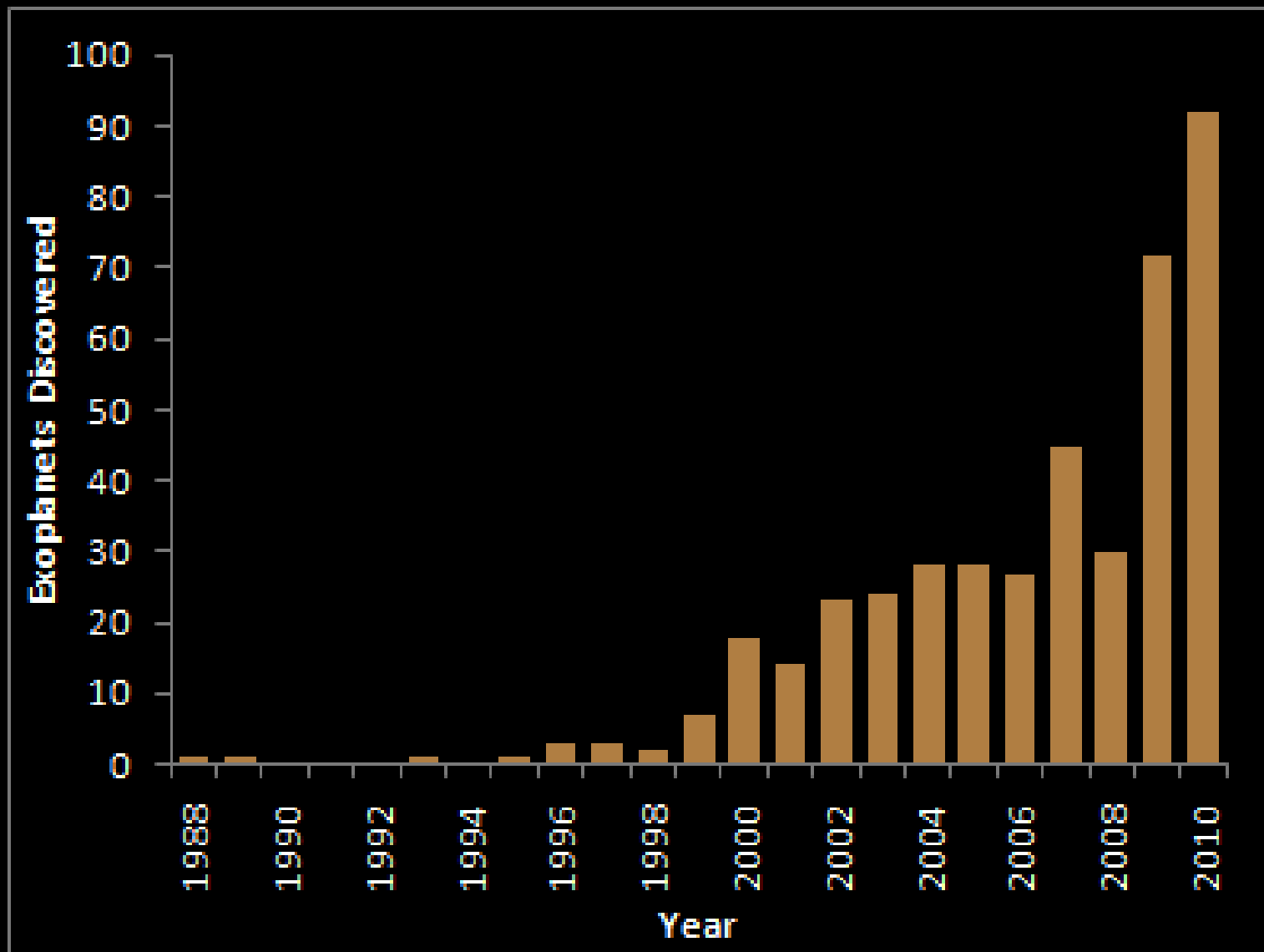


Entdeckungen und Entdeckungswahrscheinlichkeiten von Exoplaneten



Wiederholung:

Die **Transitmethode** ist eine der effektivsten Verfahren zur Entdeckung und detaillierten Untersuchung von Exoplaneten. Von den bis heute 703 offiziell anerkannten Exoplaneten wurden 186 mit dieser Methode gefunden.

