

Die Erforschung extrasolarer Planeten mit CoRoT

E-W.GUENTHER

Thüringer Landessternwarte Tautenburg

Zusammenfassung

Das Ziel des Satellitenprojektes CoRoT (CONvection ROTation à Transits planétaires) ist die Analyse stellarer Schwingungsmoden (Astroseismologie) sowie die Entdeckung und Erforschung von Planeten außerhalb unseres Sonnensystems. CoRoT ist die erste Satellitenmission, die speziell für die Erforschung extrasolarer Planeten konzipiert ist. Seit dem Start im Dezember 2006 hat CoRoT eine Fülle von neuen und spektakulären Resultaten geliefert, die die Entstehung und Entwicklung von Planeten in einem ganz neuen Licht erscheinen lassen. So gelang es zum ersten Mal, die Massen, Radien, und Dichten viele Gasplaneten genau zu vermessen. Offenbar ist die Bandbreite der Eigenschaften sehr viel größer ist, als in unserem Sonnensystem. Bei gleicher Masse gibt es sowohl Planeten von kleiner, also auch großer Dichte. Mit CoRoT gelang es auch das reflektierte Licht von extrasolaren Planeten zu detektieren. Die untersuchten Planeten reflektieren nur wenig Licht und sind somit sehr dunkel. Ein ganz besonderes Highlight war die Entdeckung des ersten Gesteinsplaneten außerhalb unseres Sonnensystems. Dieser Planet hat etwa den doppelten Durchmesser und etwa die fünffache Masse der Erde. Er dürfte aber kaum unsere Erde ähnlich sein. Umkreist er doch seinen Mutterstern in nur 20 Stunden und er empfängt etwa 1700-mal so viel Strahlung wie die Erde. Dieser Planet muss eine wahre Gluthölle sein.

1. DER COROT SATELLITE

1.1. Das wissenschaftliche Ziel

Das wissenschaftliche Ziel des CoRoT-Satelliten ist die Erforschung von Schwingungen der Sterne und die Entdeckung von Planeten außerhalb unseres Sonnensystems. CoRoT hat zwei unterschiedliche Experimente an Bord. Mit dem einen werden Variationen der Helligkeit von wenigen Sternen mit einer Genauigkeit von etwa 10^{-5} gemessen. Diese Messungen dienen der Untersuchung von Schwingungen der Sterne. Die Analyse der Sternschwingungen erlaubt den inneren Aufbau der Sterne zu untersuchen. Zum ersten Mal betrachten wir nicht die Oberfläche der Sterne, sondern erfahren welche Prozesse in Inneren ablaufen.

Mit dem zweiten Experiment werden Planeten außerhalb unseres Sonnensystems erforscht. Auch in diesem Experiment werden die Helligkeiten von Sternen gemessen. Im Gegensatz zu den Untersuchungen der Sternschwingungen werden hier die Helligkeiten von 10000 Sternen simultan gemessen. Zieht ein Planet - von der Erde aus betrachtet - vor einem Stern entlang, so verdeckt er vorübergehend einen kleinen Teil von dessen Oberfläche. Dies führt zu einer vorübergehende Abnahme der Helligkeit des Sterns. CoRoT ist in der Lage diese kleinen Helligkeitsschwankungen zu messen. Leider ergibt sich aus der Messung zunächst nur das Verhältnis zwischen dem Durchmesser des Planeten zum Durchmesser des Sterns. Erst wenn die CoRoT-Beobachtungen mit Beobachtungen bodengebundenen Teleskope kombiniert werden, erhalten wir den wahren Durchmesser des Planeten, dessen Masse und dessen Dichte. Zu CoRoT gehört also gleichsam eine ganze Korona von bodengebundenen Teleskopen. Eine Schlüsselrolle spielen dabei die vier 8-m-Teleskope des Very-Large-Telescopes (VLT) der ESO auf dem Cerro Paranal in Chile, das 3-6-m-Teleskop der ESO, sowie ein ganze Anzahl kleinerer Teleskope im Bereich von 1-2 m Öffnung.

