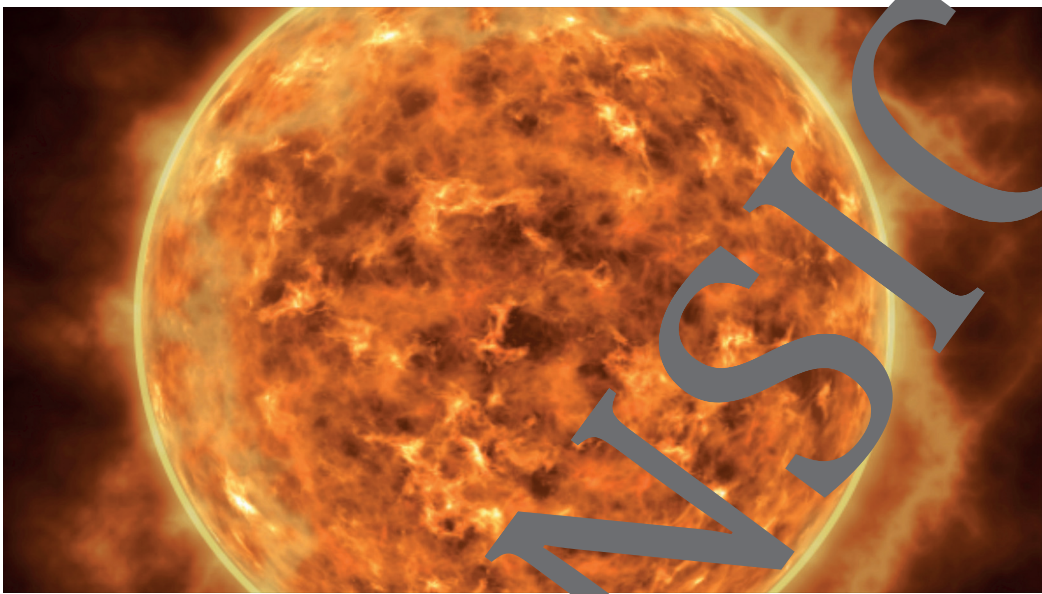
Astronomie

Die Rotation der Sonne und anderer Sterne

Matthias Borchardt



© amynapaloha/iStock/Getty Images Plus

Ihre Schülerinnen und Schüler bestimmen die Rotationsgeschwindigkeit der Sonne mithilfe der Rot- und Blauverschiebung von Spektrallinien des rechten und linken Sonnenrandes, wobei auch die differenzielle Rotation der Sonne thematisiert wird. Sirius ist der hellste Stern am Nachthimmel. Seine Spektrallinien zeigen eine deutliche Verbreiterung, die vor allem durch seine Rotation bedingt wird, was eine interessante Möglichkeit eröffnet, die Drehgeschwindigkeit des Sterns abzuschätzen. Im Weiteren wird das Rotationsverhalten zweier spektroskopischer Doppelsternsysteme näher untersucht. Eine Lernerfolgskontrolle rundet das Thema ab.

KOMPETENZPROFIL

Klassenstufe:	Sek. II
Dauer:	[illegible] Unterrichtsstunden (Minimalplan: 4–5 Unterrichtsstunden)
Kompetenzen:	Auswertung von Spektren, Herleitung, Umformung und Anwendung von Formeln, Interpretation und fachliche Einordnung von Ergebnissen
Inhalt:	Optischer Dopplereffekt, Bestimmung astronomischer Geschwindigkeiten über Blau- und Rotverschiebung von Spektrallinien, Linienverbreiterung durch Temperatur und Rotation, Eigenschaften von Doppelsternsystemen, spektroskopische Doppelsterne
Medien:	Diagramme, Grafiken, Taschenrechner, Internet

Auf einen Blick

1.–4. Stunde

Thema: **Die Rotation der Sonne**

M 1	Rot- und Blauverschiebung von Spektrallinien
M 2	Die Rotationsgeschwindigkeit der Sonne
M 3	Die differenzielle Rotation der Sonne
M 4	Die Dopplerverbreiterung der Spektrallinien

