke wirken und die Energie speichern [18].

¹⁶ Hydrothermale Schlote sind untermeerische Öffnungen, aus denen heißes Wasser, oft mit mineralischen Stoffen angereichert, in den Ozean austritt.

Sollte es auf Rogue-Planeten oder deren Monden Leben geben, wäre es vermutlich sehr einfach, ähnlich wie die Mikroorganismen, die sich auf der Erde in extremen Umgebungen halten. Die ersten 90 % der Erdgeschichte waren ebenfalls von einzelligem Leben geprägt. Komplexere Lebensformen konnten erst entstehen, als sich durch die Photosynthese genügend Sauerstoff in der Atmosphäre ansammelte, um Atmungsprozesse zu ermöglichen. Da Rogue-Planeten keine Sonne haben, fehlt diese Entwicklungsmöglichkeit. Das heißt, falls es dort Leben gibt, wird es sich vermutlich auf Mikroorganismen beschränken, die sich von chemischer Energie ernähren, ähnlich wie die Tiefseelebewesen auf der Erde [18].

6 Fazit und Ausblick

Rogue-Planeten stellen eine faszinierende und wenig erforschte Klasse von Himmelskörpern dar. Anders als herkömmliche Planeten umkreisen sie keinen Stern, sondern treiben alleine durch die Dunkelheit des interstellaren Raums. Ihre Entdeckung hat das Verständnis von Planetensystemen verändert, da sie darauf hinweist, dass Planeten nicht zwangsläufig an ein Sternensystem gebunden bleiben. Vielmehr zeigen Beobachtungen, dass gravitative Wechselwirkungen oder instabile Umlaufbahnen dazu führen können, dass solche Planeten aus ihrem ursprünglichen System ausgestoßen werden (vgl. Seite 5). Die Untersuchung dieser einsamen Welten ist eine Herausforderung, doch durch Methoden wie den Gravitationslinseneffekt und die Infrarotbeobachtung (vgl. Seite 8-9) konnten bereits mehrere Rogue-Planeten nachgewiesen werden. Fortschritte in der Forschung insbesondere durch zukünftige Weltraumteleskope wie JWST (vgl. Seite 9) werden vermutlich dazu beitragen, dass weitere Objekte dieser Klasse aufgespürt werden und ihre Eigenschaften besser zu verstanden werden können. Trotz fehlender Sonnenstrahlung könnten einige Rogue-Planeten Bedingungen aufweisen, die Leben ermöglichen. Geothermale Wärmequellen, radioaktiver Zerfall und isolierende Atmosphären könnten das Vorhandensein unterirdischer Ozeane begünstigen, ähnlich wie auf den Eismonden Europa und Enceladus in unserem Sonnensystem (vgl. Seite 10-14). Diese Szenarien erweitern unser Konzept von habitablen Welten und eröffnen neue Perspektiven für die Astrobiologie. Zwar ist komplexes Leben auf solchen Planeten unwahrscheinlich (vgl. Seite 13-14), aber einfache mikrobiologische Lebensformen könnten unter extremen Bedingungen existieren. Die Erforschung von Rogue-Planeten ist noch

am Anfang, doch sie bietet wertvolle Einblicke in die Geschichte unseres Sonnensystems, die Vielfalt planetarer Objekte und die potenziellen Lebensräume im Universum. Zukünftige Beobachtungen werden zeigen, ob diese einsamen Welten nicht nur in ihrer Anzahl, sondern auch in ihrer Vielfalt größer sind als bisher angenommen und ob sie möglicherweise sogar Lebensformen beherbergen.

7 Anhang

7.1 Quellenverzeichnis

Fachliteratur

[1] Hurley, Jarrod R./ Sarah, Michael M.: Planeten als Einzelgänger. in: Spektrum der Wissenschaft Februar, 2003.

[2] Lin, Douglas N.C.: Die chaotische Geburt der Planeten. In: Spektrum der Wissenschaft Juni 2008.

Internetquellen

[3] Abenteuer Universum: Braune Zwerge (online) (<https://abenteuer-universum.de/sterne/brzweg.html>) (Stand: 07.02.2025).

[4] Balzer, Ashley: Unveiling Rogue Planets With NASA's Roman Space Telescope (online) (<https://exoplanets.nasa.gov/news/1656/unveiling-rogue-planets-with-nasas-roman-space-telescope/#:~:text=%E2%80%9CThe%20microlensing%20signal%20from%20a,c hanger%20for%20rogue%20planet%20searches.%E2%80%9D>) (Stand: 20.02.2025).

[5] Caselli, Paola: Protoplanetare Scheibe wird von der Mutterwolke gespeist (online) (<https://www.mpe.mpg.de/7530840/news20201123>) (Stand: 07.02.2025).

[6] de Lazaro, Enrico: Astronomers Discover Smallest Free-Floating Exoplanet Yet (online) (<https://www.sci.news/astronomy/smallest-free-floating-exoplanet-09003.html>) (Stand: 13.02.2025).

[7] European Southern Observatory: ESO telescopes help uncover largest group of rogue planets yet (online) (<https://www.eso.org/public/news/eso2120/>) (Stand: 22.02.2025).

[8] Feehly, Conor: What are rogue planets? (online) (<https://www.space.com/rogue-planets-guide>) (Stand: 03.02.2025).

[9] Howell, Elizabeth: Water Clouds Found Outside the Solar System — a First (online) (<https://www.space.com/33368-brown-dwarf-water-clouds-wise-0855.html>) (Stand: 01.03.2025).

