

Exoplaneten selbst erforschen

Vers. 250206

Arno Riffeser <arri@usm.lmu.de>

Im Rahmen des Wettbewerbs zum Wissenschaftsjahr 2023 hatten Schülerinnen und Schüler ab 15 Jahren die Möglichkeit, selbst mit echten Beobachtungsdaten zu arbeiten. Dabei konnten sie durch die Analyse von Lichtkurven und Spektren, einige Eigenschaften der beobachteten Planeten ermitteln und erhielten so einen direkten Einblick in die Arbeit von Wissenschaftlern. Grundlage des Wettbewerbs waren die Transit- und die Radialgeschwindigkeitsmethode, mit denen am Wendelstein Observatorium nach Exoplaneten gesucht wird.

Wie funktioniert astronomische Forschung?	2
Wo kommen die Daten her?	4
Wie analysieren wir die Daten?	7
Wie können Informationen zum Stern helfen und wo finden wir diese Informationen?	9
Aufgabenstellung	10
Doch wie bekommen wir die Masse des Planeten?	10
Informationen zu allen Exoplaneten	13
Anhang	15
Direkte Installation von python miniconda3 auf Windows	16

Wie funktioniert astronomische Forschung?

Experimentelle Forschung besteht immer aus Messungen und der anschließenden Interpretation von Daten.

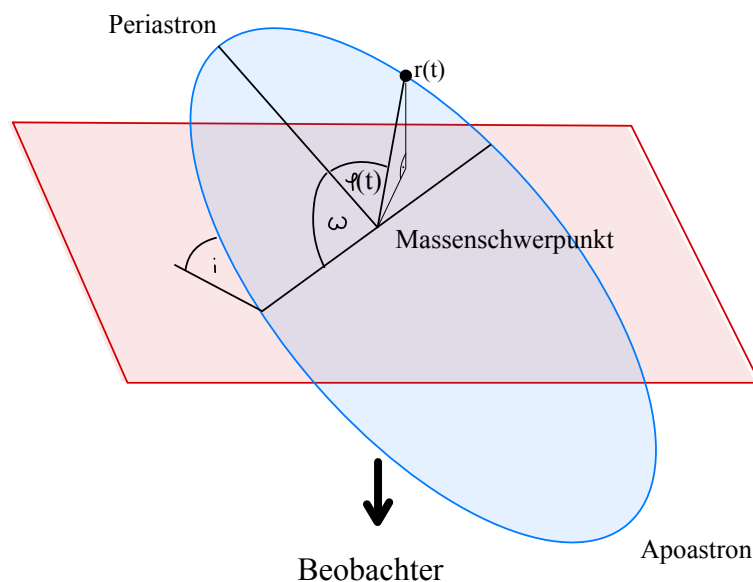
In unserer Planetenforschung am Wendelstein Observatorium sind es Lichtveränderungen einerseits und Geschwindigkeitsveränderungen durch den Dopplereffekt andererseits, die über einen bestimmten Zeitraum gemessen werden. Sehr praktisch ist dabei, dass Planeten periodisch um ihren Mutterstern kreisen und wir diese Veränderungen immer wieder messen können: Die direkteste (und auch genaueste) Beobachtungsgröße ist dabei die **Periode** P . Seit dem Astronomen Kepler kennen wir die Abhängigkeit zwischen **Abstand** zwischen Planet und Stern a und Periode und seit Newton zusätzlich den Zusammenhang mit der **Masse** des Sterns M_{Stern} ¹:

$$a^3 \approx \frac{G}{4\pi^2} P^2 M_{\text{Stern}}$$

Die Planeten kreisen in einem **elliptischen Orbit** (mit dem Kreis als Spezialfall mit Exzentrizität $e = 0$)

$$r(t) = \frac{a (1 - e^2)}{1 + e \cos \varphi(t)}$$

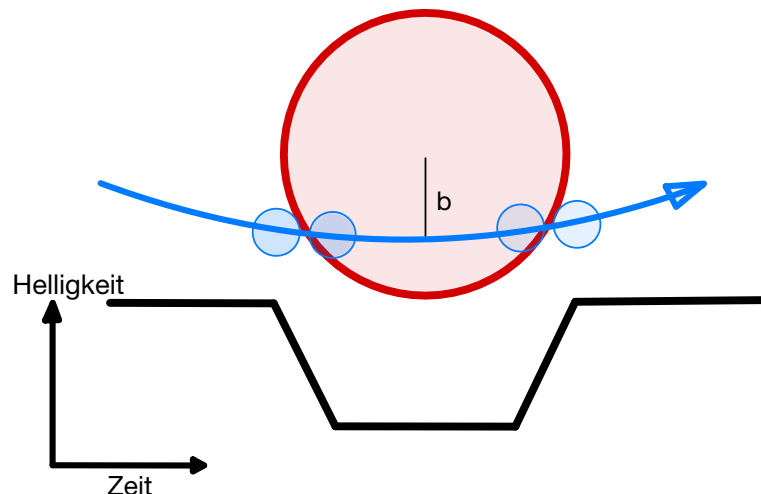
wobei $r(t)$ den Orbit in Abhängigkeit von der Zeit t , a die große Halbachse der Ellipse, e die Exzentrizität und $\varphi(t)$ den Winkel des Orbits darstellen (siehe Bild).



Die Inklination i und das Argument des Periastrons ω hängen dabei rein von der Blickrichtung des Beobachters ab.

