Zusammenfassung Bd. 2 Kapitel 5 „EXOPLANETEN“

Mathias Scholz

http://wincontact32.naturwunder.blogspot.com

http://wincontact.blogspot.com

© M.Scholz

Stand: 1.1.2011

Kapitelzusammenfassung

Exoplaneten

- Man vermutet, daß zumindest ein großer Teil der Hauptreihensterne Planeten besitzt. Sie sind nur äußerst schwer zu entdekken. Der erste „echte“ Exoplanet konnte 1995 als Begleiter des Sterns 51 Pegasi mittels Radialgeschwindigkeitsmessungen nachgewiesen werden, während zuvor (1992) bereits einige „Pulsarplaneten“ auf indirekten Weg gefunden wurden. Anfang Oktober 2010 waren 492 Exoplaneten in 413 extrasolaren Planetensystemen bekannt.
- Fast alle heute bekannten Exoplaneten haben sich nur indirekt in den Beobachtungen bemerkbar gemacht. Es gibt nur ganz wenige extrasolare Planeten, die mit der heute verfügbaren Beobachtungstechnik optisch auflösbar sind (z.B. V342 Pegasi)
- 2010 gelang die erste direkte Aufnahme eines Spektrums eines extrasolaren Planeten (HR 8799c) mit Hilfe des adaptiven Optiksystems NACO am Mt.Paranal-Observatorium.

Methoden zum Nachweis extrasolarer Planetensysteme

- Die Suche nach extrasolaren Planetensystemen ist beobachtungstechnisch eine Herausforderung, die nahe am technisch Machbaren operiert. Das führt zu einem Auswahleffekt derart, daß insbesondere massereiche (d.h. jupiterartige) Exoplaneten auf sternnahen Bahnen (kurze Umlaufperioden in der Größenordnung von Tagen) entdeckt werden. Die Entdeckung von „Supererden“ sowie terrestrischer, d.h. von der Größe her mit der Erde vergleichbarer Exoplaneten, steht noch am Anfang.
- Folgende Methoden kommen bei der Suche nach Exoplaneten zum Einsatz
  - Astrometrie
  - Radialgeschwindigkeitsmethode
  - Transitmethode
  - Gravitational Microlensing
  - Direkte Beobachtung
  - Sternbedeckung durch den Mond
  - Nulling-Interferometrie
  - Timing-Verfahren
- **Astrometrische Verfahren** beruhen auf der genauen Vermessung der Eigenbewegung eines Sterns. Stellare und planetare Begleiter verraten sich in einer „Wackelbewegung“ des Sterns entlang seiner projizierten Bahn an der Himmelskugel, da sich bekanntlich nur der Systemschwerpunkt gleichförmig-geradlinig (für das betrachtete Beobachtungsintervall) bewegt. In der Kombination mit Radialgeschwindigkeitsmessungen lassen sich aus astrometrischen Messungen nicht nur die Massensumme des Systems, sondern auch die Einzelmassen ermitteln, was eine Unterscheidung zwischen einem binären Sternsystem und einem Planetensystem erlaubt. Obwohl mit dieser Methode bis jetzt (2010) noch kein Exoplanet entdeckt werden konnte, ist es ein Verfahren mit Zukunft – und zwar durch den Einsatz optischer Interferometer (z.B. VLTI –ESPRI).
- Die meisten extrasolaren Planeten werden immer noch mit der **Radialgeschwindigkeitsmethode** entdeckt bzw. Entdeckungen, die mit anderen Verfahren erzielt worden sind, mit dieser Methode verifiziert (was besonders auf Transits zutrifft). Man nutzt dazu den Dopplereffekt aus, um aus der sich in der Radialgeschwindigkeitskurve niedergeschlagenen „Wackelbewegung“ des Sterns (Stern und Planet(en) bewegt sich um den gemeinsamen Systemschwerpunkt) auf die Existenz und die wichtigsten Bahnparameter eines oder mehrerer Exoplaneten zu schließen. Dazu sind spezielle hochauflösende Spektrographen notwendig, die Genauigkeiten von wenigen m/s in der Radialgeschwindigkeit zu ermitteln in der Lage sind.
- Aus der Radialgeschwindigkeitskurve eines Sterns mit einem (oder mehreren) planetaren Begleiter läßt sich deren Massefunktion bestimmen. Aus ihr läßt sich wiederum bei bekannter Sternmasse (für deren unabhängige Bestimmung es verschiedene Methoden gibt) die Masse eines Planeten bis auf den Unsicherheitsfaktor $\sin i$ bestimmen (d.h. die „Minimalmasse“).
- Aus der Radialgeschwindigkeitskurve läßt sich direkt die Umlaufperiode und, bei bekannter Sternmasse, die große Bahnhalbachse eines Exoplaneten ablesen. Die „wahre“ Bahn läßt sich bei Bahnneigungen zur Sichtlinie um 90° genau bestimmen. Das ist immer dann der Fall, wenn zusätzlich zur Variation der Radialgeschwindigkeit auch ein Transit beobachtet wird.

