
Der kosmische Barcode – Spektroskopie in der Astrophysik

Wenn wir heute durch moderne populärwissenschaftliche Blogs surfen oder im Wissenschaftsteil von Zeitschriften blättern, sehen wir nicht selten Überschriften wie die folgenden:

„Astronomen einig: das Universum ist 13.77 Milliarden Jahre alt“¹

„NASA findet den nächstgelegenen Erd-Zwilling unter 500 Exoplaneten“²

„Hochprozentiges im All? Das Phänomen hinter interstellarem Alkohol“³

Noch bizarrer als solche Aussagen erscheinen nur die Größenvergleiche in gängigen Dokumentationen über unser Universum. Dabei werden etwa langsam in Schritten von Zehnerpotenzen die Längendimensionen der Erde, der Sonne, naher (Zwerg-)Sterne und schließlich Überriesensterne wie Beteigeuze verglichen. Die Frage, die sich bei solchen Befunden einer fachfremden Person selbstverständlich stellt, ist: woher kommt dieses Wissen? Welche Methoden benutzen Astronomen und Astrophysiker, um diese Ergebnisse generieren zu können? Meine Präsentation wird dieses Thema kurz von meinem eigenen Fachgebiet, der quantitativen Spektroskopie, beleuchten. Dazu beschäftigen wir uns kurz mit der Geschichte der Spektroskopie, mit ihrer Funktionsweise und mit einem Einblick in die astrophysikalische Spektroskopie des 21. Jahrhunderts. Dies wird uns schließlich zur Erschließung meines Titels führen: was ist der kosmische Barcode?

(Kurze) Geschichte der Spektroskopie

Die Geschichte beginnt mit Isaac Newtons optischen Experimenten, die ca. 1666 stattgefunden haben. Das bekannteste dieser Versuche ist wohl jenes, in welchem Newton durch ein kleines Loch im Vorhang Sonnenlicht als Strahl in sein Zimmer scheinen ließ, um es dann in ein geschliffenes Glasprisma zu lenken (Abb. 1). Das verwunderliche Ergebnis: die weißen Sonnenstrahlen bestehen aus einer scheinbar kontinuierlichen Abfolge aller Farben des Regenbogens – ein sogenanntes Spektrum des Lichts. Eine ausführliche Theorie des Lichts und der Farben („*Opticks*“) publizierte Newton auf der Basis dieser Experimente im Jahre 1704. Auch Johann Wolfgang von Goethe versuchte sich ab etwa 1790 mit der „*Farbenlehre*“, die sich ebenso mit den optischen Eigenschaften befasste.

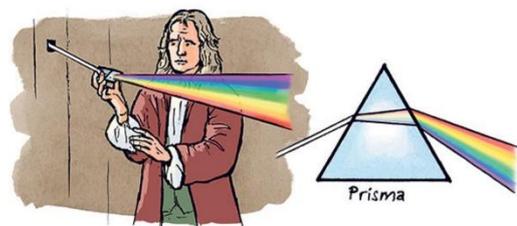


Abb. 1. Newtons Experiment zur Brechung des Sonnenlichts

¹ <https://scitechdaily.com/astronomers-agree-on-universes-birthday-13-77-billion-years-old/> (28.06.21)

² <https://www.space.com/30026-earth-twin-kepler-452b-exoplanet-discovery.html> (28.06.21)

³ <https://theweek.com/articles/462574/booze-space-phenomenon-that-creates-interstellar-alcohol> (28.06.21)

Unabhängig voneinander bauten William Hyde Wollaston und Joseph von Fraunhofer mehr als 100 Jahre nach Newtons Versuchen (1802 bzw. 1814) sogenannte Spektrometer, also Geräte zum Vermessen von Spektren. Dabei stellten sie fest, dass das Licht mitnichten kontinuierlich ist, sondern dunkle Stellen aufweist – die sogenannten Fraunhofer-Linien (Abb. 2). Wie diese Linien im Sonnenspektrum zustande kommen, wurde erst später aus einer Theorie der Sternatmosphären ersichtlich (siehe *).