1.2. Der Satellit

Auf den ersten Blick sieht der CoRoT-Satellit dem Hubble-Space Telescope (HST) ähnlich. Bei näherer Betrachtung zeigen sich aber große Unterschiede. Zum einen ist CoRoT viel kleiner. Die Masse beträgt nur 606 kg und der Satellit ist nur 4.2m lang. Zum Vergleich: Das HST hat eine Masse von 11600 kg und eine Länge von 13.1m. Der wichtigste Unterschied ist aber, dass das HST ein Observatorium mit vielen,

unterschiedlichen Instrumenten ist, die jeweils nur eine relativ kurze Zeit auf ein Objekt gerichtet werden. Im Gegensatz dazu ist CoRoT nur für einen Zweck gebaut worden: Der sehr genaue Messung von Sternhelligkeiten. Um eine höchstmögliche Messgenauigkeit zu erreichen, sind die Bilder von CoRoT sogar ganz leicht defokussiert. Das Teleskop von CoRoT ist ein Schiefspiegler mit einer Öffnung von 0,27m und einer Brennweite von 1,201 m. Das Teleskop hat ein Gesichtsfeld von 2.8x2.8 Grad. Die eine Hälfte des Gesichtsfeldes wird zur Untersuchung von Sternschwingungen genutzt, die andere Hälfte dient der Untersuchung von Planeten. In der Fokalebene befinden sich 4 CCD-Detektoren. Zwei dienen der Messung der Sternschwingungen und zwei der Erforschung von extrasolaren Planeten. Die CCD-Detektoren haben jeweils 2048x2048 Bildelemente. Jedes der Bildelemente ist 13,5 μm groß. Somit ergibt sich ein Abbildungsmaßstab von 2.3 Bogensekunden pro Bildelement.

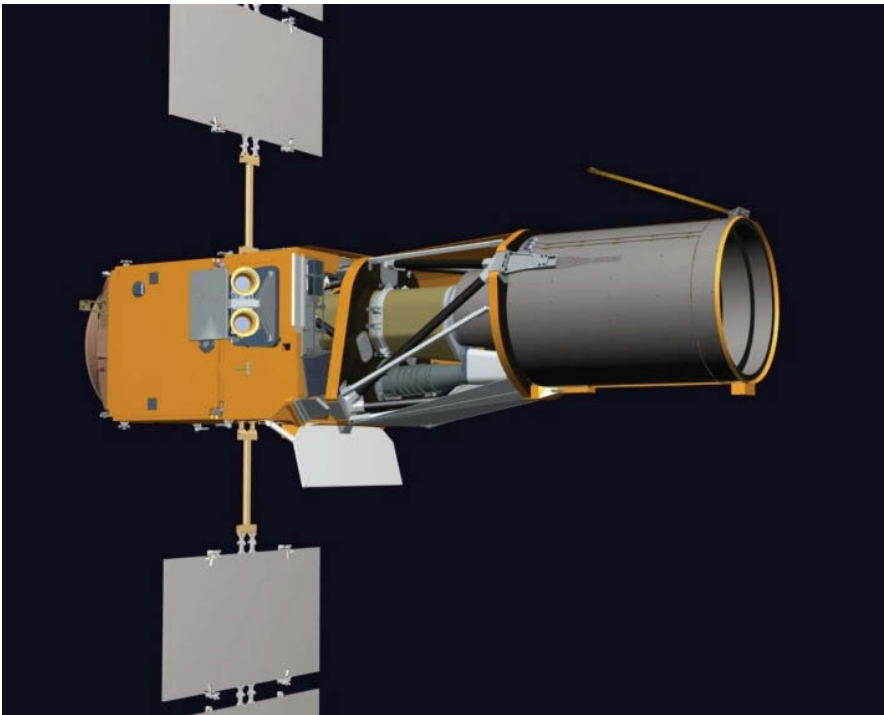


BILD 1. Künstlerische Darstellung des CoRoT-Satelliten (Quelle: CNES)

Im Folgenden werden wir uns nur mit der Experiment zur Untersuchung von extrasolaren Planeten beschäftigen. In diesem Experiment ist ein kleines Prisma vor den beiden CCD-Detektoren angebracht, welches das Sternenlicht in seine Spektralfarben zerlegt. Dadurch ist es möglich, die Helligkeit der Sterne in drei Farben (Blau, Grün, Rot) zu messen. Die Helligkeitsmessung in drei Farben ermöglicht die einfache Unterscheidung von Planeten-Transit von anderen Ursachen der Helligkeitsvariationen.