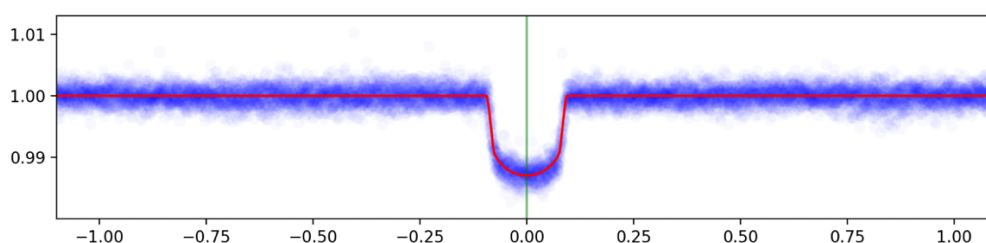
¹ Welcher Forscher hatte schon früher entdeckt, dass die Bewegung von kleinen Massen (Planet) im Gravitationsfeld (des viel massereicheren Sterns) nicht von der Masse des Planeten selbst abhängt?

Um Exo-Planeten, also Planeten außerhalb unseres Sonnensystems, zu detektieren, messen wir die kurzzeitige Abdunkelung beim Vorbeilaufen eines Planeten vor dem Stern ("**Transit**"). Dazu muss die Umlaufbahn exakt in unsere Richtung ausgerichtet sein - man sagt, die **Inklination** i muss einen Winkel von knapp unter 90 Grad haben, damit dies passiert. Der Planet läuft dann relativ gleichmäßig über die Sternoberfläche und verlässt nach einer gewissen Zeit wieder die Sternscheibe. Misst man über einen längeren Zeitraum die Helligkeit in Abhängigkeit von der Zeit eines Sterns, die sog. "**Lichtkurve**", kann man solche leichten Abdunkelungen finden.



Transit und Lichtkurve (schwarz) mit Eintritt und Austritt für einen idealisierten gleichmäßig hellen Stern. Der Impactparameter b gibt an, wie nahe der Planet dem Sternzentrum kommt.

Die **Tiefe der Abdunklung** liefert tatsächlich das Größenverhältnis zwischen Stern und Planet (R_p/R_s), je größer der Planet desto stärker die Abdunkelung. Doch selbst für die größten Planeten ist dieser Effekt sehr gering: Wenn wir zum Beispiel an Jupiter denken, der 10x kleiner als die Sonne ist, wäre die Abdunkelung dann nur 1% (da es hier um die Fläche geht), d.h. man muss sehr präzise messen!



Transit von TOI 0107 mit allen Daten aus einer Periode überlagert. Die Zeitachse gibt die Tage relativ zum Transitzeitpunkt an, die Helligkeit wurde relativ zur Grundhelligkeit des Sterns gemessen. Die Abdunklung beträgt etwas mehr als 1%.

Einen sehr wichtigen Faktor bildet die Tatsache, dass der Planet überhaupt den Stern bedeckt, diese **Wahrscheinlichkeit** hängt von der Größe des Sterns ab (je größer desto wahrscheinlicher) und vom Abstand zwischen Planet und Stern a (je weiter auseinander, desto weniger darf der Inklinationswinkel von 90 deg abweichen!). Dass es überhaupt zu einem Transit kommt, ist aber sehr unwahrscheinlich: Um irgendwann eine Bedeckung durch einen anderen Jupiter ähnlichen Planeten in der gleichen Umlaufbahn um eine andere Sonne zu finden, müsste man schon über 1000 Sterne überwachen und dies fast 12 Jahre lang! Beobachtet man kürzer muss man das Glück haben, dass während der Beobachtungsdauer auch ein solcher "Transit" stattfindet, bei langen Perioden wird dies aber immer unwahrscheinlicher.

Wo kommen die Daten her?

Wir Astrophysiker helfen dem Glück ein wenig auf die Sprünge, indem wir mit Kameras, die einen großen Himmelsbereich aufnehmen können, über einen längeren Zeitraum tausende Sterne gleichzeitig beobachten. Die NASA und das MIT haben dazu einen S

atelliten namens **TESS**² in den Orbit um die Erde gebracht, der jeweils ca. 28 Tage lang einen großen Himmelsbereich (Sektor) permanent beobachtet. Einmal pro Monat werden dann Lichtkurven von ca. 20000 Sternen auf einer Internet-Seite³ veröffentlicht.

Die Transits, die in diesen Daten gefunden werden, müssen dann aber noch durch weitere Beobachtungen verifiziert werden, um sicherzustellen, dass sie wirklich von einem Exo-Planeten verursacht wurden und nicht von etwas anderem. Sobald also in diesen Daten ein neuer Transit gefunden wird, wird es interessant und die Objekte werden dann als **TOI**, die sog. "**TESS Object of Interest**", gelistet. Gleich danach versuchen viele Observatorien auf der Welt, den Transit zu verifizieren, zumal wegen der großen Pixel von TESS (die wegen des großen Himmelsbereichs nötig sind) nicht immer klar ist, ob nicht doch ein schwächerer Nachbarstern das Signal erzeugt hat, und es sich dann vielleicht doch nur um ein Doppelsternsystem handelt.