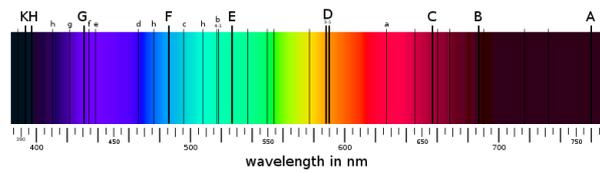


Abb. 2. Fraunhofer-Absorptionsspektrum der Sonne

Durch die von Fraunhofer entwickelte Wellenlängenskala ließen sich insbesondere verschiedene Spektren vergleichen, sodass etwa mit Kirchhoff-Bunsen Spektroskopen (Abb. 3.) die Spektren künstlicher Lichtquellen, wie etwa Flammen von chemischen Elementen (Natrium, Wasserstoff, Kohlenstoff etc.) analysiert werden konnten. Dabei stellte sich heraus, dass jedes chemische Element eine charakteristische Anordnung von Emissionslinien hat, also eine Reihe von hellen Linien hinter dunklem Hintergrund, die für jedes Element einzigartig sind. Warum diese Linien auftreten, war zu dieser Zeit noch unbekannt, sollte aber mit der Quantentheorie und der daraus resultierenden Theorie der Atome ab etwa 1900 beantwortet werden. Das Resultat war aber schon zu diesem Zeitpunkt bahnbrechend, da mit der Identifizierung von Linien von Wasserstoff, Kalzium, etc. im Spektrum der Sonne diese Elemente als in der Sonne vorkommend demonstriert werden konnten.

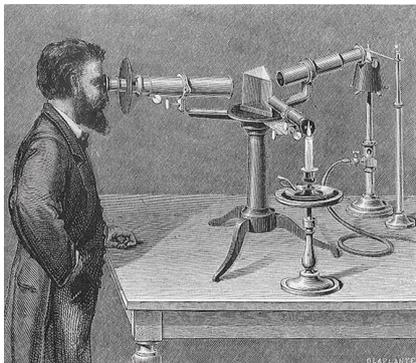


Abb. 3. Kirchhoff-Bunsen Spektroskop

(*) Aber wie kommt es nun zu den Linien im Spektrum der Sonne? Man kann sich vereinfacht vorstellen, wie das Licht vom heißen Inneren der Sonne (oder jedes anderen Sterns) als kontinuierliche Strahlung zu derer vergleichsweise kühlen Atmosphäre vordringt und dort auf verschiedene Moleküle, Atome und Ionen trifft. Diese absorbieren dann Strahlung gewisser Wellenlängen gemäß ihres Absorptionsspektrums und hinterlassen im Spektrum der Sonne ihren charakteristischen „Barcode“. Dieser Barcode kann schließlich von wissbegierigen Astronomen auf der Erde identifiziert und interpretiert werden. Das bedeutende daran: über eine hinreichend elaborierte Theorie der Sternatmosphären, Atomphysik und theoretischen Modellen, lässt sich annähernd die gesamte physikalische Information der Sternatmosphäre extrahieren. Das heißt, nicht nur die Frage „Welches Material und wie viel davon ist in der Atmosphäre?“ kann erschlossen werden, **sondern auch „wie heiß, wie dicht, wie turbulent etc. ist die Atmosphäre?“ und in weiterer Folge „Wie viel Masse hat der Stern?“ und „Wie weit ist er entfernt?“**. Dieser besondere Umstand ist der Grundpfeiler der modernen (stellaren) Spektroskopie, mit dem wir uns nun beschäftigen wollen.

Moderne (stellare) Spektroskopie

Die moderne Spektroskopie hat im Wesentlichen denselben Ausgangspunkt wie schon bei Newton, Fraunhofer und Wollaston: das Licht muss in Wellenlängen aufgespalten werden. Das geschieht in großen Observatorien oftmals mit mehreren sogenannten Échellegittern, die das Licht in zwei Dimensionen aufzuspalten. In Abb. 4 sieht man schematisch die Aufnahme eines hochaufgelösten Sternspektrums: das Teleskop wird auf den zu untersuchenden Stern gerichtet und sein Licht gebündelt. Es wird auf einen Schlitz fokussiert und mit einem Spiegel kollimiert um anschließend auf

das Échellegitter zu fallen. Zusammen mit einem Prisma (oder in anderen Konfigurationen einem zweiten Échellegitter) erzeugt dieser Aufbau ein zweidimensionales Bild des kompletten Spektrums des Sterns, das mit der Kamera (etwa eine CCD) aufgenommen wird.

Das Ergebnis ist ein Spektrum ähnlich dem eindimensionalen Spektrum in Abb. 2., jedoch verlaufen die Wellenlängen von oben (hochenergetisch – blau) nach unten (niederenergetisch – rot) entlang der Ordnungen des Gitters, wobei jede Zeile einer Ordnung entspricht. Es entsteht also ein vollständiges Spektrum des Sterns bei zugleich sehr guter Auflösung (Abb. 4).