Im normalen Modus werden jeweils 16 Aufnahmen mit einer Belichtungszeit von jeweils 32 Sekunden gemacht und dann aufaddiert. Bei relativ hellen Sternen werden die Helligkeitswerte in den drei Farben ermittelt, bei schwachen Sternen wird nur die Gesamthelligkeit im optischen Spektralbereich gemessen. Im Normalfall ergibt sich eine Zyklusrate von einer Helligkeitsmessung alle 8.5 Minuten.

Der Satellit wurde am 27. Dezember 2006 vom Weltraumbahnhof Baikonur mit einer Sojus 2.1b ins All gebracht. CoRoT umkreist die Erde auf einer polaren Bahn in einer Höhe von 827 km. Die Flughöhe von CoRoT ist damit erheblich höher als die des HST. Dadurch ist auch das atmosphärische Streulicht erheblich viel kleiner. Zusätzlich wird das durch Erde und Mond verursachte Streulicht durch ein sehr trickreiches Blendensystem um einen Faktor 10^{-13} verringert. Auch das Schiefspieglersystem wurde gewählt, um Streulicht zu vermeiden. Erst durch die extreme Unterdrückung von Streulicht wurde die hervorragende Genauigkeit bei der Helligkeitsmessung erreicht. Im praktischen Betrieb kann CoRoT die Helligkeit eines Sterns von 15.5 mag in einer Stunde mit einer Genauigkeit von $7 \cdot 10^{-4}$ messen. Die polare Umlaufbahn

ermöglicht es, Sternfelder bis zu 150 Tage lang ohne jede Unterbrechung zu beobachten. Von jedem der etwa 10000 Sterne im Feld werden in dieser Zeit 25000 Helligkeitsmessungen gemacht (von den meisten Sternen sogar in drei Farben). Darüber hinaus werden von etwa 500 Sternen jeweils 400000 Helligkeitsmessungen in dieser Zeit vorgenommen. Insgesamt hat CoRoT bereits über 100000 Sterne beobachtet. Die CoRoT-Beobachtungen sind somit das bis dato größte Archiv von Sternhelligkeitsmessungen.

2. NACHFOLGEBEOBACHTUNGEN

Nach dem Start des Satelliten am 27.12.2006 und einer anschließenden Testphase begannen am 18.1.2007 die ersten wissenschaftlichen Beobachtungen. Bereits 87 Tage nach dem Beginn der wissenschaftlichen Beobachtungen konnte die erste Entdeckung bekannt gegeben werden. Normalerweise liegen ein bis zwei Jahre zwischen dem Beginn der Beobachtungen und der Bekanntgabe der ersten Entdeckung. Der Grund sind die sehr umfangreichen Nachfolgebeobachtungen. Die Nachfolgebeobachtungen von Transit-Planeten sind eben sehr zeitaufwendig.