- Wenn ein genügend großer Exoplanet möglichst nahe in Blickrichtung (i~90°) seinen Mutterstern passiert (analog zu einem Venus- oder Merkurdurchgang, **Transit**), dann kommt es zu einer geringfügigen Änderung im Strahlungsfluß des Muttersterns, der sich mit genauen photometrischen Methoden messen läßt. Die Lichtkurve, die man dabei erhält (Bedeckungslichtkurve), beinhaltet Informationen über das Größenverhältnis von Stern und Planet sowie über die Bahn des Planeten (Umlaufperiode, große Bahnhalbachse, Bahnexzentrizität) um seinen Mutterstern. Im Zusammenspiel mit Radialgeschwindigkeitsmessungen können darüber hinaus auch noch die Einzelmassen beider Himmelskörper bestimmt werden, was mit der Radialgeschwindigkeitsmethode allein nicht möglich ist. Als Nebenprodukt lassen sich außerdem noch spezielle physische Daten zum Mutterstern ermitteln wie z.B. die Präsenz einer merklichen Randabdunklung oder eine ungleichmäßige Helligkeitsverteilung über die Sternscheibe (d.h. die Existenz und die Ausmaße von „Sternflecken"). Theoretisch ist sogar der Nachweis von Planetenmonden bzw. von Ringsystemen um einen Exoplaneten mittels Transitbeobachtungen möglich.
- Durch aufwendige spektralphotometrische Verfahren lassen sich aus der Transitlichtkurve bzw. aus Spektren, die während und außerhalb eines Transits gewonnen wurden, sogar spektrale Merkmale eines Exoplaneten extrahieren und auf diese Weise Erkenntnisse über dessen Atmosphäre ableiten (z.B. Temperatur, stoffliche Zusammensetzung).
- Wenn ein Stern genau in Blickrichtung vor einem weit hinter ihm liegende Stern vorbeizieht, kann seine Schwerkraft die Strahlung des dahinter liegenden Sterns wie bei einer Linse bündeln, was ein Beobachter als einen z.T. recht starken Helligkeitsanstieg, der nach dem Transit wieder symmetrisch abfällt, registrieren kann. Dieser Effekt wird ***Gravitational Microlensing*** genannt und läßt sich auch zur Suche nach Exoplaneten ausnutzen.
- Ein Exoplanet verrät sich in einem kurzen asymmetrischen Helligkeitsanstieg auf einen der Flanken der Microlensing-Lichtkurve. Aus der Lage und Form dieses zusätzlichen Helligkeitsanstiegs lassen sich einige Systemparameter eines Exoplaneten recht genau bestimmen (z.B. dessen Masse). Nachteilig ist jedoch, daß Gravitationslinsenereignisse einmalige Ereignisse sind, die sich nachher nicht mehr unabhängig verifizieren lassen.
- Eine Suche nach gravitativen Mikrolinsenereignissen hat offensichtlich nur dann Aussicht auf Erfolg, wenn man systematisch und großflächig sehr dichte Sternfelder mit vielen Millionen Sternen photometrisch überwacht. Geeignete Gebiete sind z.B. dichte Sternwolken in Richtung Milchstraßenzentrum, aber auch sternreiche Regionen unserer Nachbargalaxien wie die Magellanschen Wolken oder der Andromedanebel. Man spricht in diesem Fall von *Microlensing Surveys*, die, wie z.B. OGLE, schon einige interessante Exoplanetenentdeckungen aufweisen können.
- Es gibt bis jetzt nur sehr wenige Exoplaneten, die man direkt, d.h. **optisch getrennt von ihrem Mutterstern**, beobachten kann. Ein immer noch nicht ganz sicherer Kandidat dafür ist GQ Lupi A, der einen sehr jungen Stern, der sich noch im T-Tauri-Stadium befindet, umkreist.
- Zur direkten Beobachtung von Exoplaneten verwendet man spezialisierte Sternkoronographen (z.B. im Hubble-Weltraumteleskop), die in der Lage sind, einen großen Teil des grellen Lichts des Muttersterns auszublenden. Damit konnte z.B. ein Exoplanet in der Staubscheibe um den Stern Fomalhaut (α Piscis Austrini) entdeckt werden.
- Die optische Trennung eines Exoplaneten von seinem Mutterstern ist auch eine Voraussetzung dafür, um von diesem Objekt ein Spektrum aufnehmen zu können. Gelungen ist das bis jetzt (2010) nur mit dem NAOS/CONICA-System am VLT bei dem Exoplaneten HR 8799c im infraroten L-Band.
- Theoretisch kann sich die Existenz eines Exoplaneten auch im Beugungsmuster eines Sterns widerspiegeln, **welcher vom Mond bedeckt wird**. Die Entdeckung oder überhaupt der Nachweis eines bereits bekannten Exoplaneten mit dieser Methode ist jedoch noch nicht gelungen – auch weil neben den technischen Voraussetzungen die entsprechenden Beobachtungsprogramme fehlen.
- Eine sehr zukunftsträchtige Methode zur direkten Beobachtung von Exoplaneten ist die **Nulling-Interferometrie**. Dabei wird das Licht von mindestens zwei Teleskopen phasenverschoben derart überlagert, das destruktive Interferenz auftritt und damit der Stern quasi im Detektor verschwindet. Etwaige schwache Begleiter werden dagegen sichtbar, da sie vom Mutterstern nicht mehr überstrahlt werden.
- Das sogenannte Timing-Verfahren macht man sich bei der Suche nach planetaren Begleitern um rotierende Neutronensterne, die als Pulsare in Erscheinung treten, zu nutze. Es ähnelt im Prinzip der Radialgeschwindigkeitsmethode, nur das man hier die im Ruhesystem des Pulsars weitgehende Frequenzstabilität von dessen gepulster Radiostrahlung ausnutzt, die natürlich genauso dem Dopplereffekt unterliegt, wie die Frequenz einer Spektrallinie.