Nachgewiesen wird der Intensitätsverlust des Muttersterns, wenn sich ein Exoplanet genau in Sichtlinie vor ihr vorbei wandert → Transitlichtkurve

In Verbindung mit Radialgeschwindigkeitsmessungen läßt sich u.U. die Masse des Exoplaneten bestimmen, da $i \sim 90^\circ$

Da u.U. die Atmosphären der Exoplaneten während der Bedeckung Marker im Spektrum des Muttersterns hinterlassen, können daraus direkt physikalische Parameter (z.B. Albedo, Temperatur, stoffliche Zusammensetzung) abgeleitet werden.

Bis heute (23.11.2011) wurden offiziell 578 Planetensysteme mit insgesamt 703 Planeten entdeckt. Davon optisch 10 sicher aufgelöst und 3 fragliche Kandidaten ...

Die Entdeckung von Exoplaneten ist ein schwieriges Geschäft...

Lohnt es sich, diesbezüglich wahllos irgendwelche Sterne zu beobachten oder gibt es Kriterien, welche die Wahrscheinlichkeit bei einem bestimmten Stern einen Exoplaneten zu finden, erhöht?

Ziel: Wie häufig sind Planetensysteme in unserer Milchstraße?
(Parameter in der Drake-Formel)

Man kann sich dieser Frage theoretisch (Stichwort Kosmogonie von Planetensystemen) oder über die statistische Auswertung der bereits entdeckten Exoplaneten annähern.

Gesuchte Größe: **Entdeckungswahrscheinlichkeit**

$$P = \frac{\text{Entdeckte Zahl von Exoplaneten}}{\text{Anzahl untersuchter Sterne mit bestimmten Eigenschaften}} * 100\%$$

Entdeckungswahrscheinlichkeiten hängen von einer großen Zahl von Parametern ab, die im Einzelnen meist nur schwer zu quantifizieren sind.

1. Wahrscheinlichkeit, daß ein x -beliebiger Stern überhaupt ein Planetensystem besitzt (kosmogonische Fragestellung)
2. Entdeckungsmethode / Auswahleffekte (mit der Transitmethode lassen sich nur Exoplaneten entdecken, die einen Transit verursachen → Transitwahrscheinlichkeit)
3. Signal-Rauschverhältnis der verwendeten Detektoren

....

Eine vernünftige Abschätzung erfordert auch die Einbeziehung kosmogonischer Überlegungen, die sich auf den Mutterstern beziehen. Weiterhin ist zu beachten, daß die einzelnen Nachweismethoden auch sehr selektiv von der physikalischen Beschaffenheit der Muttersterne abhängen:

Radialgeschwindigkeitsmethode – sehr scharfe (und sehr viele) Spektrallinien
Transitmethode – Abgrenzung zu Bedeckungsveränderlichen / Pulsationen

Wie groß ist der Bruchteil der Sterne im Milchstraßensystem, die überhaupt ein Planetensystem besitzen?

Zur Einleitung: Diese Zahl ist such heute noch weitgehend unbekannt und kann nur grob abgeschätzt werden

Die heute bekannte „Stichprobe“ an Exoplanetensystemen (578) ist bei der Abschätzung dieser Zahl nur bedingt brauchbar, da sie durch sehr viele Auswahleffekte verfälscht ist:

Beispiele:

Alle heute zur Verfügung stehenden Detektionsverfahren finden in erster Linie masse-reiche Exoplaneten (*jupiters*) in sternnahen Bahnen (*hot jupiters*). Zu geringeren Massen sowie zu längeren Umlaufzeiten hin nimmt die Entdeckungswahrscheinlichkeit sehr stark ab.