Zunächst müssen erst einmal Beobachtungen die sicherstellen, dass es sich wirklich um den Transit eines Planeten handelt. Da das Bild von CoRoT zur Erreichung einer höchstmöglichen photometrischen Genauigkeit leicht defokussiert ist, ist es möglich, dass ein Hintergrundstern sich innerhalb des Sternbildes befindet. Dadurch mischt sich das Licht des hellen Sterns mit dem des schwachen Sterns. Ist der schwache Stern ein bedeckender Doppelstern, so zeigt die Gesamthelligkeit der beiden eine kleine Abnahme der Helligkeit die genau so aussieht wie ein Transit eines Planeten. Diese Möglichkeit muss daher als erstes ausgeschlossen werden. Der Trick ist, dass der schwache Stern im Hintergrund eine rötliche Farbe haben muss. Der Grund für die rötliche Farbe des Hintergrundsterns ist die Extinktion. Da die Beobachtungen in der Milchstraßenebene durchgeführt werden ist die interstellare Extinktion besonders stark. Da nun die Extinktion im Roten kleiner als im Blauen ist, muss jeder weit entfernte Hintergrundstern eine rote Farbe haben, unabhängig welche Farbe er in Wirklichkeit hat. Da CoRoT die Helligkeitsmessungen in drei Farben durchführt, lässt sich der Fall eines bedeckenden Doppelsterns im Hintergrund von dem einer Bedeckung des Vordergrundsterns durch einen Planeten unterscheiden. Auf diese Weise lassen sich zwar die meisten Fälle ausschließen, aber leider nicht alle. Hat der Hintergrundstern eine sehr kleine Helligkeit, so werden weitere Beobachtungen notwendig. Im Allgemeinen wird dann mit dem 0.8-m-Teleskop des IAC auf Teneriffa, oder dem Canad-France-Hawaii-Telescope auf Hawaii eine Aufnahme während des Transits und eine Aufnahme außerhalb des Transits angefertigt. Zeigt sich bei einem schwachen Hintergrundstern ein erheblicher Unterschied in der Helligkeit zwischen den beiden Aufnahmen, so ist dies ein bedeckender Doppelstern. Zeigt sich kein Unterschied der Helligkeit der Sterne in beiden Aufnahmen, so ist die Helligkeitsabnahme ein Transit eines Planeten beim hellen Vordergrundstern. Dieser Test ist möglich, da die Bildschärfe des IAC 0.8-m Teleskops und des CFHT viel höher ist, als die von CoRoT. Müssen auch Doppelsterne in noch kleinerem Abstand von einem hellen Stern ausgeschlossen werden, so wird die FAST-camera am 1.8-m Teleskop auf Teneriffa eingesetzt. Diese Kamera erlaubt es, Aufnahmen mit einer Belichtungszeit von nur 0.01 Sekunden zu machen. Automatisch werden dann nur allerbesten Aufnahmen gesammelt und aufaddiert. Das Resultat ist eine Aufnahme sehr hoher Auflösung. Im Falle von CoRoT-7b reichte aber selbst diese Auflösung nicht aus. Daher wurden auch Aufnahmen mit der Adaptiven-Optik-System des VLT gewonnen und ausgewertet. Eine weitere Störquelle sind Dreifachsysteme. Bei vielen Dreifachsystemen ist der Abstand der drei Sterne so klein, dass Aufnahmen mit hoher Auflösung nicht ausreichend sind um die drei Sterne getrennt zu zeigen. Dreifachsysteme sind gar nicht so selten, 8% der Sterne haben drei oder mehr Begleiter. In Falle eines Dreifachsystems ist aber von vorn herein bekannt, dass sich alle drei Sterne in etwa im gleichen Abstand von der Erde haben. Das bedeutet, falls der untersuchte Stern ein sonnenähnlicher Stern ist, so müssen die beiden anderen Sterne nur kühle, leuchtschwache Sterne sein. Solche Sterne sind relativ hell im Infraroten. Mit Hilfe eines Infrarotspektrums kann auch dieser Fall ausgeschlossen werden. Sind alle diese Tests durchgeführt, so ist sichergestellt, dass es sich wirklich um den Transit eines Planeten handelt.

Der nächste Schritt ist dann die genaue Bestimmung der Masse und des Radius des Muttersterns des Planeten. Leider lässt sich mit CoRoT allein nur das Verhältnis der Radien des Planeten und des Sterns bestimmen. Den Radius und die Masse des Sterns lassen sich mit Hilfe von Spektren hoher Auflösung (UVES-Spektrographen am VLT) bestimmen. Die Messung der Masse des Planeten erfolgt dann im Wesentlichen mit dem dem, HARPS-Spektrographen am 3.6-m-Teleskop der ESO in La Silla/Chile. Weitere Beiträge kommen von 1.8-m-Teleskop am OHP, dem Schweizer 1.2-m-Teleskop „Leonard Euler“ und dem Tautenburg Teleskop. Angesichts des Umfangs der notwendigen Nachfolgebeobachtungen ist es nicht

verwunderlich, dass die Entdeckung eines Transitplaneten sehr viel Zeit in Anspruch nimmt. Der 87-Tage Rekord ist daher bis heute nicht gebrochen worden. Die Nachfolgebeobachtungen sind so umfangreich, dass sie auch eine Schranke setzten, wie viele Transit-Planeten überhaupt entdeckt werden können. Würde CoRoT uns hunderte von Planeten liefern, so wäre es einfach unmöglich alle zu verifizieren.

3. ERGEBNISSE

3.1. Die heißen Jupiter: CoRoT-1b und CoRoT5b

In unserem Sonnensystem befinden sich die felsigen Planeten Merkur, Venus, Erde und Mars im Innenbereich und die Gasriesen in Außenbereich. Die erste Entdeckung eines Gasriesen in einem kleinen Abstand vom Mutterstern war daher eine große Überraschung. Solche Objekte werden heiße Jupiter genannt. Die Entdeckung der heißen Jupiter war besonders überraschend, da neue Beobachtungen zeigen, dass protoplanetare Scheiben nur wenig Materie im Innenbereich haben und sich daher so massereiche Planeten wohl kaum dort gebildet haben können. Doch wenn sie sich weiter außen gebildet haben, wie sind sie nach innen gelangt?