Weltraum-Missionen zur Entdeckung und Beobachtung extrasolarer Planeten

- Die Erdatmosphäre ist die größte Fehlerquelle bei der Suche und der Beobachtung von Exoplaneten, die sich trotz des Einsatzes adaptiver Optiken an den Riesenteleskopen dieser Welt niemals vollständig eliminieren läßt. Deshalb sind Beobachtungsplattformen im kosmischen Raum für die Exoplanetenforschung unabdingbar.
- Beispiele für Weltraum-Missionen mit dem Schwerpunkt Exoplanetenforschung sind COROT (Convection Rotation and Planetary Transit, Start 2007) und Kepler (Start 2009). Beide Missionen dienen der photometrischen Überwachung großer Sternfelder um dabei Exoplaneten-Transits aufzuspüren. Erste Entdeckungen konnten noch im Jahr, in dem die Weltraumteleskope gestartet wurden, veröffentlicht werden.
- Detailuntersuchungen (insbesondere photometrische und spektralphotometrische Messungen) an bereits bekannten Exoplaneten konnten mit Hilfe des Hubble- und des Spitzer-Weltraumteleskops vorgenommen werden.
- In der Zukunft sind Missionen geplant, die interferometrische Methoden zum Aufspüren und detaillierten Untersuchungen extrasolarer Planeten verwenden sollen. Dabei ist der für 2010 geplante *Terrestrial Planet Finder* (TPF) u.a. aus Budgetgründen in die Zukunft (frühestens 2017) verschoben worden. Stattdessen ist für 2015 der Start des *SIM Lite Astrometric Observatory* geplant, welches auch nach dem Prinzip der optischen Interferometrie arbeiten wird.

Statistik und Exoplaneten

- Um die wahre Population von Exoplaneten unterschiedlichen Typs in unserem Milchstraßensystem abschätzen zu können, sind statistische Untersuchungen an einer möglichst großen Stichprobe extrasolarer Planeten bzw. Planetensysteme notwendig. Deshalb werden große Anstrengungen unternommen, die dazu notwendige Datenbasis durch gezielte Durchmusterungen kontinuierlich auszubauen. Ein Schlüsselbegriff dabei ist der Begriff der Entdeckungswahrscheinlichkeit.
- Ein großes Problem für die Statistik sind diverse Auswahleffekte, die den verschiedenen Entdeckungsmethoden anhängen. So sind große Exoplaneten (Gasriesen) in sternnahen Bahnen mit kurzen Umlaufperioden um ein Vielfaches leichter zu entdekken als die gleichen Planeten auf sternfernen Bahnen. Das betrifft sowohl die Radialgeschwindigkeitsmethode als auch die Transitmethode, die statistisch gesehen zusammen die meisten Exoplanetenentdeckungen liefern. Planeten im mittleren (Supererden) und unteren Massebereich (terrestrische Exoplaneten) sind dagegen extrem schwer aufzufinden – selbst wenn sie relativ sternnahe Bahnen besitzen.
- Ein erstes und sehr wichtiges Ergebnis statistischer Untersuchungen ist, daß die Wahrscheinlichkeit, daß ein Hauptreihenstern einen Gasriesen vom Typ *hot jupiter* besitzt, signifikant von der Metallizität seines Muttersterns abhängt. Ihre Entdekkungswahrscheinlichkeit erhöht sich deshalb, wenn man sich in Surveys auf Gebiete in der Milchstraße konzentriert, wo die Sterne einen besonders hohen Metallgehalt aufweisen.
- Für jede Entdeckungsmethode läßt sich die Entdeckungswahrscheinlichkeit für bestimmte Exoplanetensysteme (Art des Muttersterns, dessen Entfernung, Masse und Bahnlage des Exoplaneten etc.) für eine gegebene Populationsdichte vorhersagen.
- Die Masseverteilung aller gegenwärtig bekannten Exoplaneten spiegelt in erster Linie Auswahleffekte wieder und zwar derart, daß massereiche Exoplaneten bei weitem überrepräsentiert erscheinen.
- Bei deutlich statistisch abgrenzbaren Exoplanetentypen (z.B. *hot jupiters*) können Korrelationen zwischen einzelnen Parametern (insbesondere Bahnelemente) wichtige Informationen über deren Kosmogonie liefern (z.B. Migrationsszenarien).