- Die Transitmethode findet nur Exoplaneten, deren Bahnebene zur Sichtlinie senkrecht steht ($i = \pm 90^\circ$)
- Mit der Radialgeschwindigkeitsmethode lassen sich nur Exoplaneten detektieren, bei denen man nicht gerade auf die Bahnebene schaut
Unbestimmtheit der Masse um den Faktor $\sin i$

„Trends“, die sich aus der Exoplanetenstatistik herauslesen lassen

Problem: Die „Massefunktion“ der Exoplaneten ist weitgehend unbekannt

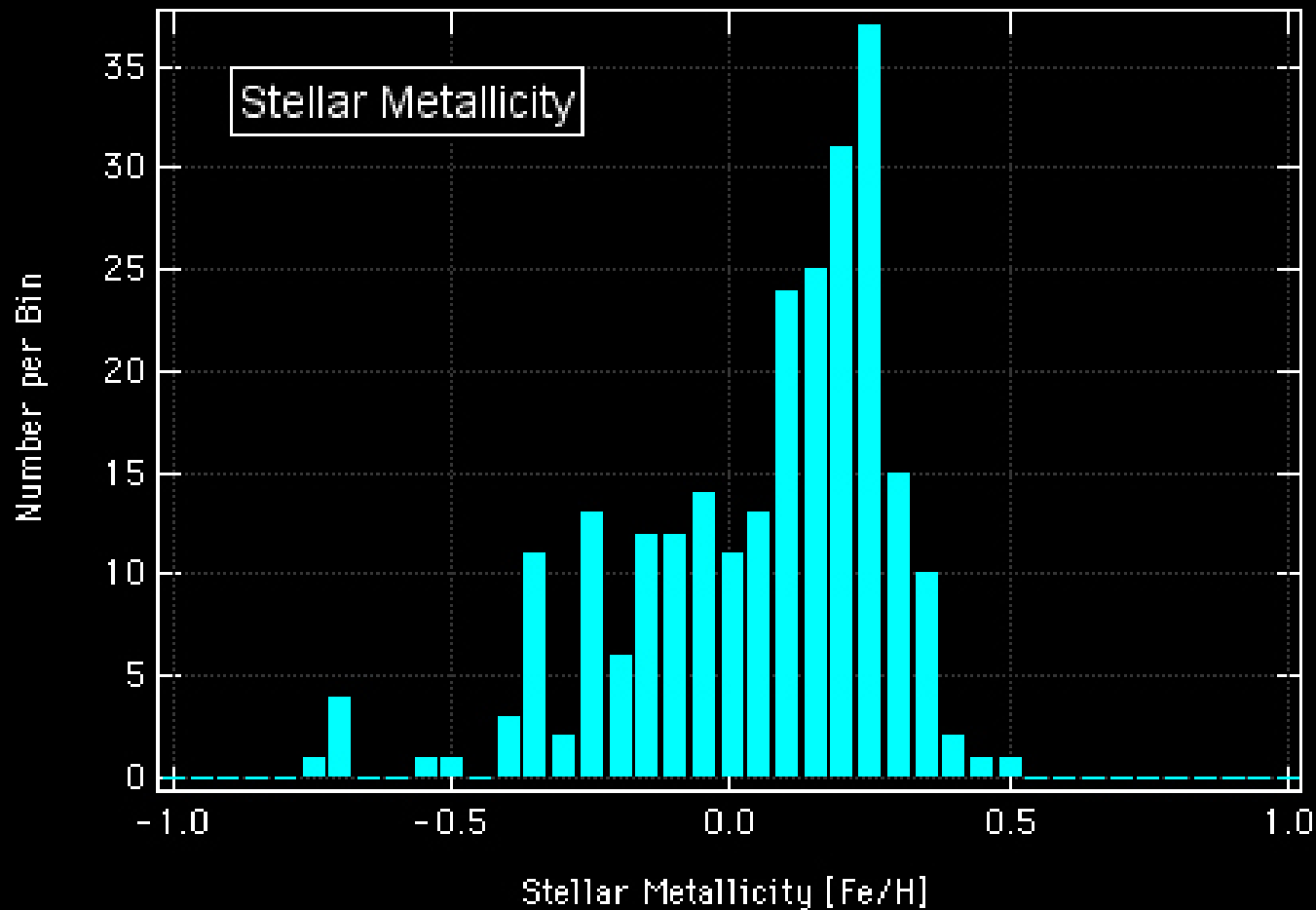
- Sterne mit Staubscheiben sind „kosmogonische“ Indikatoren
- Interpolation der Massefunktion der „jupiters“ und „neptuns“ nach unten

