

## Alien Skies: Wie sehen Sterne & Planeten aus?

### PHOENIX radiative transfer simulations for stellar and planetary atmospheres

*P. Hauschildt, Hamburger Sternwarte, Universität Hamburg*

#### Kurzgefasst

- In den nächsten Jahren wird eine neue Generation von Teleskopen (z.B., E-ELT und JWST) den Betrieb aufnehmen und Spektren und Bilder von bisher unbekannter Qualität aufnehmen.
- Die detaillierte Analyse dieser Daten mit PHOENIX liefert die physikalischen Bedingungen (Temperaturen, Drücke) und die chemische Zusammensetzung der Stern- und Planetenatmosphären.
- Dazu werden sehr detaillierte Modelle von Sternatmosphären benötigt um die extrem gute Daten angemessen auswerten zu können.
- Physikalisch/mathematisch gleichwertig ist die Modellierung von stark beleuchteten Begleitern in engen Doppelsternsystemen, aber es gibt schon jetzt viel mehr exzellente Beobachtungen dieser Systeme als von Exoplaneten möglich sind.
- Dabei ist besonders 3D Strahlungstransport extrem komplex und rechentechnisch sehr aufwendig. Eine typische Simulation auf dem HLRN-III verwendet 36.000 Kerne über mehrere Monate, dabei werden bis 50 PB Daten generiert von denen zur Zeit nur ca. 1TB permanent gespeichert werden können.
- Ein Ergebnis der Simulationen sind berechnete Bilder von extrasolaren Planeten und aktiven Sternen die uns "alien skies" zeigen.

In den letzten 2 Jahrzehnten wurden tausende von Planeten ausserhalb unseres Sonnensystems entdeckt. Mit den größten Teleskopen (auf der Erde und im Weltraum) werden die Atmosphären dieser Exo-Planeten beobachtet werden können. Dabei werden heute Spektren des ausgesandten Lichtes über einen großen Wellenlängenbereich gemessen. In der nahen Zukunft werden durch neue Teleskope und Beobachtungsverfahren auch echte Bilder von Planeten gemacht werden können. Das große Problem bei diesen Beobachtungen ist der Elterntern der Planeten der 10 000 bis 1 Million mal heller als der Planet ist. Daher werden zur Beobachtung spezielle Techniken benötigt und es können bisher nur wenige Planeten detailliert beobachtet werden. Mit einer detaillierten Analyse dieser Daten kann

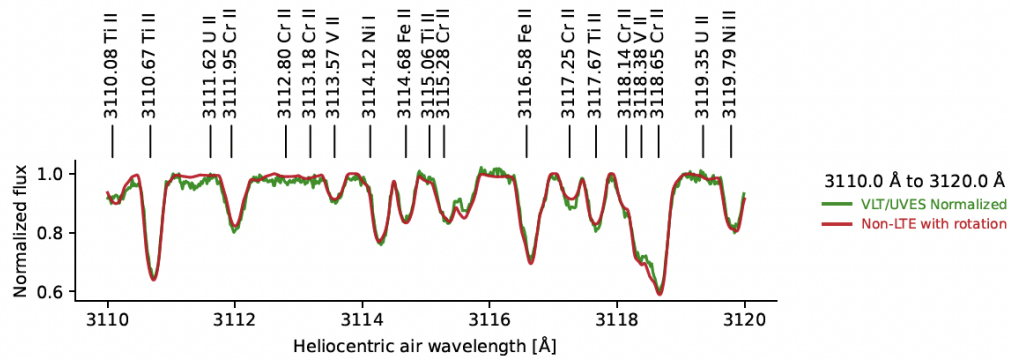
man die physikalischen Bedingungen (Temperaturen, Drücke) und die chemische Zusammensetzung der Stern- und Planetenatmosphären bestimmen (und vielleicht sogar Biomarker entdecken). Ein genaues Verständnis der Physik der Atmosphären und ihrer Lichtemission ist aber auch für die Entwicklung von neuen Beobachtungsmethoden notwendig (z.B., um vorhersagen zu können bei welchen Wellenlängen man Erdähnliche Planeten am besten beobachten kann).