In den letzten Jahren haben wir am Wendelstein Observatorium hunderte solcher Kandidaten (TOIs) nachbeobachtet, um den vermuteten Stern als den richtigen zu verifizieren. Über die beiden Internet-Adressen in der Fußnote findet ihr zwei unserer Lichtkurven, die mit dem 43cm Teleskop am Wendelstein aufgenommen wurden: eine Lichtkurve von TOI 1420 im infraroten Filter⁴ und die andere von TOI 1877 im roten Filter⁵. Wenn ihr die Tabellen öffnet, erscheinen die Daten

² <https://tess.mit.edu>

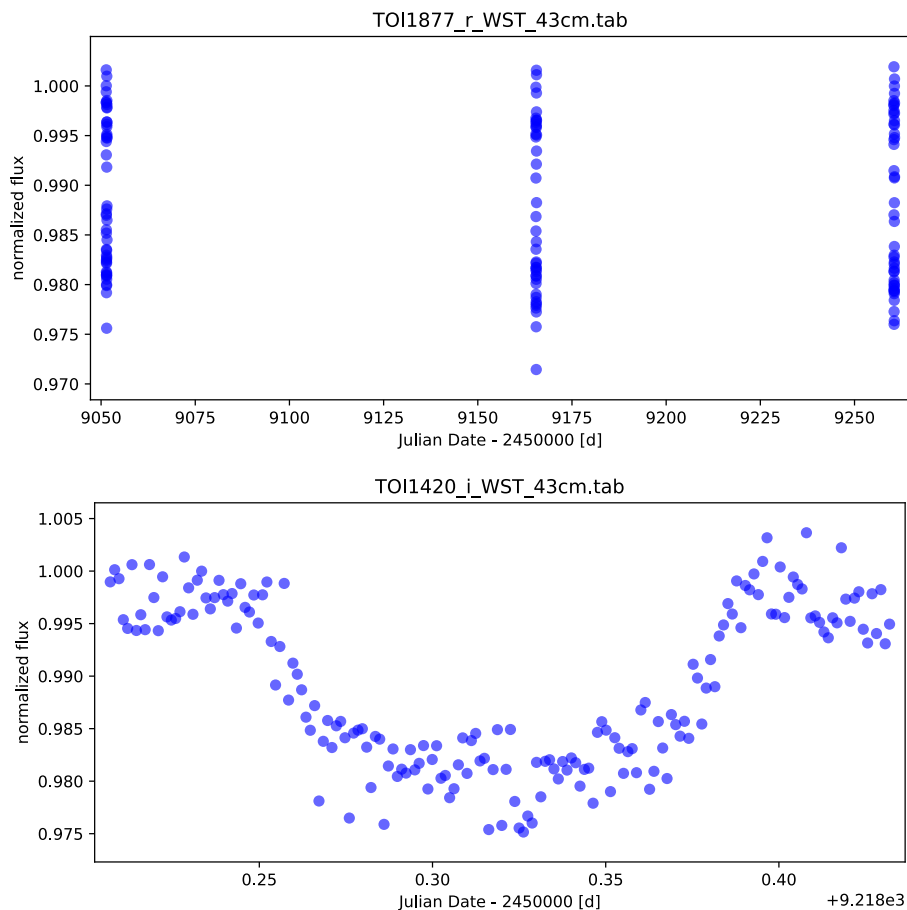
³ https://archive.stsci.edu/tess/bulk_downloads.html

⁴ https://github.com/arriusm/planet_fast_fit/blob/main/examples/TOI1420/TOI1420_i_WST_43cm.tab

⁵ https://github.com/arriusm/planet_fast_fit/blob/main/examples/TOI1877/TOI1877_r_WST_43cm.tab

in der ersten Spalte als Julianisches Datum (Tage seit einem Referenzdatum), in der zweiten als normierte Helligkeit, und in der dritten Spalte als zugehöriger Fehler der Helligkeits-Messung.

Bei TOI 1877 wurde an drei verschiedenen Nächten der Transit gemessen, bei TOI 1420 nur in einer Nacht. Diese Lichtkurven können zwar schon wissenschaftliche Ergebnisse liefern, die Periode ist aber nicht oder nicht eindeutig zu bestimmen. Deshalb sollten wir uns auch die original TESS-Daten ansehen, um die Ergebnisse zu ergänzen und zu vergleichen.



Für alle Lichtkurven, die mit TESS aufgenommen wurden, bietet das "Space Telescope Science Institute" (STScI) auf seiner Internetseite die Möglichkeit alle Daten und Lichtkurven runterzuladen⁶. Da die Download-Skripten etwas kryptisch sind, haben wir eine einfache HTML-Seite erstellt, auf der ihr die Daten von über 6000 TOIs über entsprechende Links abrufen könnt:

https://github.com/arriusm/planet_fast_fit_examples/all_TOI_lc.html

⁶ https://archive.stsci.edu/tess/bulk_downloads/bulk_downloads_ffl-tp-lc-dv.html

Am besten ladet euch die gewünschte Lichtkurve herunter, indem ihr sie unter dem dort angezeigten einfacheren Namen speichert. Das ermöglicht einen besseren Überblick bei vielen Lichtkurven.

Wie analysieren wir die Daten?