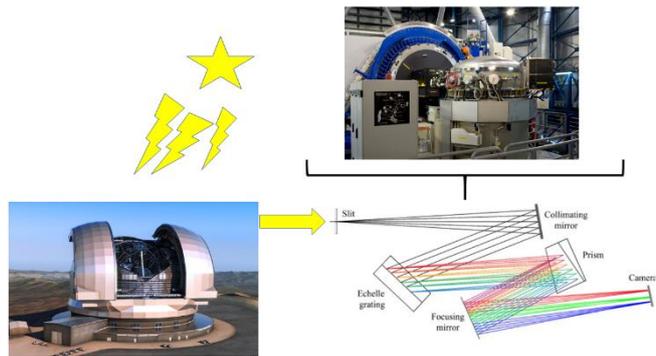


Abb. 4. Moderne Spektroskopie an großen Observatorien (ELT – in Konstruktion) und Spektrograph „CRILES“ (oben rechts).

Selbstverständlich kann man mit einem rohen Bild wie in Abb. 4 nicht quantitativ arbeiten. Das Bild muss reduziert werden und in ein Format übertragen werden, das die Daten einer wissenschaftlichen Vermessung zugänglich macht. Die „Stärke“, also die Helligkeit des Lichts (y -Achse) wird dabei als Funktion der Wellenlänge (x -Achse) abgebildet (Abb. 6, oberes Panel). In der stellaren Astrophysik wird die Helligkeit des Lichts oftmals auf 1 normiert und die Wellenlänge ist in Einheiten von Angström \AA dargestellt ($1 \text{\AA} = 10^{-10} \text{ m}$, i.e. 1\AA entspricht einem zehnten Milliardstel Meter).

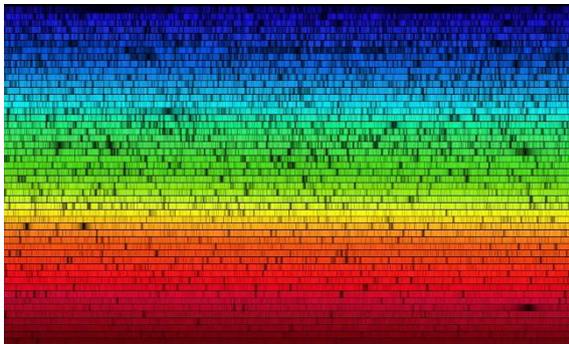


Abb. 5. Échelle Spektrum eines Sterns

Quantitative Spektroskopie

Die Techniken zur Aufnahme der Spektren sind damit klar, aber wie kann man sie nun deuten? Wie lassen sich die physikalischen Eigenschaften des Systems, also der Sternatmosphäre, bestimmen? Mit dieser Frage beschäftigt sich das Feld der (stellaren) quantitativen Spektroskopie.

Die Idee ist einfach: über die Modellierung der Sternatmosphäre und des Strahlungsfeldes in ihr, berechnet man unter Berücksichtigung aller

wesentlichen physikalischen Aspekte (Atomphysik, Physik der Sternatmosphären, Thermodynamik, Strahlungsdynamik, etc.) ein synthetisches Spektrum des beobachteten Objekts. Dieses synthetische Spektrum ist ein künstliches Spektrum des Sterns, so wie es aussehen würde, wenn die Parameter des Sterns so wären, wie es im mathematischen Modell spezifiziert wurde. Mit den verschiedenen diagnostischen Spektrallinien im Spektrum werden dann Input-Parameter des Modells so adjustiert, dass das synthetische Spektrum mehr und mehr der Beobachtung entspricht. Von einer Lösung spricht man, wenn das synthetische Spektrum aus der Modellrechnung das beobachtete Spektrum für alle chemische Elemente und deren ionisierten Spezies bei **einer globalen, einzigartigen Lösung** reproduziert (Abb. 6, unteres Panel).

Dieses sogenannte Anpassen, oder „Fitting“ aller relevanten spektroskopischen Indikatoren liefert Temperatur, Oberflächengravitation, Häufigkeiten der chemischen Elemente, sowie Geschwindigkeit der Massenströme im Stern. Über einen Vergleich der gefundenen empirischen Temperatur und Oberflächengravitation mit Sternentwicklungsmodellen können insbesondere auch Masse &

Leuchtkraft des Sterns bestimmt werden. Liegen photometrische Daten des Sternes vor, kann sogar eine Distanz zu dem beobachteten Objekt gefunden werden.