Exoplanetenfamilien

- Die Planeten und Großmonde des Sonnensystems lassen sich in vier Gruppen einteilen: Gesteinsplaneten, jupiterartige Gasplaneten (Riesenplaneten), neptunartige Gasplaneten (Großplaneten) sowie Eisplaneten (inkl. Kuiperoide). Diese Einteilung reicht jedoch zur Klassifizierung von Exoplaneten nicht aus. Deshalb wurden in Bezug auf planetare Körper weitere Klassifikationsschemen entwickelt.
- Oft wird ein „heuristisches“ Klassifikationsschema verwendet, welches sich an der Masse und Bahnlage eines Exoplaneten orientiert. Beispiele sind „*jupiters*“, „*hot jupiters*“, „*eccentric jupiters*“ (bezieht sich auf die Bahnform), „*cold neptunes*“, „*hot neptunes*“, „*super earths*“ und „*earth-class planets*“ für terrestrische Planeten.

- Grob lassen sich Planeten gemäß ihrem inneren Aufbau in Gesteinsplaneten und Gasplaneten einteilen. Das Unterscheidungsmerkmal ist dabei die mittlere Dichte, da sie mit der Dichte der im Wesentlichen am Aufbau beteiligten Stoffe bzw. Stoffgruppen korreliert ist: unter 1000 kg/m³ Gase, ~1000 kg/m³ Wasser, ~3300 kg/m³ Silikate, ~8000 kg/m³ Eisenmetalle.
- Gesteinsplaneten lassen sich entsprechend ihrer Masseanteile an Wasser (Eis), Silikaten und Metallen (Eisen, Nickel) in folgende Gruppen einteilen:
  - Metallplaneten
  - Matallosilikatplaneten
  - Silikatplaneten
  - Hydrosilikatplaneten
  - Eisplaneten

    - *hypothetisch* -

  - Kohlenstoffplaneten
  - Reine Wasserplaneten (*pure water planets*)
- Gasplaneten (Gasriesen) unterteilt man in jupiterartige Gasplaneten (bestehen hauptsächlich aus Wasserstoff und Helium) und neptunartige Gasplaneten (verarmt an Wasserstoff, vergleichsweise hoher von volatilen Stoffen, die man unter dem Begriff „Eis“ zusammenfaßt – Methan, Wasser, Ammoniak; deshalb auch *icy giants*).
- Gasriesen können auch nach der Morphologie ihrer Atmosphären klassifiziert werden. Eine solche Klassifikation wurde von DAVID SUDARSKY et.al. 2003 vorgeschlagen. Sie orientiert sich ähnlich der Spektralklassifikation der Sterne an einer Temperaturabfolge. Ein wichtiges Merkmal ist dabei die Präsenz von Wolken unterschiedlicher Zusammensetzung:
  - Klasse 0 – Methanwolken
  - Klasse 1 – Ammoniakwolken
  - Klasse 2 – Wasserdampfwolken
  - Klasse 3 – durchsichtige Atmosphäre
  - Klasse 4 – Alkaliabsorption
  - Klasse 5 – Siliziumwolken

Planetologie der extrasolaren Gasplaneten (Gasriesen)