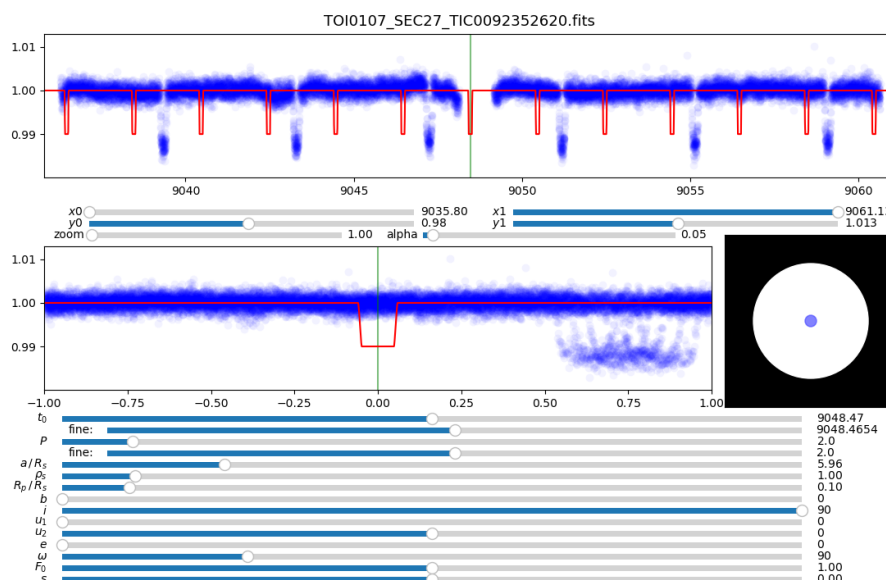
Vor 60 Jahren konnte man sich die Arbeit eines Astrophysikers, um Daten zu analysieren, noch am Schreibtisch mit Papier und Bleistift vorstellen. Heute lässt sich die Analyse mit Hilfe von Computerprogrammen nicht mehr wegdenken. Viele Wissenschaftler benutzen eine auch an Schulen gebräuchliche **Programmiersprache Python**, die besonders durch ihre vielen Bibliotheken die nötigen Berechnungen vereinfacht. So benutzen wir zur Analyse von Planeten-Lichtkurven z.B. folgende 5 Bibliotheken: *numpy*⁷, *matplotlib*⁸, *argparse*⁹, *astropy*¹⁰ und *batman*¹¹. Die Bibliothek "*batman*" ermöglicht dabei sehr genaue Vorhersagen, wie ein Transit in Abhängigkeit des elliptischen Planetenorbits aussehen muss. Im Anhang findet ihr Hinweise, wie ihr *Python* und die Bibliotheken auf eurem Computer installiert.

Damit ihr eure Lichtkurven analysieren könnt, haben wir für euch ein *Python*-Programm vorbereitet, mit dem ihr interaktiv die Lichtkurven vermessen könnt:

https://github.com/arriusm/planet_fast_fit
`planet_fast_fit.py`

Mit dem hinterlegten *Python*-Programm könnt ihr euch diese Lichtkurven anzeigen lassen und mit einem eigenen Model selbst versuchen, die Parameter anzugleichen, z.B. den TOI 107 der in den Daten von Sector 27 zu finden ist:

```
python planet_fast_fit.py TOI0107_TIC0092352620_SEC27.fits
```



⁷ <https://numpy.org/>

⁸ <https://matplotlib.org/>

⁹ <https://docs.python.org/3/library/argparse.html>

¹⁰ <https://www.astropy.org/>

¹¹ <https://lkreidberg.github.io/batman/docs/html/index.html>

Ihr könnt zu diesem Zweck die 'Schieberegler' verschieben und damit die vorhergesagte Transit-Lichtkurve an die beobachteten Daten angleichen.

Am schnellsten könnt ihr einen **Transitzeitpunkt** t_0 sehr präzise bestimmen (mehrere sind möglich).

Außerdem werdet ihr sehen, dass die **Periode** auch sehr leicht zu bestimmen ist. So lässt sich für TOI 1877 die Periode durch die viel größere Zeitspanne der drei Beobachtungen am Wendelstein, die mehr als hundert Tage auseinanderliegen, besser bestimmen, wenn man als Anfangswert die mit TESS-Daten gefundene Periode annimmt und dann die Periode fein verstellt.

Anhand der Lichtkurve kann man sehr gut messen, wieviel Zeit der Planet braucht, um über den Stern zu fliegen. Teilt man die Periode durch diese Zeitabschnitte ergibt sich der Umfang und damit auch der **Abstand zw. Stern und Planet** jedoch nur in Einheiten des Sternradius a/R_s .

Das geht aber nur, wenn wir wissen, an welcher Sekante ('**Impaktparameter**' b) der Planet über den Stern gelaufen ist, da davon auch die Dauer des Transits abhängt. Hier helfen sich die Forscher mit ihrer Kenntnis wie die **Mitte-Rand-Verdunkelung** des Sterns aussieht: Dies beeinflusst insbesondere die Form der Flanken in der Lichtkurve im Eintritt und Austritt, also jenes Zeitpunktes, wenn der Planet über den Rand des Sternes zieht.

Die **Form des Eintritts und Austritts** hängt auch von anderen Parametern ab, so z.B. auch vom Helligkeitsverlauf des Sterns, der sog. Mitte-Rand-Verdunkelung (auch 'limb darkening'). Es zeigt sich, dass dieser Verlauf sehr gut mit einem Polynom zweiten Grades angepasst werden kann, also mit zwei Parametern variiert werden kann (u_1 , u_2), die das radiale Helligkeitsprofil des Sterns parametrisieren. Damit kann der Impaktparameter abgeschätzt und das Verhältnis der Halbachse der Planetenbahn zum Sternradius a/R_s ermittelt werden.