CoRoT-1b ist solch ein heißer Jupiter, ein massereicher Planet in einem kleinen Abstand von seinem Mutterstern. Der Mutterstern hat eine Masse von $0.95 \pm 0.16 M_{\text{Sonne}}$ und einen Radius von $1.11 \pm 0.05 R_{\text{Sonne}}$. Die Oberflächentemperatur des Sterns beträgt 5950 ± 150 K und der Spektraltyp ist F9V. Die Umlaufperiode des Planeten beträgt nur 1.5089557 ± 0.0000064 Tage. Der Planet hat somit einen Abstand von nur 4.92 ± 0.08 Sternradien. Es handelt sich um daher um einen wirklich heißen Jupiter. Obwohl der Planet fast die gleiche Masse wie die des Jupiters hat ($M_{\text{Planet}} = 1.03 \pm 0.12 M_{\text{Jupiter}}$), ist sein Radius mit $1.49 \pm 0.08 R_{\text{Jupiter}}$ erheblich viel größer. Die Dichte ist entsprechend gering und beträgt nur $0.38 \pm 0.05 \text{ g cm}^{-3}$. Noch extremer ist CoRoT-5b, dessen Dichte sogar nur $0.217^{+0.031}_{-0.025} \text{ g cm}^{-3}$ beträgt. Da diese Planeten wie der Jupiter im Wesentlichen nur aus Wasserstoff und Helium bestehen, ist die geringe Dichte zunächst ein Rätsel. Die beste Erklärung ist, dass die Planeten durch die Wechselwirkung mit ihren Muttersternen gleichfalls aufgeblasen werden.

Mit CoRoT konnte erstmalig auch die Helligkeit des Planeten im reflektierten Licht gemessen werden. Es zeigt sich, dass der Planet weniger als 20% des Lichts reflektiert. Zum Vergleich: Unser Jupiter reflektiert 44% des Lichts, die Erde etwa 37%. Offenbar verleiht Russ in der Atmosphäre CoRoT-1b eine fast pechschwarze Aussehen. Eine weitere Besonderheit ist seine Umlaufbahn um den Stern. In unserem Sonnensystem betragen die Bahnneigungen der Planeten relativ zur Erdbahn weniger als 10 Grad. Anders ausgedrückt: Die Neigung der Rotationsachsen der Planetenbahnen sind alle (fast) gleich. Auch die Neigung der Rotationsachse der Sonne ist innerhalb von 10 Grad die gleiche, wie die der Planetenbahnen. Bei CoRoT-1b ist dies ganz anders. Der Planet hat fast eine polare Umlaufbahn, der Winkel zwischen der Rotationsachse des Sterns und der Bahn des Planeten beträgt 77 ± 11 Grad. Die beste Erklärung hierfür ist, dass er in der Frühphase der Entwicklung eine extrem starke Wechselwirkung zwischen dem Planeten einem schweren Körper gegeben haben muss. Inzwischen hat sich gezeigt dass über die Hälfte der extrasolaren Planeten solch eine Wechselwirkung gehabt haben müssen. Wahrscheinlich wurden die heißen Jupiter durch die Wechselwirkung mit einem anderen Planeten oder einem vorbeiziehenden Stern nach innen gestreut. Heiße Jupiter entstehen also wahrscheinlich dadurch, dass sie in großem Abstand von ihren Muttersternen entstehen, aber dann nach innen gestreut werden.