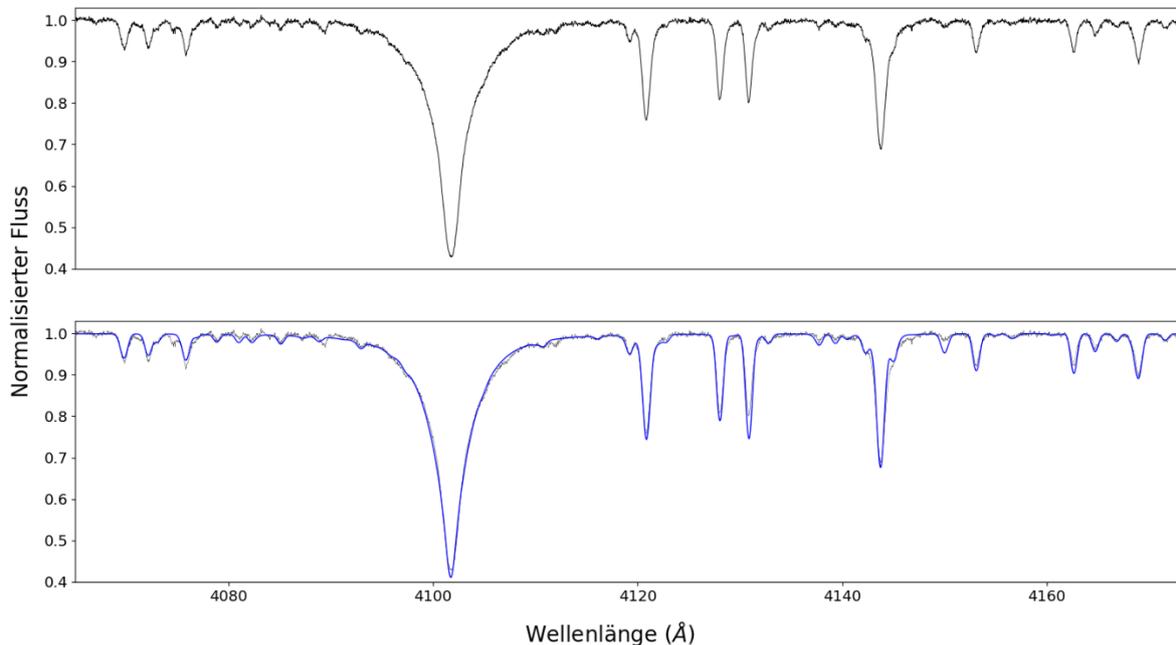


Abb. 6. Échelle Spektrum in reduzierter Form. Oberes Panel: kleiner Teil des beobachteten Spektrums des Sterns HD 51309 (schwarz). Unteres Panel: beobachtetes Spektrum (schwarz) und synthetisches Spektrum (blau).

Fazit

Bei Betrachtung von Abb. 2 oder Abb. 5 der beobachteten Spektren kann man rein visuell schnell eine Assoziation zu Barcodes bilden. Es ist, als ob Sternatmosphären, speziell für jedes Objekt, einen einzigartigen Code generieren, den wir nur scannen (i.e. analysieren) müssen, um ein sehr detailliertes Bild der physikalischen Eigenschaften des beobachteten Sterns zu bekommen. Dieser kosmische Barcode ist für jeden sichtbaren Stern grundsätzlich zugänglich. Ist es nicht erstaunlich, dass jeder einzelne funkelnde Lichtpunkt am Nachthimmel diese Fülle an Information als Keim in sich trägt?

Bildquellen:

- Abb. 1. <https://www.coopzeitung.ch/themen/familie/hesch-gwusst/2013/woher-hat-der-regenbogen-seine-farben--42583/> (28.06.21)
- Abb. 2. https://de.xcv.wiki/wiki/History_of_spectroscopy (public domain, 28.06.21)
- Abb. 3. <https://www.pinterest.ch/pin/371898881724531955> (28.06.21)
- Abb. 4. ELT: <https://www.eso.org/public/hungary/images/eso1440a/?lang>
ECHELLE Skizze: <https://www.osapublishing.org/oe/viewmedia.cfm?uri=oe-26-26-34131&html=true>

CRIRES: <https://www.eso.org/public/brazil/images/eso0827b/?lang> (all accessed on 28.06.21)

Abb. 5. https://sunearthday.nasa.gov/2006/multimedia/gal_030.php (29.06.21)