- Als Gasriesen werden Planeten der Jupiter- und Neptunklasse bezeichnet, die überwiegend aus molekularem Wasserstoff sowie Helium aufgebaut sind. Eine relativ gut erforschte Gruppe ist dabei die Gruppe der *hot jupiters*.
- Die obere Grenzmasse für Gasriesen liegt bei ~13 Jupitermassen. Den darüber liegenden Massebereich zwischen 13 und 75 (bis 90 je nach Metallizität) Jupitermassen okkupieren die Braunen Zwerge.
- Gasriesen, die weitab von einem Mutterstern ein individuelles Einzeldasein führen, bezeichnet man als *free floaters* oder Planemos. Man hat sie z.B. im Orionnebel gefunden.
- Die beobachterische Unterscheidung von massereichen Gasplaneten und Braunen Zwergen ist schwierig und schlüssig nur über die Masse möglich. Braune Zwerge, die sich spektroskopisch untersuchen lassen, verraten sich u.a. durch die Präsenz von Lithiumlinien (Lithiumtest).
- Die Theorie der Gasplaneten orientiert sich stark an den Riesen- und Großplaneten des Sonnensystems.
- Für den inneren Aufbau von Gasplaneten gelten im Prinzip die gleichen physikalischen Gesetze, wie sie auch den inneren Aufbau von Sternen bestimmen. Insbesondere muß die Bedingung des hydrostatischen Gleichgewichts für jeden Punkt im Planeten erfüllt sein. Den radialen Druckverlauf $P(r)$ liefern die jeweils gültigen Zustandsgleichungen, von denen auch das radiale Temperaturprofil $T(r)$ abhängt. Darüber hinaus muß noch die Schichtung bzw. Durchmischung der verschiedenen Gaskomponenten $x_i(P)$ bekannt sein, um ein entsprechendes Planetenmodell berechnen zu können. Außerdem sind noch die Phasendiagramme, in erster Linie von Wasserstoff und Helium, zu beachten, um Phasengrenzen im Planeteninnern (z.B. Übergang von flüssigen molekularen Wasserstoff zu supraleitfähigen metallischen Wasserstoff) berücksichtigen zu können.
- Da der innere Aufbau eines Gasplaneten auch von dessen Alter abhängt (Entmischungsvorgänge), spielen bei der Modellierung sogenannte Entwicklungsmodelle eine große Rolle.