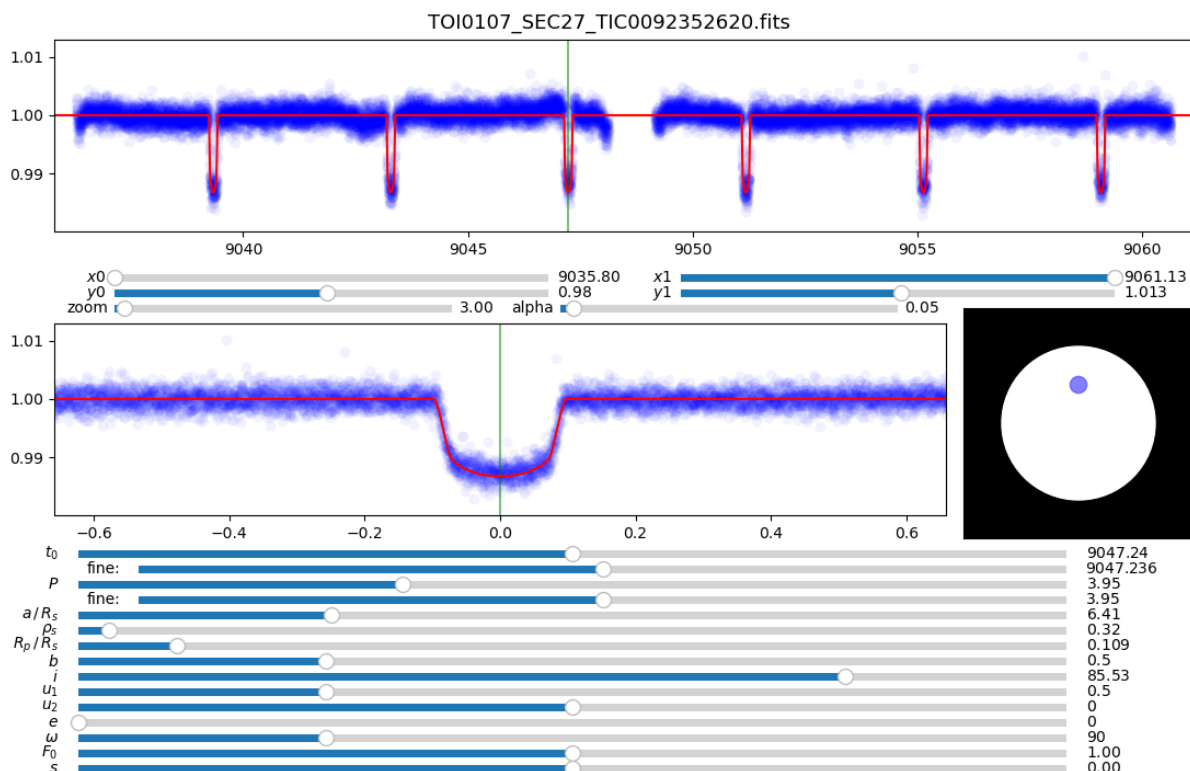
Natürlich spielt auch eine Rolle, wie **elliptisch** die Planetenbahn um den Stern herum ist (Exzentrizität e) und wie diese Ellipse von uns aus gesehen ausgerichtet ist (Parameter ω), z.B. ob wir den Transit eher im Periastron (= Punkt auf der Planetenbahn, der dem Stern am nächsten liegt) oder im Apoastron (= Punkt auf der Planetenbahn, der am weitesten vom Stern weg ist) oder irgendwo dazwischen beobachten: laut dem 2. Keplerschen Gesetz ändert dies die Geschwindigkeit mit der Planet scheinbar über den Stern hinweg wandert und dies verändert die Dauer des Transits. Für unsere Abschätzungen hier nehmen wir als ersten Ansatz immer einen kreisförmigen Orbit, doch wir wissen auch, dass die Exzentrizität einiges verändern kann.

Mit den **Parametern** t_0 , s und F_0 lässt sich das Model in x und y Richtung verschieben und auch etwas skalieren.

Man kann sich überlegen, dass die Kenntnis von a/R_s zusammen mit der Periode P die **mittlere Dichte des Sterns** (bei Vernachlässigung der Planetenmasse) festlegt, wenn man das 3. Keplergesetz (wie oben) benutzt. Die mittlere Sterndichte ist also das Verbindungsglied zwischen Periode und relativer Bahnachse a/R_s .

Wie können Informationen zum Stern helfen und wo finden wir diese Informationen?

Deshalb kann für den Impaktparameter die Kenntnis der Dichte des Muttersterns umgekehrt auch für den Impaktparameter weiterhelfen. Bei TOI 0107 (TIC 92352620) ist die Dichte 0.32 g/cm^2 im TIC-Katalog¹², was in unserem *Python*-Programm den Impaktparameter relativ gut festlegt. Bedenkt aber, dass dieser Wert fehlerbehaftet ist!



Hier zeigen wir euch, wo ihr die Daten findet und wie ihr für jeden Stern mit einer TIC-Nummer die verfügbaren Informationen des Sterns bekommt, denn die Sternparameter (Radius, Masse) sind entscheidend, um dann die Parameter des umkreisenden Exo-Planeten herauszufinden:

¹² <https://exofop.ipac.caltech.edu/tess/target.php?id=92352620>

<https://exofop.ipac.caltech.edu/tess>

Besonders interessieren uns auf dieser Seite die *Stellar Parameters* der *Radius* (R_{Sun}), die *Mass* (M_{Sun}) und die *Density* (g/cm^3) mit ihren Fehlern (\pm). Bei den Fehlern sollte beachtet werden, dass diese Parameter nicht beliebig genau bestimmt worden sind: Radius 3-10 %, Masse 10-15 %, Dichte 15-25 %. Mit diesen Angaben kann nun auch der **Radius des Planeten im Verhältnis zum Sternradius** (R_p/R_s) relativ präzise gefunden werden¹³.

Aufgabenstellung

Mit den Wendelstein-Daten und den TESS-Daten von TOI 1877 und TOI 1420 sollt ihr die optimalen Parameter bestmöglich annähern. Manche Parameter sind abhängig von anderen (welche?), man nennt diese entartet. Versucht auch die möglichen Ungenauigkeiten herauszufinden und diese zu diskutieren. Wie unterscheiden sich die Messungen zwischen TESS-Daten und Wendelstein?