Ergebnisse: (nach A.Cumming et.al. 2008-2010)

- Ungefähr 1% aller sonnenähnlichen Einzelsterne (Spektraltyp F bis K) besitzen mindestens einen „hot jupiter“ als Begleiter (Umlaufszeit < 100 Tage)
- Ungefähr 4% aller sonnenähnlichen Einzelsterne sollen mindestens einen Exoplaneten im Massebereich zwischen 30 Erdmassen und einer Jupitermasse besitzen (Umlaufszeit < 100 Tage)
- Ungefähr 40% aller sonnenähnlichen Einzelsterne sollten mindestens einen „erdartigen“ (bezüglich der Masse) besitzen (unabhängig von der Umlaufszeit)

Planetensysteme sind ein gewöhnliches Phänomen in unserer Milchstraße

Metallizität der Muttersterne und Exoplaneten



$$[\text{Fe}/\text{H}] = \log(N_{\text{Fe}}/N_{\text{H}}) - \log(N_{\text{Fe}}/N_{\text{H}})_{\odot}$$

Häufigkeit schwerer Elemente
in Bezug auf Wasserstoff in einer
Sternatmosphäre

Überraschendes Ergebnis: „*hot jupiters*“ findet man besonders häufig bei Hauptreihensternen hoher Metallizität

nur bei 5% von Hauptreihensternen der Metallizität 0 konnten Exoplaneten nachgewiesen werden.