Gleichzeitig werden auch immer bessere Spektren von Sternen aufgezeichnet. Damit diese hervorragenden Daten angemessen analysiert werden können sind sehr detaillierte Modelle der Sternatmosphären und Spektren, unter Einbeziehung von Abweichungen vom thermodynamischen Gleichgewicht (sog. NLTE Modelle), notwendig. In einem Teilprojekt wird mit Hilfe eines sehr detaillierten Modells die Verteilung der Elemente im hellen Stern Sirius untersucht (geleitet von Prof. J. Aufdenberg, ERAU, USA).

Unser Projekt simuliert die Bilder und Spektren von Planeten und Sternen und ermöglicht dadurch die Bestimmung ihrer physikalischen Parameter. Dazu entwickeln wir seit 1991 das Modellatmosphären Programmpaket PHOENIX. Damit können sowohl 1D (Kugel-Symmetrische) als auch 3D Modelle der Atmosphären und Spektren für fast alle Typen von Sternen und Exo-Planeten sehr detailliert simuliert werden. In der neuesten Version von PHOENIX sind die aktuellsten Daten (2019) von Atomen und Molekülen verfügbar. Die von uns verwendeten Algorithmen sind so entwickelt das diese insgesamt über 250 GB grossen Datenbanken in ihrer Gesamtheit für detaillierte Modellrechnungen verwendet werden können.

Bei 3D Modellen ist der Bedarf an Hauptspeicher, Festplattenplatz und Rechenzeit so gewaltig das diese Rechnungen nur auf den leistungsfähigsten Supercomputern machbar sind. Das PHOENIX Programmpaket ist dafür ausgelegt möglichst viele verschiedene Atmosphärentypen zu simulieren, dadurch wird die Entwicklung insgesamt effizienter und die verschiedenen Module von PHOENIX können unter sehr unterschiedlichen Bedingungen verifiziert werden.

Für unsere Simulationen ist es notwendig den Aufbau der Atmosphäre zusammen mit dem chemischen Gleichgewicht und dem Transport von Licht bei sehr vielen verschiedenen Wellenlängen zu berechnen. Dabei ist besonders der 3D Strahlungstransport extrem komplex und rechenaufwendig auf-



**Abbildung 1:** Beispiel für ein hochaufgelöstes Spektrum von Sirius im Vergleich mit Modellen. Neue Versio, Original aus: 'A massively non-LTE model atmosphere for Sirius A', Aufdenberg, Jason P.; Acosta, Allison; Hauschildt, Peter, June 2019, in American Astronomical Society Meeting #234, id. 108.02. Bulletin of the American Astronomical Society, Vol. 51, No. 4, Bibcode: 2019AAS...23410802A.

wendig da er die Lösung von mathematisch 6-dimensionalen Gleichungen erfordert und spezielle Methoden zur genauen Behandlung von Lichtstreuung in der Atmosphären notwendig sind. Bei Planeten muss die Einstrahlung durch den Elternstern modelliert werden, durch sie können sich die Temperaturen auf der "Tagseite" des Planeten um einige 1000 C erhöhen. Das 3D Strahlungstransport Modul benötigt als Grundlage eine Beschreibung der Wechselwirkung der atmosphärischen Gase mit dem Licht, dabei berücksichtigen wir bis zu 1 Milliarde individuelle Übergänge in Atomen und Molekülen. Diese bilden oft stark überlappende Bandensysteme die das emittierte Licht beeinflussen. Erschwerend kommt hinzu das die Berechnungen oft berücksichtigen müssen, das sich das Licht und die Komponenten des Gases nicht im Gleichgewicht befinden ("NLTE Bedingungen"). Daher müssen die Modelle iterativ berechnet werden was die Rechenzeit um einen Faktor 50 und den Speicherbedarf um einen Faktor 100 im Vergleich zu Gleichgewichtsmodellen erhöht.