- Im Unterschied zu „normalen“ Sternen fehlt bei Gasplaneten eine effektive innere Energiequelle. Sie können aber durchaus Energie durch Kontraktion und Entmischung verschieden dichter Stoffe gewinnen, was deren Abkühlung verzögern kann.
- Die stoffliche Zusammensetzung eines Gasriesen hängt von der Art und Weise sowie vom Ort seiner Entstehung innerhalb der protoplanetaren Gas- und Staubscheibe ab. Deshalb spielt die Elementehäufigkeit am Entstehungsort eine große Rolle.
- Es ist statistisch hoch signifikant, daß Sterne mit hoher Metallizität häufiger Gasriesen als planetare Begleiter besitzen als Sterne geringer Metallizität. Dieser Fakt wird z.B. bei der Suche nach Exoplaneten nach der Transitmethode ausgenutzt.
- Die Theorie des inneren Aufbaus von Gasriesen wird analog der Theorie des inneren Aufbaus von Sternen entwickelt mit der Ausnahme, daß sie keine effektive innere Energiequelle besitzen. Die Geschichte eines Gasplaneten ist eine Geschichte der Abkühlung, der stofflichen Entmischung und der Kontraktion. Sie wird anhand von sogenannten Entwicklungsmodellen theoretisch untersucht.
- Wichtig für das Verständnis des inneren Aufbaus von Gasplaneten sind die Zustandsgleichungen von Wasserstoff- und Heliumgemischen sowie von Gemischen aus höhermolekularen volatilen Stoffen, die man in der Planetologie als „Eis“ bezeichnet. Dazu gehören Methan, Wasser und Ammoniak. „Eis“ ist ein wesentlicher Bestandteil von sogenannten „*neptunes*“.
- Gasplaneten lassen sich bedeutend schwieriger am Computer modellieren als beispielsweise Hauptreihensterne. Das liegt hauptsächlich daran, daß die zugrundeliegenden Zustandsgleichungen für die von diesen Objekten okkupierten Parameterbereiche für Temperatur und Druck nur ungenügend bekannt sind. Die Verbesserung der Zustandsgleichungen für die Stoffe, aus denen Gasplaneten hauptsächlich aufgebaut sind, ist deshalb eine wichtige Aufgabe der Planetologie.
- Während man in einem statischen Modell quasi eine Momentaufnahme eines Planeten betrachtet, wird in einem Entwicklungsmodell – wie der Name schon sagt – die Evolution eines Planeten von seiner Entstehung aus vorgegebenen Anfangsbedingungen bis zu seiner endgültigen Auskühlung über einen langen Zeitraum hinweg verfolgt. Konkret bedeutet das, daß man in Computermodellen z.B. die Leuchtkraft *L*, die effektive Temperatur T_{eff}, den Planetenradius *R* sowie weitere Parameter (z.B. Stoff-, Temperatur- und Druckprofile) als Funktion der Zeit für eine genau definierte Ausgangskonfiguration berechnet.
- Gerade Entwicklungsmodelle sind für die Interpretation von Beobachtungsdaten von Exoplaneten von großer Bedeutung, da sie einen Zusammenhang zwischen Beobachtungsgrößen wie Masse und Radius und dem inneren Aufbau von Gasplaneten herstellen (Masse-Radius-Beziehung).
- Sternatmosphären sind im Vergleich zu den „kühlen“ und meist neutralen Planetenatmosphären bedeutend einfacher strukturierte Gebilde. In ihnen spielen sich in erster Linie Ionisationsprozesse und weniger chemische Prozesse ab, während Letztere maßgeblich für Planetenatmosphären sind. Beispiele sind u.a. Kondensationen, die sich in Aerosol- und Wolkenbildungen niederschlagen und die mit entscheidend die physikalischen Verhältnisse (z.B. Temperaturprofile) einer planetaren Atmosphäre festlegen. Ihre theoretische Modellierung ist sowohl aufgrund der Komplexität der Atmosphärenchemie als auch der Tatsache, daß die Bedingungen, wie sie in den Atmosphären von Gasplaneten herrschen (man denke nur an die *hot jupiters*!), fernab jeder experimentellen Erfahrung liegen, nicht einfach.
- Die relativ gut erforschten Atmosphären der Gasplaneten unseres Sonnensystems stellen Referenzatmosphären im Sinne der vergleichenden Planetologie für Exoplaneten mit ähnlichem Aufbau dar. An ihnen lassen sich sehr gut allgemeine Atmosphärenmodelle überprüfen, die anschließend auch für Exoplaneten verwendet werden sollen.
- Möchte man Aussagen über Kondensationsprozesse, die ja für Dunst- und Wolkenbildungen ausschlaggebend sind, machen (sie bestimmen unsere Vorstellungen, wie Gasplaneten „vor Ort“ aussehen könnten, denn eine direkte Abbildung wird wohl auch bis in die ferne Zukunft illusorisch bleiben), dann ist die Kenntnis des radialen Temperaturprofils einer Exoplanetenatmosphäre eine wichtige Voraussetzung. Er bestimmt im Wesentlichen den Schichtenaufbau einer planetaren Atmosphäre.
- Das Temperaturprofil, welches idealerweise als adiabatisch mit einem höhenabhängigen adiabatischen Temperaturgradienten angesehen werden kann, wird lokal durch Phasenumwandlungsprozesse der in der Atmosphäre enthaltenen Stoffe gestört, was sich z.B. in Dunst- und Wolkenbildungen äußern kann. Phasenumwandlungen können in dem Höhenbereich einer Atmosphäre, wo sie auftreten, der Umgebung Energie zuführen bzw. entnehmen (latente Wärme). Wolken und Dunst nehmen aufgrund ihrer Absorptions- und Streueigenschaften in Form von Rückkopplungen Einfluß auf das Temperaturprofil.
- Unter welchen Bedingungen ein in einer Atmosphäre enthaltener Spurenstoff (z.B. Wasserdampf) auskondensiert, kann durch Lösung der Clausius-Clapeyronsche Differentialgleichung für ein gegebenes Temperatur-Druck-Profil ermittelt werden.

- Die Clausius-Clapeyronsche Differentialgleichung beschreibt den temperaturabhängigen Anstieg der Dampfdruckkurve eines Stoffes. Sie gibt darüber Auskunft darüber, wie groß der Anteil jeder der beiden Phasen (z.B. gasförmig – flüssig) bei einer gegebenen Temperatur-Druck-Kombination ist. Nachteil ist jedoch, daß gerade die Dampfdruckkurven für reale Gase in den Parameterbereichen, wie sie in den Atmosphären von Gasplaneten realisiert sind, nur unzureichend bekannt sind (gewöhnlich werden Dampfdruckkurven experimentell ermittelt).
- Die Entstehung von Wolkenschichten ist ein wichtiges Charakteristikum kühler neutraler Atmosphären. Man kann sogar sagen, daß Wolkenbildung während des Abkühlungsprozesses eines substellaren Objektes ein unausweichlicher Vorgang ist, der weitreichende Konsequenzen auf die Atmosphärenchemie und auf den Strahlungstransport innerhalb einer Atmosphäre hat. Man kann deshalb erwarten, daß sich diese Vorgänge deutlich in deren Spektren niederschlagen.
- Da Temperatur und Druck mit der Tiefe zunehmen, werden sich ausgehend von einem bestimmten Gasgemisch entsprechend der Kondensationstemperaturen der darin enthaltenen Stoffe verschiedene Wolkenschichten ausbilden, deren Lage sich theoretisch in entsprechenden Atmosphärenmodellen vorhersagen läßt. Für das äußere Erscheinungsbild eines Gasplaneten sind dabei im Wesentlichen immer die obersten Wolken- bzw. Dunstschichten ausschlaggebend, deren Chemismus wiederum entscheidend von der effektiven Temperatur des Planeten abhängt.
- Die Wolkenschichtung eines substellaren Objektes (Brauner Zwerg, Gasplanet) folgt der Regel „refraktive Sroffe unten“ (insbesondere Oxide von *Al*, *Ca* und *Ti*), „volatile Stoffe oben“ (z.B. H_2O, CH_4 und NH_3).
- Grob kann man geordnet nach der effektiven Temperatur folgende Kondensationsreihenfolgen erwarten:

2500-1900 K	gesteinsbildende Minerale und ihre Oxide	z.B. Perowskit- und Korundwolken
1900-1500 K	Metalle wie *Fe*, *Cr* sowie *Si*, Metallhydride, gesteinsbildende Minerale	z.B. Eisenwolken, Forsterit- und Enstatitwolken
1500-1100 K	Kondensation von Alkali-Verbindungen wie Chloride und Sulfide	z.B. Natriumsulfatwolken, Lithiumfluoride
1100-500 K	Kondensation weiterer Verbindungen von Alkalimetalle	z.B. Kaliumchlorid, Rubidiumchlorid und Cäsiumchlorid
<500 K	Entstehung von Wolken aus volatilen Stoffen	z.B. Wasser, Ammoniumhydrosulfide, Ammoniak, Methan

- Die Art der jeweils obersten „sichtbaren“ Wolkenschicht (abhängig von der effektiven Temperatur des Gasplaneten) bestimmt deren Aussehen und damit die Sudarsky-Klasse, denen sie zugeordnet werden. So erscheint z.B. der *hot jupiter* HD 209458 b („Osiris“) mit einer effektiven Temperatur von ~1130 K für einen Beobachter in seiner Nähe als sehr dunkel (Alkaliabsorptionen) mit einigen helleren Titan- Vanadiumoxid-Wolken in seiner Atmosphäre, weshalb er der Sudarsky-Klasse 4 zugeordnet wird.
- Man kann die Sudarsky-Klasse eines Exoplaneten im Prinzip bestimmen, wenn es gelingt, dessen Albedo sowie spezielle Spektralmerkmale zu ermitteln. Das ist bei einzelnen Objekten schon heute durch präzise spektralphotometrische Transitbeobachtungen (insbesondere im infraroten Spektralbereich) möglich.
- Mit der Entdeckung von 51 Pegasi b im Jahre 1995 wurde zugleich eine neue Klasse von Gasplaneten definiert, die man aufgrund ihrer extrem sternnahen Bahnen und der daraus resultierenden starken Aufheizung ihrer Tagseiten als „*hot jupiters*“ bzw. Pagasiden bezeichnet. Aus himmelsmechanischen Gründen erwartet man bei Ihnen eine gebundene Rotation, so daß es immer eine heiße Tagseite und eine kalte Nachtseite gibt.
- Die relative Lage der Rotationsachse in Bezug auf die Bahnebene und Umlaufrichtung eines Exoplaneten läßt sich u.U. über den Rossiter-McLaughlin-Effekt aus Transitlichtkurven ableiten.
- Der Rossiter-McLaughlin-Effekt beruht darauf, daß bei einem Stern, dessen Rotationsachse nicht gerade in Richtung Erde zeigt, ein rotationsbedingter Dopplereffekt nachgewiesen werden kann. Die Seite des Äquators, die sich auf den Beobachter zubewegt, zeigt eine Blauverschiebung, die andere eine Rotverschiebung. Bei einer Bedeckung des Sterns durch einen Exoplaneten während eines Transits verändert sich abwechselnd die Intensität des blau- und rotverschobenen Anteils. Die Messung dieses Effekts ermöglicht u.a. eine Berechnung der Umlaufzeit, der Bahnneigung und der Größe des Exoplaneten.