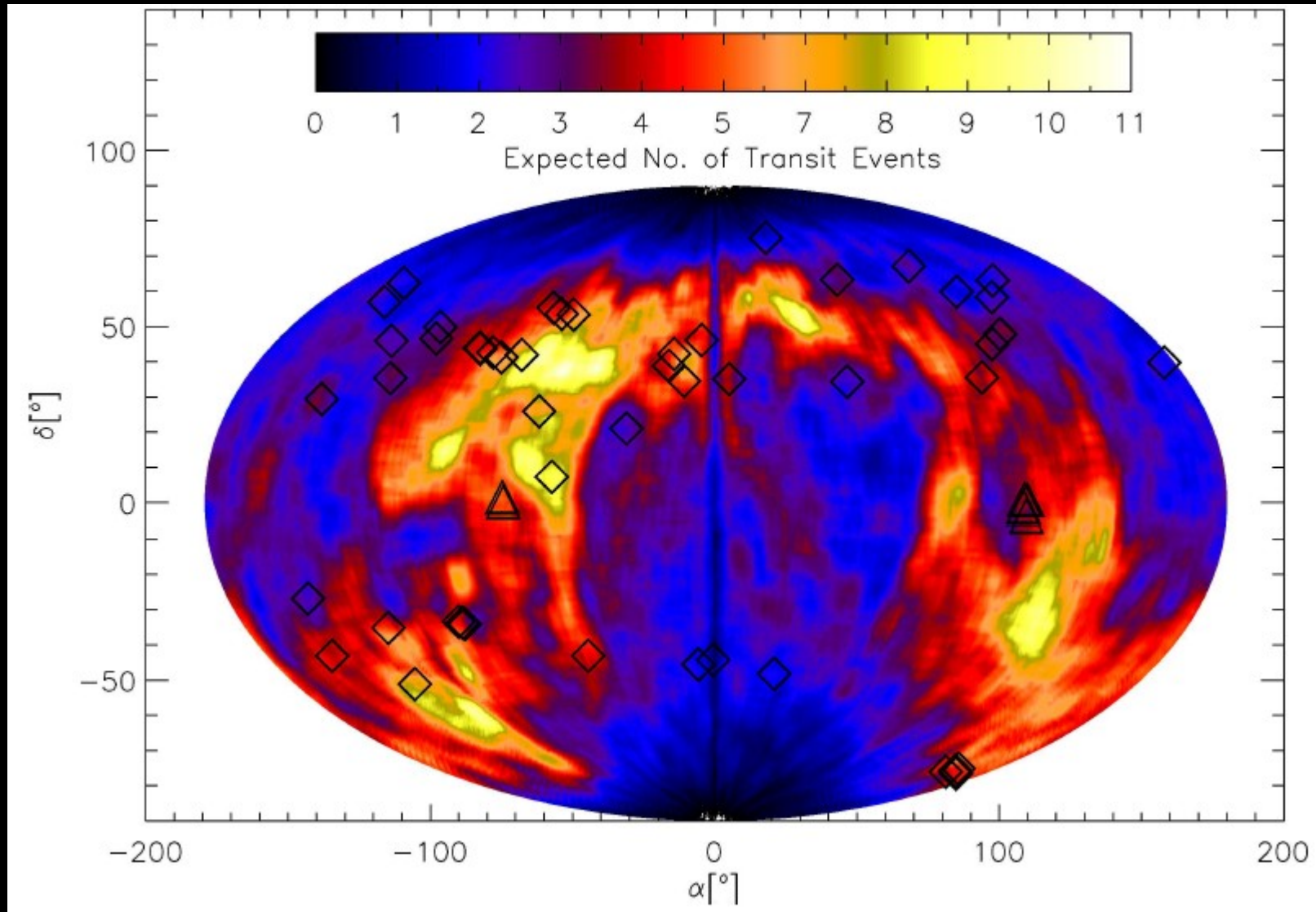
Sterne, welche die doppelte Metallizität der Sonne aufweisen, besitzen zu 25% „*hot jupiters*“

→ **Metallizität des Muttersterns ist ein gutes Auswahlkriterium für die Exoplanetensuche**

Aus dieser, noch nicht erklärbaren Korrelation läßt sich eine Strategie zur Exoplanetensuche nach der Transitmethode ableiten:

→ Man suche in der Milchstraße nach Sternfeldern, in denen metallreiche Hauptreihensterne in großer Zahl vorhanden sind und konzentriere dort die Exoplanetensuche

Die Metallizität eines Hauptreihensterns läßt sich aus dem (B-V) Farbenindex ableiten. Da die Metallizität mit der Entdeckungswahrscheinlichkeit von „*hot jupiters*“ über Transits korreliert ist, lassen sich Himmelskarten der Erwartungswerte derartiger Ereignisse herstellen:



Entdeckungswahrscheinlichkeiten für Transit-Ereignisse

Ob von der Erde aus gesehen ein Transit eingeht, ist ein rein geometrisches Problem:

- **Grundannahme:** Lage der Bahnebenen im Raum ist gleichverteilt (d.h. jede Bahnneigung i relativ zur Sichtlinie kommt gleich häufig vor)

zur Großen Bahnhalbachse des Exoplaneten

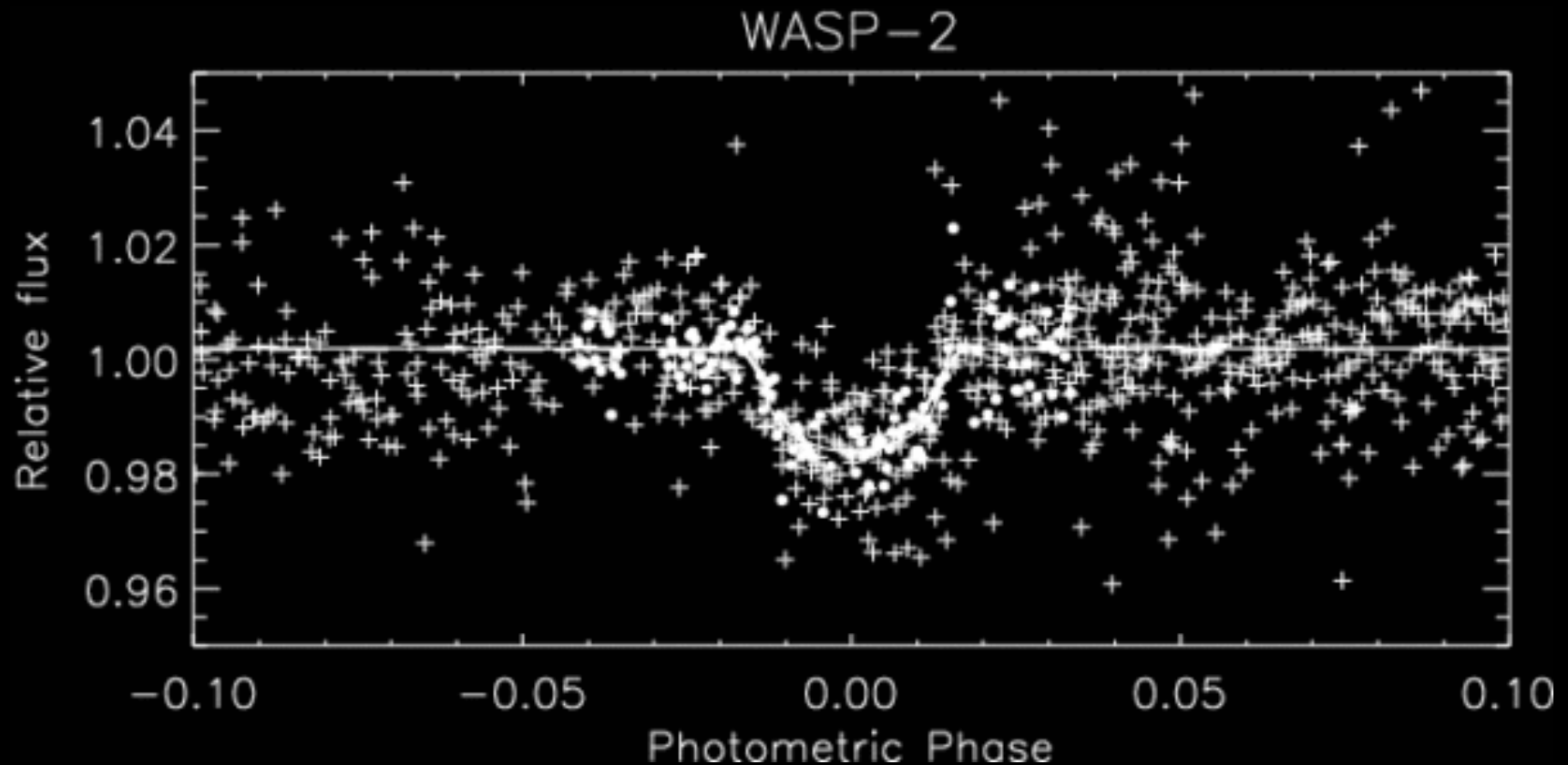
- Da die Große Bahnhalbachse über das 3. Keplersche Gesetz mit der Umlaufperiode gekoppelt ist, ergibt sich für die Entdeckungswahrscheinlichkeit
- Geometrische Wahrscheinlichkeit ergibt sich aus dem Verhältnis von Sterndurchmesser

$$P \sim 1/T^{2/3}$$

Die Entdeckungswahrscheinlichkeit von Transits nimmt zu größeren Umlaufperioden hin sehr schnell ab