3.2. Ein Planet eines jungen Sterns: CoRoT-2b

Eine besondere Leckerbissen war die Entdeckung eines Planeten von einem jungen, aktiven Stern: CoRoT-2b. Der Mutterstern hat eine Masse von $0.97 \pm 0.06 M_{\text{Sonne}}$ und einen Radius von $0.90 \pm 0.02 R_{\text{Sonne}}$. Die Oberflächentemperatur des Sterns beträgt 5625 K. Der Mutterstern ist somit unserer Sonne ähnlich. Mit einer Umlaufperiode von 1.743 Tage handelt es sich um wiederum um einen dieser heißen Jupiter. Die Masse des Planeten beträgt $3.31 \pm 0.16 M_{\text{Jupiter}}$, sein Radius $1.47 \pm 0.03 R_{\text{Jupiter}}$. Das besondere an diesem Planeten ist aber sein Alter von nur wenigen 100 Mio. Jahren. Der Stern ist ein junger, aktiver Stern. Der S-Aktivitätsindex dieses Sterns 0.511. Zum Vergleich: Unsere Sonne hat $S=0.179$ und der sehr aktive Stern Epsilon Eri $S=0.496$. Erstmals war es möglich einen Planeten gleichsam als schwarze Abdeckscheibe zu verwenden um auf diese Weise die Verteilung der Flecken auf einem Stern zu messen. Auch bei CoRoT-2b konnte das reflektierte Licht des Planeten beobachtet werden. Wie bei CoRoT-1b ist die Reflexionsgrad mit 10-20% klein.

3.3. Braune Zwerge die Hauptreihensterne umkreisen: CoRoT-3b und CoRoT-15b

Objekte mit Masse zwischen Sternen und Planeten heißen braune Zwerge. Sie haben Massen von 13 bis 80 M_{Jupiter} . Statische Untersuchungen zeigen, dass Planeten und Doppelsterne relativ häufig sind. Es gibt aber nur wenige braunen Zwerge, die einen Stern in einem kleinen Abstand umkreisen. Daher war es sehr überraschend, als CoRoT einen Objekt mit einer Masse von 20 Jupitermassen entdeckte (CoRoT-3b). Mit CoRoT-15b wurde ein weiterer brauner Zwerg der einen Hauptreihenstern umkreist entdeckt. CoRoT-15b hat eine Masse von $64 \pm 5 M_{\text{Jupiter}}$. CoRoT-3b und CoRoT-15b sind die ersten bedeckenden braunen Zwerge die Hauptreihensterne umkreisen. Somit lassen sich deren Massen, Radien und Dichten mit sehr hoher Genauigkeit messen. Erstmals ist es möglich die Modelle von braunen Zwergen testen.

3.4. Ein Planeten mit einem Transit und einer Umlaufperiode von 95 Tagen: CoRoT-9b

Mit Ausnahme von zwei Planeten mit sehr exzentrischen Umlaufbahnen haben alle Transitplaneten sehr kurze Umlaufzeiten. Sofern es sich dabei um Gasriesen handelt, sind dies alles heiße Jupiter. Der einzige langperiodische Transit-Planet mit einer fast kreisförmigen Umlaufbahn ist CoRoT-9b. Die Umlaufperiode dieses Planeten beträgt 95 Tage. Da sich dieser Planet immer in einem sehr großen Abstand vom Stern befindet, so sollte dieser Planet nicht aufgeblasen sein, wie etwa CoRoT-1b, oder CoRoT-5b. In der Tat beträgt sein Radius nur $1.050 \pm 0.056 R_{\text{Jupiter}}$ bei einer Masse von $0.84 \pm 0.07 M_{\text{Jupiter}}$. Seine Dichte ist mit $0.90 \pm 0.16 \text{ g cm}^{-3}$ der des Jupiters ähnlich. Die ist ein weiterer Hinweis darauf, dass die heißen Jupiter durch die Wechselwirkung mit den Sternen aufgeblasen werden.

3.5. Der erste Gesteinsplanet: CoRoT-7b

Ein ganz besonderes Ereignis war die Entdeckung des ersten Gesteinsplaneten außerhalb unseres Sonnensystems: CoRoT-7b. Dieser Planet hat eine Umlaufperiode von 0.853585 Tagen, oder rund 20 Stunden. Seine Masse beträgt nur 4.8 ± 0.8 Erdmassen, oder $0.015 M_{\text{Jupiter}}$. Mit einem Radius von 1.68 ± 0.09 Erdradien ist dies der kleinste Planet mit gemessenem Radius außerhalb unseres Sonnensystems. Seine Dichte ist mit $5.6 \pm 1.3 \text{ g cm}^{-3}$ die der Erde, des Merkurs und der Venus ähnlich. Wie die Erde besteht dieser Planet sehr wahrscheinlich aus Gestein, ein Gasplanet hätte eine viel kleinere Dichte. Der Planet empfängt 1700-mal soviel Strahlung wie die Erde und ist entsprechend heiß. Da der Planet vermutlich stets die gleiche Seite seinem Mutterstern zuwendet wird seine Oberfläche auf eine Temperatur auf 1800 bis 2600 K aufgeheizt.