Der Vergleich der simulierten Spektren mit den Beobachtungen erlaubt die chemische Analyse der Atmosphären. Als Ergebnis unserer Simulationen erhalten wir nicht nur genaue Information über den Energiefluß innerhalb der Atmosphären und ihre Zusammensetzung sondern auch detaillierte Bilder für eine Vielzahl von Wellenlängen und Betrachtungsrichtungen (siehe auch Figur 1). Diese Bilder könnten direkt mit beobachteten Bildern verglichen werden ... allerdings gibt es Teleskope die so etwas können noch nicht! Mit sich im Bau befindlichen Geräten wie dem E-ELT (das "European Extremely-Large Telescope" in Chile mit einem Durchmesser des Hauptspiegels von 40m) wird man in den nächsten Jahren diesem Ziel sehr viel näher kommen.

Unser Simulationsprogramm PHOENIX ist durch die hohen Simulationsanforderungen sehr umfangreich (ca. 1.6 Million Zeilen Fortran 2008, C++ und C) und komplex. Wir haben es mit MPI (ca. 22000 MPI Aufrufe), OpenMP und OpenACC parallelisiert und arbeiten zur Zeit an zusätzlichen Algorithmen für die nächste Generation von Supercomputern. Um eine 3D NLTE Simulation auf dem HLRN durchführen zu können werden mindestens 36000 Kerne über mehrere Monate benötigt, dabei wird durch eine hierarchische Parallelisierung eine Gebietszerlegung im Raum mit einer Gebietszerlegung der Lichtwellenlängen kombiniert. Während einer kompletten Simulation werden ca. 100-500 PB Daten generiert von denen zur Zeit nur ca. 1TB permanent gespeichert werden können. Im Vergleich dazu sind selbst detaillierte 1D NLTE Modelle deutlich günstiger: Unser Referenzmodell für Sirius mit 388 NLTE Ionen (37282 Energieniveaus und 1019706 NLTE Spektrallinien mit 3343672 Wellenlaengenpunkten) braucht mit 1280 MPI processes und 2 OpenMP threads/Prozess insgesamt ca. 4.1 GB/Prozess und 30 ksec Laufzeit für 50 Modelliterationen auf dem aktuellen HLRN-IV System in Göttingen.

## WWW

<https://www.physik.uni-hamburg.de/en/hs/group-hauschildt.html>

## Weitere Informationen

- [1] Yun He, Brandon Cook, Jack Deslippe, Brian Friesen, Richard Gerber, Rebecca Hartman-Baker, Alice Koniges, Thorsten Kurth, Stephen Leak, Woo-Sun Yang, Zhengji Zhao, Eddie Baron, and Hauschildt, P.H., 2017, Preparing NERSC users for Cori, a Cray XC40 system

with Intel many integrated cores, in *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 30:e4291, DOI: 10.1002/cpe.4291.

- [2] White, J. A., Aufdenberg, J., Boley, A. C., Hauschildt, P.H., Hughes, M., Matthews, B. and Wilner, D.: 2018, MESAS: Measuring the Emission of Stellar Atmospheres at Submillimeter/millimeter Wavelengths, *ApJ*, 859, 102. DOI: 10.3847/1538-4357/aac103.
- [3] Peacock, S., Barman, T., Shkolnik, E. L., Hauschildt, P.H., and Baron, E.: 2019, Predicting the extreme ultraviolet radiation environment of exoplanets around low-mass stars: The Trappist-1 system. *ApJ*, 871, 235. DOI: 10.3847/1538-4357/aaf891.
- [4] J. A. White, J. Aufdenberg, A. C. Boley, M. Devlin, S. Dicker, Hauschildt, P.H., A. G. Hughes, A. M. Hughes, B. Mason, B. Matthews, A. Moor, T. Mroczkowski, C. Romero, J. Sievers, S. Stanchfield, F. Tapia, and D. Wilner: 2019, The MESAS Project: Long wavelength follow-up observations of Sirius A, *ApJ*, 875, 55. DOI: 10.3847/1538-4357/ab0e7f.

#### Projektpartner

Prof. E. Baron (Univ. of Oklahoma), Prof. T. Barman (Univ. of Arizona), Prof. J. Aufdenberg (ERAU)