Dissertation

submitted to the

Combined Faculties of the Natural Sciences and Mathematics

of the Ruperto-Carola-University of Heidelberg. Germany

for the degree of

Doctor of Natural Sciences

Put forward by

Diana Elizabeth Kossakowska

born in Fremont, CA, USA

Oral examination: July 8, 2020

MODELING AND DETERMINING ORIGINS OF SIGNALS FOUND IN RADIAL VELOCITY DATA

Referees:

Prof. Dr. Thomas Henning

PD Dr. Sabine Reffert

Abstract

Thanks to the current *TESS* space mission, the number of exoplanets with both precise radius and mass measurements is continually growing, providing more promising candidates for the next era in the exoplanet field of atmosphere characterization. A key ingredient is to understand all the signals that appear in the data, to ensure that we obtain the correct planetary parameters. I was involved in developing the `juliet` package, which allows for easy model comparison between models of combined transit and radial velocity datasets. The methodology is based on modern statistical concepts, such as Bayesian statistics, Nested Sampling, and Gaussian Processes, which are presently gaining popularity among the community. Within the CARMENES consortium, I was heavily engaged in demonstrating how to construct the appropriate models and also how to interpret the results. Hence, for this thesis, I present a guideline on how to build an intuition using this code, covering the small nuances and common misconceptions.

I employed `juliet` on a variety of planets/systems: TOI-150 b, one of the most eccentric transiting hot Jupiters known to date whose obliquity can be measured; TOI-163 b, another hot Jupiter with an inflated radius ideal for future atmospheric characterization in the *JWST* continuous viewing zone; TOI-1201 b, currently one of the most optimal transiting mini-Neptunes for atmospheric characterization to aid in determining the origins of these planets; and AD Leo, a case study of a highly-active star that continues to puzzle how stellar activity influences radial velocity measurements as it often masquerades as a planet. These projects showcase the wide application of the code as well as the importance of implementing the correct methodology to contribute well-constrained planetary parameters. To end the thesis, I discuss the need for a better understanding of how stellar activity affects radial velocities to better mitigate the effects, and as well I urge the community to take a standardized approach for modeling in order to avoid misleading interpretations.

Zusammenfassung

Dank der aktuellen Weltraummission *TESS* wächst die Zahl der Exoplaneten mit präzisen Radius- und Massenmessungen kontinuierlich an und liefert viele weitere vielversprechende Kandidaten für die kommende Ära im Bereich der Atmosphärencharakterisierung von Exoplaneten. Ein wichtiger Bestandteil ist dabei ein tiefgehendes Verständnis aller Signale, die in den Daten auftauchen, um sicherzustellen, dass wir die richtigen Planetenparameter bestimmen. Ich war an der Entwicklung des `juliet`-Pakets beteiligt, das einen einfachen Vergleich zwischen verschiedenen Modellen für kombinierte Transit- und Radialgeschwindigkeitsdatensätze ermöglicht. Die Methodik basiert sich auf modernen statistischen Konzepten wie Bayessche Statistik, Nested Sampling und Gaußschen Prozessen, die alle derzeit in der Fachwelt an Popularität gewinnen. Innerhalb des CARMENES-Konsortiums war ich in diesem Zusammenhang maÃgeblich daran beteiligt anderen zu erklären, wie man die entsprechenden Modelle konstruiert und wie man die Ergebnisse interpretiert. Daher präsentiere ich in dieser Arbeit einen Leitfaden der helfen soll eine Intuition für den Code zu bekommen und der all die kleinen Feinheiten und häufigen Missverständnisse abdeckt.

Ich habe `juliet` für die Charakterisierung einer Vielzahl von Planetensystem eingesetzt: TOI-150 b, einer der exzentrischsten transitierenden heißen Jupiter, der bisher bekannt ist und dessen Achsneigung gemessen werden kann; TOI-163 b, ein weiterer heißer Jupiter auf

einer kreisförmigen Umlaufbahn und mit einem aufgeblähten Radius, der ideal ist für die zukünftige atmosphärische Charakterisierung in der CVZ von *JWST*; TOI-1201 b, derzeit einer der am besten zur atmosphärischen Charakterisierung geeignetsten transistierenden Mini-Neptune, der dabei helfen kann die Herkunft dieser Planeten weiter zu untersuchen; und AD Leo, eine umfangreiche Fallstudie eines hochaktiven Sterns, die sich mit dem Rätsel beschäftigt, wie stellare Aktivität in den Radialgeschwindigkeitsmessungen Signale planetarischen Ursprungs vortäuschen kann. Diese Projekte zeigen sowohl die breite Anwendung der Software als auch die Wichtigkeit eine korrekte Methodik zu implementieren, um präzise Planetenparameter zu erhalten. Zum Abschluss der Arbeit diskutiere ich die Notwendigkeit eines besseren Verständnisses darüber wie stellare Aktivität Radialgeschwindigkeiten beeinflusst, um so den Einfluss besser korrigieren zu können. Weiterhin fordere ich dazu auf, mehr Fokus auf einen standardisierten Ansatz für die Modellierung zu legen um so irreführende Interpretationen zu vermeiden.

Contents

List of Figures