Sucht euch auch mind. zwei weitere Planetenkandidaten eurer Wahl aus der TESS-Liste und findet die Parameter heraus!

Doch wie bekommen wir die Masse des Planeten?

Hier nutzen wir die gegenseitige Beeinflussung von Stern und Planet. Denn nicht nur der Planet kreist um den Stern, aber auch der Stern kreist um den gemeinsamen Schwerpunkt. Durch die viel größere Masse des Sterns wackelt dieser aber nur hin und her, immer im entgegengesetzt zum Planeten.

Diese Bewegung können wir tatsächlich durch den **Dopplereffekt** messen: Spektrallinien die an ganz bestimmten Stellen im Spektrum eines Sterns auftreten verschieben sich nämlich, wenn der Stern seine Bewegung ändert: bewegt er sich auf uns zu, sind sie blauverschoben, entfernt sich der Stern von uns, wandern sie in die rötliche Richtung, sprich es vergrößert sich die Wellenlänge. Wenn man einen Stern also längere Zeit beobachtet und diese Verschiebungen in dessen Spektrum misst, kann man herausfinden, wie sich dieser Stern relativ zu uns bewegt. Daraus lässt sich dann auf die Existenz eines oder mehrerer Planeten schließen. Diese Methode nennt man **Radialgeschwindigkeitsmethode** (RV-Methode). Da selbst große eng umlaufende Planeten bestenfalls ein Wackeln von nur wenigen Hundert Meter pro Sekunde verursachen, verschiebt sich die Wellenlänge auch nur um einen winzigen Bruchteil, genauer, um das Verhältnis

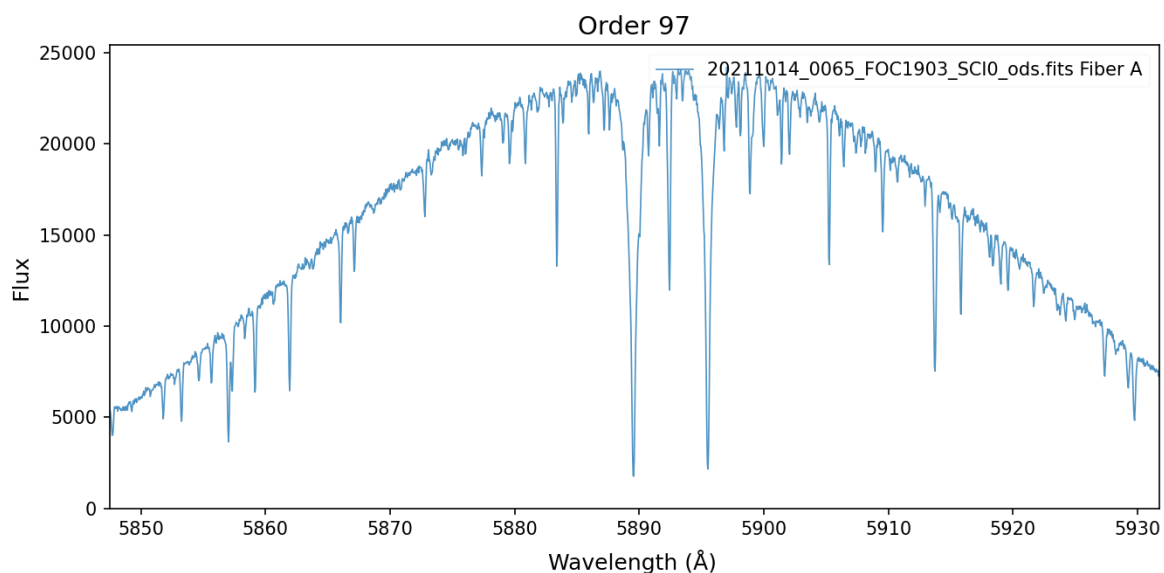
¹³ Die Parameter im Programm können auch über Optionen direkt angegeben werden, z.B.
`python planet_transit_fit_by_eye.py -rhostar 0.32 -P 3.9502 -t0 9047.236 -b 0.5 -rp 0.109 -u1 0.5 -zoom 3 -alpha 0.05 -save TOI0107_SEC27.pdf TOI0107_SEC27_TIC0092352620.fits`

zwischen dieser Geschwindigkeit und Lichtgeschwindigkeit, also um weniger als ein 3 Millionstel.

Wie kann eine solche Verschiebung gemessen werden, wenn sich die Auflösung der besten Spektrographen nur im Bereich von $1/100.000$ bewegt¹⁴? Es helfen zwei Dinge: einerseits ist das Zentrum einer Linie deutlich besser definiert, als es die Breite der Linie annehmen ließe, andererseits können viele Linien gemeinsam verwendet werden, um die Verschiebung zu messen, was die Genauigkeit stark verbessert.

Am Beispiel des Sterns 51 Pegasi können wir selbst die Messung der Parameter ausprobieren. Es handelt sich hierbei um einen sonnenähnlichen Stern mit 1,12 Sonnenmassen, der 50,6 Lichtjahre von der Erde entfernt im Sternbild Pegasus liegt. Er war der erste Hauptreihenstern (Stern mit Wasserstoffbrennen im Zentrum), bei dem 1995 von Michel Mayor and Didier Queloz ein Exoplanet gefunden wurde. 2019 bekamen beide für ihre Entdeckung den Nobelpreis für Physik. Der Planet selbst wird als zweites Objekt (neben dem Stern) 51 Peg b oder "Dimidium" genannt.