[10] Jet Propulsion Laboratory. Free-Floating Planets May be More Common Than Stars (online) (<https://www.jpl.nasa.gov/news/free-floating-planets-may-be-more-common-than-stars/>) (Stand: 12.02.2025).

- [11] Kaufman, Marc: Getting To Know Rogue Planets (online) (<https://astrobiology.nasa.gov/news/getting-to-know-rogue-planets/#:~:text=Planets%20form%20around%20stars%20and,are%20now%20known%20to%20exist>) (Stand: 21.02.2025).
- [12] Lea, Robert: NASA's TESS exoplanet hunter may have spotted its 1st rogue planet (online) (<https://www.space.com/nasa-tess-rogue-planet-candidate-first-time>) (Stand: 20.02.2025).
- [13] Many Worlds: Getting To Know Rogue Planets (online) (<https://manyworlds.space/2023/08/11/getting-to-know-rogue-planets/>) (Stand: 03.02.2025).
- [14] Physiksworld: Was a giant planet ejected from our solar system? (online) (<https://physicsworld.com/a/was-a-giant-planet-ejected-from-our-solar-system/>) (Stand: 03.02.2025).
- [15] Podbregar, Nadja : 3 Body Problem: Doch nicht rein chaotisch? (online) (<https://www.scinexx.de/news/kosmos/3-body-problem-doch-nicht-rein-chaotisch/>) (Stand: 12.02.2025).
- [16] Semenov, Dmitry A./ Teague, Richard. D.: Accretion disks around young stars: the cradles of planet formation (online) (<https://arxiv.org/abs/2002.00405>) (Stand: 07.02.2025).
- [17] Southwest Research Institute: Giant planet ejected from the solar system (online) (<https://phys.org/news/2011-11-giant-planet-ejected-solar.html>) (Stand: 13.02.2025).
- [18] Terra X Lesch & Co: Rogue Planets – 404 Star not found (online) (<https://www.youtube.com/watch?v=Ccsj1sl46S0>) (Stand: 03.02.2025).
- [19] University of Hawaii at Manoa's Institute for Astronomy, Honolulu: A strange lonely planet found without a star (online) (<https://www.astronomy.com/science/a-strange-lonely-planet-found-without-a-star/>) (Stand: 22.02.2025).
- [20] van Elteren, A. u.a.: Survivability of planetary systems in young and dense star clusters (online) (https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2019/04/aa34641-18/aa34641-18.html) (Stand: 12.02.2025).
- [21] Vaughan, Don: rogue planet (online) (<https://www.britannica.com/science/rogue-planet>) (Stand: 05.02.2025).
- [22] Virgo, N.: How does rogue planet PSO J318.5-22 stay 800°C? (online) (<https://physics.stackexchange.com/questions/216495/how-does-rogue-planet-pso-j318-5-22-stay-800%C2%BAc>) (Stand: 03.03.2025).
- [23] Wall, Mike: Tiny rogue planet is the smallest free-floating exoplanet candidate yet (online) (<https://www.space.com/smallest-rogue-planet-discovery>) (Stand: 12.02.2025).
- [24] Wikipedia: Brauner Zwerg (online) (https://de.wikipedia.org/wiki/Brauner_Zwerg) (Stand: 08.02.2025).

[25] Wikipedia: Five-planet Nice model (online) (https://en.wikipedia.org/wiki/Five-planet_Nice_model) (Stand: 13.02.2025).

[26] Wikipedia: Rogue planet (online) (https://en.wikipedia.org/wiki/Rogue_planet) (Stand: 08.02.2025).

[27] Wikipedia: Spätes schweres Bombardement (online) (https://de.wikipedia.org/wiki/Sp%C3%A4tes_schweres_Bombardement) (Stand: 13.02.2025).

[28] Williams, Matt: Webb discovers six new 'rogue worlds' that provide clues to star formation (online) (<https://phys.org/news/2024-08-webb-rogue-worlds-clues-star.html>) (Stand: 21.02.2025).

[29] Yahoo Redaktion: Forschende entdecken den bislang kleinsten Rogue Planet (online) (https://de.nachrichten.yahoo.com/forschende-entdecken-den-bislang-kleinsten-rogue-planet-113033904.html?guccounter=1&guce_referrer=aHR0cHM6Ly93d3cuZ29vZ2xlLmNvbS8&guce_referrer_sig=AQAAAM0r-kUR6zko44VA7jNBHNwqVqVm7JXyltCGJPZsToCLtYu39qxJEgfpb_yhDIQmavvzYZJES6RmT0M4DgxR5b9dOPQ6jsL_HbzCqPuwH7-Rtq6mwn9J_82SLosiudR1jkLmuN-l234Hxhqnu7maBrVwqDaljMe4eiT1_PZJ6Gc) (Stand: 05.02.2025).

[30] Zuckerman, Ben: Brown dwarfs: At last filling the gap between stars and planets (online) (<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC33969/>) (Stand: 04.03.2025).

[31] Zürich, U.: Weder Stern noch Planet (online) (<https://pro-physik.de/nachrichten/weder-stern-noch-planet>) (Stand: 01.03.2025).

7.2 Erklärungen

Selbständigkeit

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt und die Stellen der Facharbeit, die im Wortlaut oder im wesentlichen Inhalt aus anderen Werken (auch aus dem Internet) entnommen wurden, mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht habe.

Bramsche, den 6. März 2025

Unterschrift des Schülers

Veröffentlichung

Hiermit erkläre ich, dass ich damit einverstanden bin, wenn die von mir verfasste Facharbeit der schulinternen Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird.

Bramsche, den 6. März 2025

Unterschrift des Schülers