- In dem man eine Transitlichtkurve in engen Spektralbändern mißt (die z.B. Absorptionen oder Emissionen bestimmter Spektrallinien bzw. Molekülbänder einschließen), kann man aus der wellenlängenabhängigen Tiefe des Haupt- und Nebenminimums sowie aus dem leichten Anstieg zum Nebenminimum aufgrund des Phaseneffekts auf spektrale Merkmale des Exoplaneten schließen. Im Fall von HD 189733b gelang es auf diese Weise sogar mit Hilfe des Spitzer-Weltraumteleskops eine Temperaturverteilungskarte dieses Exoplaneten zu erstellen.
- Da *hot jupiters* aus himmelsmechanischen Gründen (Gezeitenwechselwirkung) eine gebundene Rotation ausführen, ist ihre Tagseite ständig zum Mutterstern und die Nachtseite entsprechend von ihr weg gerichtet. Es lassen sich deshalb aufgrund der unterschiedlichen Einstrahlungsverhältnisse auch große Unterschiede in der Strukturierung der Tagseiten-Atmosphäre und der Nachtseiten-Atmosphäre erwarten.
- Heiße Jupiter sind bei vergleichbarer Masse in ihrer Ausdehnung tendenziell größer als „gewöhnliche" Jupiter. Dieser durch Beobachtungen weitgehend bestätigte Umstand erklärt sich scheinbar zwangslos mit der Aufheizung ihrer Atmosphären durch die intensive Sternstrahlung, was ihrer extremen Sternnähe geschuldet ist.
- Die starke thermische Aufheizung, die den Wärmefluß aus dem Inneren eines Gasplaneten weit übersteigt, führt zu einem kontinuierlichen Verlust von dessen Atmosphäre. Folgende drei Effekte sind dafür wesentlich:
  - Thermischer Verlust – *Jeans Escape*
  - Verlust aufgrund nichtthermischer Effekte (z.B. Wechselwirkung mit dem Sternwind)
  - Hydrodynamisches *blow off*
- Die „Abdampfung" einer Atmosphäre erfolgt immer aus der Exosphäre eines Planeten heraus. Deren Temperatur sowie deren Abstand zur Roche-Grenze bestimmen dabei im Wesentlichen die Masseverlustrate.
- Der Masseverlust des *hot jupiter* HD 209458b konnte durch spektralphotometrische Transitbeobachtungen mit dem Hubble Space-Teleskop direkt nachgewiesen und die Verlustrate für neutrales Wasserstoffgas direkt gemessen werden.
- Es ist möglich, daß sich ein Gasplanet vom Typ *hot jupiter* durch den Verlust eines großen Teils des Wasserstoffs in seiner Atmosphäre zu einem *hot neptunes* entwickelt.
- Planeten, deren Atmosphären durch exogene Einflüsse fast vollständig erodiert sind, nennt man chthonische Planeten. Ein möglicher Kandidat für diese noch hypothetische Klasse von Exoplaneten ist CoRot-7b im Sternbild Einhorn.

Super-Earths und erdähnliche Exoplaneten

- Der Begriff *Super-Earth* bezeichnet einen großen extrasolaren terrestrischen Planeten im Massebereich zwischen einer und zehn Erdmassen (wobei die Massenobergrenze noch nicht genau definiert ist. Ab ca. 18 Erdmassen beginnt die Domäne der sogenannten *Exo-Neptuns*, die neben einer mächtigen Gashülle einen Kern besitzen, der überwiegend aus „Eis" besteht. Beobachtungstechnisch lassen sich beide Gruppen noch nicht sicher auseinander halten). Die Definition bezieht sich genaugenommen lediglich auf die Masse und beinhaltet keine Aussagen zur Oberflächenbeschaffenheit oder Bewohnbarkeit des Planeten. Man erwartet aber, daß Super-Erden zumindest einen „felsischen", d.h. metall- und silikatreichen Kern besitzen.
- Aus Transitbeobachtungen im Zusammenspiel mit Radialgeschwindigkeitsmessungen läßt sich das Masse-Radius-Verhältnis einer Supererde bestimmen. Diese Größe wird durch den stofflichen Aufbau definiert und erlaubt den Anschluß an theoretische Bulk-Modelle (z.B. Planeten aus reinem Wassereis, aus reinem Gestein und aus reinem Eisen sowie Zwischenstufen davon, die meist als sogenannte Zwei- oder Dreischalenmodelle ausgelegt sind – z.B. Kern, Mantel, Wasser- oder Eisschicht).
- Exoplaneten, die sowohl massemäßig als auch in ihrem Aufbau der Erde ähneln, werden gewöhnlich als „Terrestrische Planeten" bezeichnet. Sie sind besonders interessant (insbesondere für Astrobiologen), wenn sich ihre Bahn innerhalb der habitablen Zone um ihren Mutterstern befindet.
- Als „habitable" oder „bewohnbare" Zone um einen Stern wird gewöhnlich der Abstandsbereich bezeichnet, in dem auf einen geeigneten Planeten theoretisch Leben unter natürlichen Verhältnissen entstehen und sich über längere Zeiträume hinweg entwickeln kann. Physikalisch macht man diesen Abstandsbereich an der Präsenz von Wasser in seiner flüssigen Form fest, da flüssiges Wasser als universelles Lösungsmittel für organische Stoffe die wichtigste chemische Voraussetzung für Leben ist.
- Spezielle Merkmale in Spektren von Exoplaneten, die Stoffe oder physikalische Verhältnisse anzeigen, die eng mit einer biologischen Tätigkeit verbunden sind, bezeichnet man als Biomarker oder Biosignaturen.