Im folgenden Bild sehen wir einen kleinen Teil des Spektrums des Sterns 51 Peg, das mit dem Wendelstein 2.1 m Teleskop aufgenommen wurde. Auffällig ist die Natrium-D-Linie (sie wurde im Jahr 1814 von Joseph von Fraunhofer mit "D" bezeichnet), die ein Dublett (2 Linien) bei den Wellenlängen 589,0 nm und 589,6 nm bildet. Bei einer Bewegungsänderung des Sterns von 120 m/s bewegen sich die Linien um ca. zwei Zehntausendstel Nanometer (0,0002 nm) in ihrer Wellenlänge hin und her, was in dieser Grafik gar nicht sichtbar wäre!



Da 51Peg eines unserer Referenzobjekte am Wendelstein-Observatorium ist, haben wir es schon in vielen Nächten aufgenommen. Unter folgendem Link

¹⁴ Am Wendelstein Observatorium beträgt die Genauigkeit $1/R=1/70000$.

findet ihr eine Tabelle mit Messungen aus 14 Nächten zwischen 9.10.2021 und 14.11.2021.

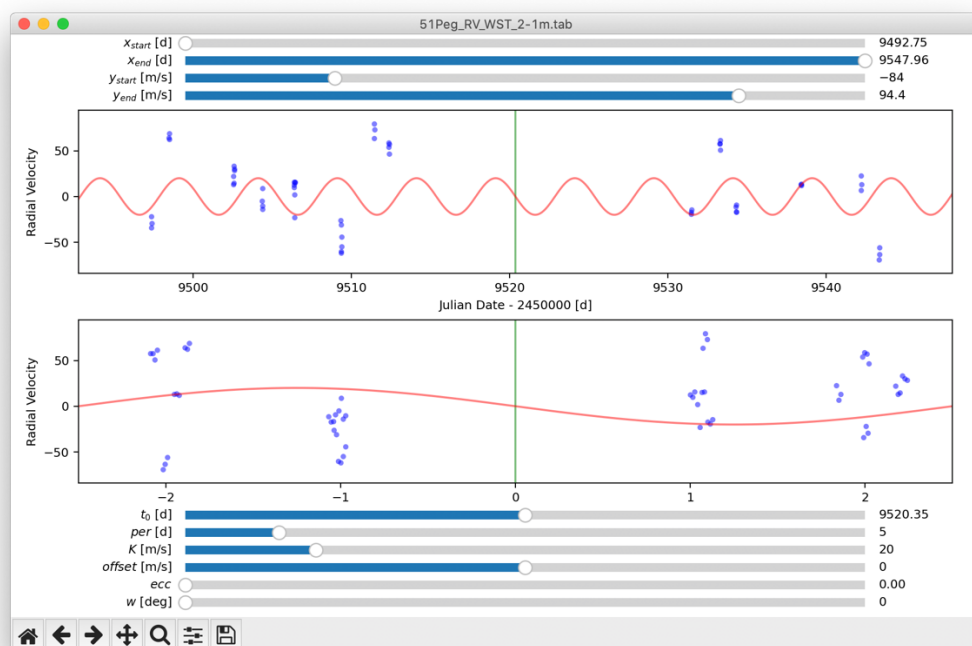
https://github.com/arriusm/planet_fast_fit
examples/51Peg/51Peg_RV_MaHPS.dat

Wir haben wieder ein *Python*-Programm vorbereitet, das euch ermöglicht die Daten anzuzeigen und zu analysieren¹⁵. Diesmal benötigt ihr die *Python*-Bibliothek *radvel*¹⁶ um Modelle für die Radialgeschwindigkeit ("radial velocity") anzuzeigen.

Aufrufen könnt ihr das Programm mit folgendem Befehl:

```
python planet_fast_fit.py -rv 51Peg_RV_MaHPS.dat
```

In der oberen Grafik zeigen wir die gesamte RV-Kurve, in der darunter liegenden, die periodengerecht zugeschnittene Kurve, d.h. Zeitpunkte gleicher Phase erscheinen übereinander.



Die entscheidende Messgröße ist K , die Amplitude der Radialgeschwindigkeit. Man kann berechnen, dass sie von der Masse des Planeten abhängig ist:

¹⁵ https://github.com/arriusm/planet_fast_fit/blob/main/planet_fast_fit.py

¹⁶ <https://radvel.readthedocs.io/en/latest/>

$$K \approx \sin(i) \frac{M_{\text{Planet}}}{M_{\text{Stern}}} \left(\frac{2\pi G M_{\text{Stern}}}{P} \right)^{1/3} \frac{1}{\sqrt{1 - \epsilon^2}}$$

Da wir aber bei Sternen, die keinen direkten Transit zeigen, die Inklination i nicht kennen, kann dadurch die Masse des Planeten nur mit einem Vorfaktor " $\sin(i)$ " bestimmt werden.