Photometrische Genauigkeit, Signal-Rausch-Verhältnis

Ein Transitereignis läßt sich nur detektieren, wenn die vom Exoplaneten verursachte Abschwächung des Sternlichts (im Promille-Bereich) sich im photometrischen Meßsignal auch wiederfindet (‘d.h. nicht im „Rauschen“ untergeht)



Das Signal-Rauschverhältnis hängt u.a. von folgenden Größen ab:

- a) vom Photometer (Photometerrauschen)
- b) vom Teleskop (aktive / adaptive Optik)
- c) von der Erdatmosphäre (!), vom Himmelshintergrund, benachbarte Sterne ...

→ Das S/R-Verhältnis läßt sich durch Differenzmessungen zu konstanten Vergleichssterne verbessern.

→ Die Auswirkungen der „Erdatmosphäre“ lassen sich durch den Einsatz von Weltraumteleskopen wie COROT oder Kepler völlig eliminieren

Moderne CCD-Kameras, wie sie auch von Amateuren benutzt werden, erreichen in Bezug auf Transits ein S/R-Verhältnis, welches zur Verfolgung (und ggf. auch Entdeckung) von Exoplanetentransits ausreichend ist.

Erdgebundene Beobachtungen unterliegen einem Tag-Nacht-Wechsel, was die Entdeckung (es müssen mindestens 3 sichere Transits beobachtet werden) erschwert.

Theoretische Anzahl von entdeckbaren Transitplaneten in einem geeigneten Sternfeld

Eine genaue Analyse aller für die Exoplanetensuche relevanten Parameter bezüglich der bis heute entdeckten Exoplaneten ergibt folgendes Resultat:

- In einem Milchstraßengebiet mit Hauptreihensternen hoher Metallizität sind auf etwa 100000 Sterne 10 Exoplanetentransits zu erwarten

Beispiel „Kepler“ : ~ 700 (nichtverifizierte) Transits bei 156 000 Sternen
Davon bleiben vielleicht ~ 50 am Ende übrig ...

Andere Nachweismethoden liefern prinzipbedingt andere Abschätzungen. Die Radialgeschwindigkeitsmethode (erreichbare Genauigkeit 1..2 m/s) erfordert eine längere Überwachung von Einzelsternen, die sorgsam ausgewählt werden müssen.

Vergleich einzelner Nachweismethoden von Exoplaneten

Methoden	indirekt	direkt	Vorteile	Nachteile
Astrometrie	x		Nur auf lange Umlaufzeiten sensitiv	Geringe Genauigkeit Nur nahe Sterne
Radialgeschwindigkeitsmessung	x		Sehr erfolgreich. Entfernungsunabhängig	Nur entwickelte Sterne (Spektrum) Nur kurze Umlaufzeiten Nur große Massen
Transit	x		Radiusbestimmung Masse (zusammen mit Radialgeschwindigkeit) und Dichte Atmosphäre, Albedo, Temperatur Sensitiv bis herab zu erdähnlichen Planeten Untersuchung großer Sternfelder	Nur kurze Umlaufzeiten Höchste photometrische Präzision erforderlich Im Wesentlichen auf Hauptreihensterne der Spektraltypen F bis K beschränkt
Direkte Beobachtung		x	Direkte Untersuchung des Planeten	Extrem schwierig und ungenau Masse nicht bestimmbar
Mikrolensing	x		Sensitiv auf erdähnliche Planeten Untersuchung großer Sternfelder	Singuläre Ereignisse (Verifizierungsproblem) Bahnparameter nur schwer bestimmbar

Nächstes Mal: Exoplanetenfamilien (Klassifikation, Abgrenzung)