Aufgabenstellung:

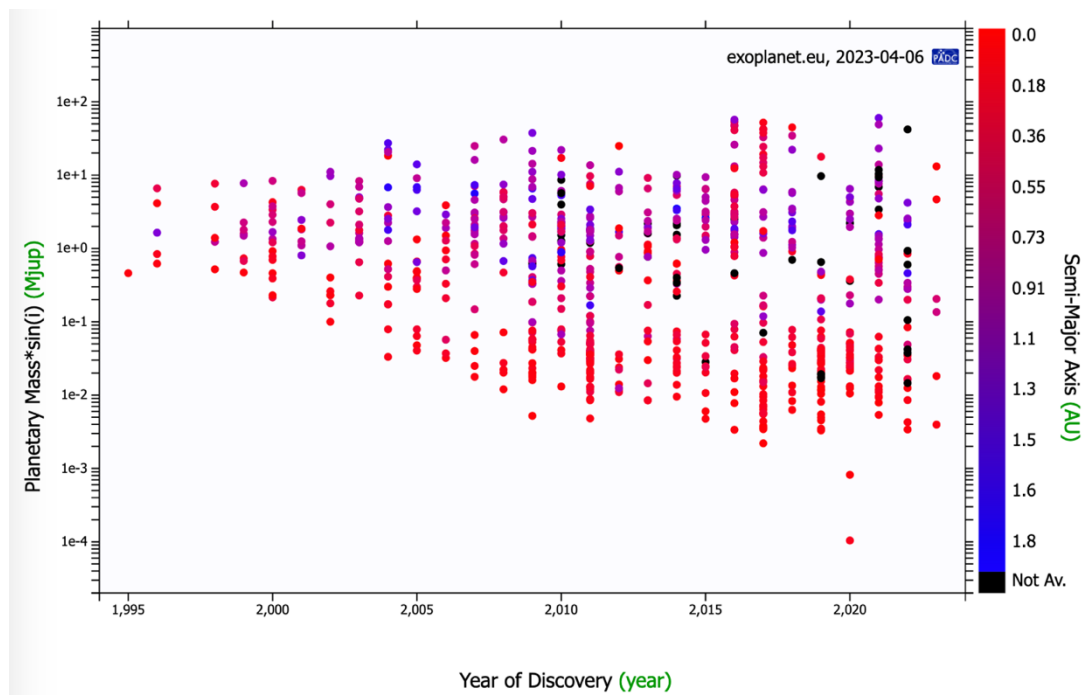
Versucht den Wert für $M_{\text{Planet}} \sin(i)$ für 51 Peg b zu bestimmen. Welchem Planeten unseres Sonnensystem ist 51 Peg b am ähnlichsten, wenn man eine Inklination grösser als 45° annimmt. In welchem Abstand kreist der Planet um den Stern 51 Peg?

Informationen zu allen Exoplaneten

Auf der Internet-Seite

<http://exoplanet.eu>

könnt ihr euch einen Überblick verschaffen, wann welche Planeten mit den unterschiedlichsten Methoden entdeckt worden sind. Hier ein Überblick über die entdeckten Planeten.



Wo finden wir 51 Peg?

Heute zählt es zum Standardverfahren, Transit-Entdeckungen nachträglich mit der RV-Methode zu analysieren und damit die wichtigsten Planeten-Parameter zu messen!

Anhang

Es gibt verschiedene frei verfügbare Distributionen für die Programmiersprache *Python*. Bei allen kann man einzelne Bibliotheken dazu installieren. Lasst euch am besten von einem Lehrer:in dabei helfen...

Conda

<https://conda.io/projects/conda/en/stable/user-guide/install/index.html>

Anaconda: <https://www.anaconda.com/products/distribution>

Miniconda: <https://docs.conda.io/en/latest/miniconda.html>

```
conda install numpy
conda install matplotlib
conda install astropy
pip3 install argparse
pip3 install batman-package
pip3 install h5py
pip3 install celerite
pip3 install radvel
python3
```

python.org

<https://www.python.org/downloads>

```
pip3 install numpy
pip3 install matplotlib
pip3 install astropy
pip3 install argparse
pip3 install batman-package
pip3 install h5py
pip3 install celerite
pip3 install radvel
python3
```

h5py und *celerite* werden für *radvel* benötigt. Alle Bibliotheken werden hier in ein bestimmtes Verzeichnis heruntergeladen und installiert¹⁷.

¹⁷ z.B. auf einem macOS Betriebssystem in

~/miniconda3/lib/python3.10/site-packages oder
/Library/Frameworks/Python.framework/Versions/3.11/lib/python3.11/site-packages

Direkte Installation von python miniconda3 auf Windows

(ohne WSL und Linux)
getestet mit Windows 11

i) miniconda3 Installation:

In einer "Windows PowerShell" im home-Verzeichnis die neueste miniconda python 3.11 Version runterladen

```
curl https://repo.anaconda.com/miniconda/Miniconda3-py311\_24.11.1-0-Windows-x86\_64.exe -o miniconda.exe
```

und installieren

```
Start-Process -FilePath ".\miniconda.exe" -ArgumentList "/S" -Wait
```

Infos dazu findet man auf:

<https://docs.anaconda.com/miniconda/install/#quick-command-line-install>

Danach ist im Startmenu ein "Anaconda Powershell Prompt (miniconda3)" zu finden, das geöffnet werden muss.

Da sollte schon mal die simple Version von python laufen, einfach mal "python" eingeben und mit "exit()" wieder raus.

ii) Compiler:

Dann kommt eine wichtige Sache: um bestimmte Bibliotheken zu installieren, braucht es einen Compiler und einige Tools:

Die findet man unter

<https://visualstudio.microsoft.com/de/visual-cpp-build-tools>

mit dem

Visual Studio Installer, folgendes installiert,
z.B. sind da die "python native" Pakete dabei.

1)

Visual Studio Build Tools 2022

Vers. 17.12.3

2)

Visual Studio Community 2022 (2) 417 Pakete!!

Vers. 17.12.3

iii) python Bibliotheken

Nach der Installation der Compiler, dann besser nochmal die "Anaconda Powershell Prompt (miniconda3)" neu öffnen und dann mit pip die nötige Bibliotheken installieren:

```
pip install h5py
pip install celerite
pip install radvel
pip install windows-curses
pip install batman-package
```

```
Dann in python
import radvel
und
import batman
```