5. Stunde

Thema: **Die Rotation von Sirius**

M 5	Die Rotationsgeschwindigkeit des Sterns Sirius

6.–9. Stunde

Thema: **Spektroskopische Doppelsterne**

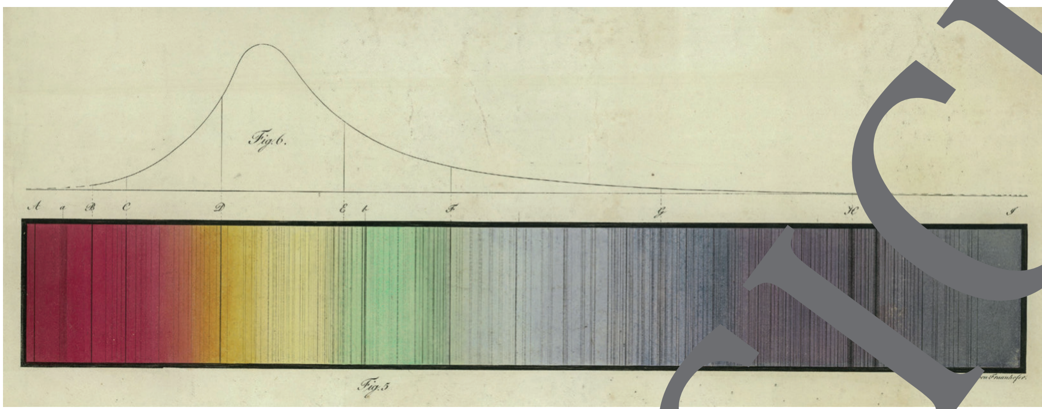
M 6	Die Umlaufgeschwindigkeiten im Doppelsternsystem β-Aurigae
M 7	Weitere Parameter des Doppelsternsystems β-Aurigae
M 8	Testen Sie Ihr Wissen! – Lernerfolgskontrolle

Minimalplan

Für einen Minimalplan sind die Materialien **M 1, M 2, M 5** und **M 6** geeignet.

Rot- und Blauverschiebung von Spektrallinien M 1

Betrachtet man das Spektrum des Sonnenlichts genauer, fallen sehr feine dunkle Linien auf, die das Spektrum senkrecht durchsetzen. Diese Linien wurden erstmals von dem Optiker und Fernrohr-Konstrukteur *Joseph Fraunhofer (1787–1826)* entdeckt und werden daher *Fraunhoferlinien* genannt. Es handelt sich dabei um Absorptionslinien, die beim Durchgang des Sonnenlichts durch die Atmosphären der Sonne und der Erde entstehen.



Originalzeichnung von Fraunhofer 1815, © Wikimedia Commons

Aufgabe 1

Recherchieren Sie mithilfe Ihres Physikbuchs oder des Internets, wie die Absorptionslinien im Spektrum der Sonne und in den Spektren anderer Sterne entstehen.

Aufgabe 2

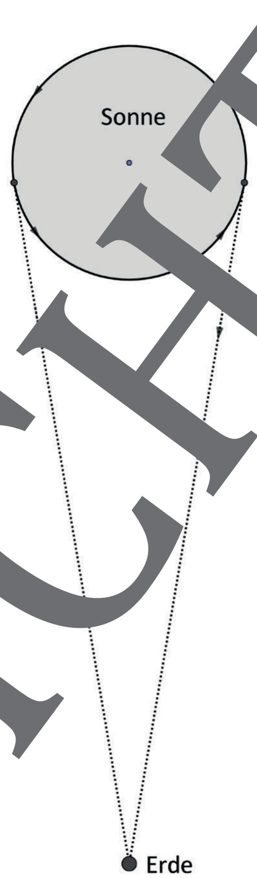
Mithilfe dieser Linien lässt sich die Rotationsgeschwindigkeit der Sonnenoberfläche (Photosphäre) bestimmen. Dazu nutzt man den **Dopplereffekt**. Erklären Sie, was man unter dem Dopplereffekt bei Licht sowie der Rot- und Blauverschiebung von Spektrallinien versteht.

Um die Rotationsgeschwindigkeit der Sonnenoberfläche mithilfe des Dopplereffekts zu bestimmen, nimmt man ein Spektrum des Sonnenlichts vom linken und eines vom rechten Rand der Sonne auf, wobei der Beleuchtungsspalt des Spektrographen entsprechend der unteren Abbildungen positioniert wird.

© Abbildung: Matthias Borchardt

Da sich der linke Sonnenrand auf den Beobachter (Erde) zubewegt, wird die Wellenlänge dieses Lichts aufgrund des Dopplereffekts ein wenig kleiner. Dies führt dazu, dass sich die Absorptionslinien im Spektrum in Richtung des blauen Spektralbereichs verschieben („blueshift"). Entsprechend erfährt das Licht des rechten Sonnenrands eine Rotverschiebung („red-shift"), denn dieser Rand der Sonne bewegt sich vom Beobachter weg. Aus der Verschiebung der Spektrallinien lässt sich mithilfe der Formel für den Dopplereffekt die Rotationsgeschwindigkeit der Sonne im Äquatorbereich berechnen.

Allerdings verschieben sich hier die Linien nur um einen sehr kleinen Betrag, sodass man das Spektrum stark vergrößern muss, um die Veränderung zu erkennen. Die untere Abbildung zeigt zwei Ausschnitte aus dem Sonnenspektrum. Die Wellenlängenskala läuft jeweils von links nach rechts.

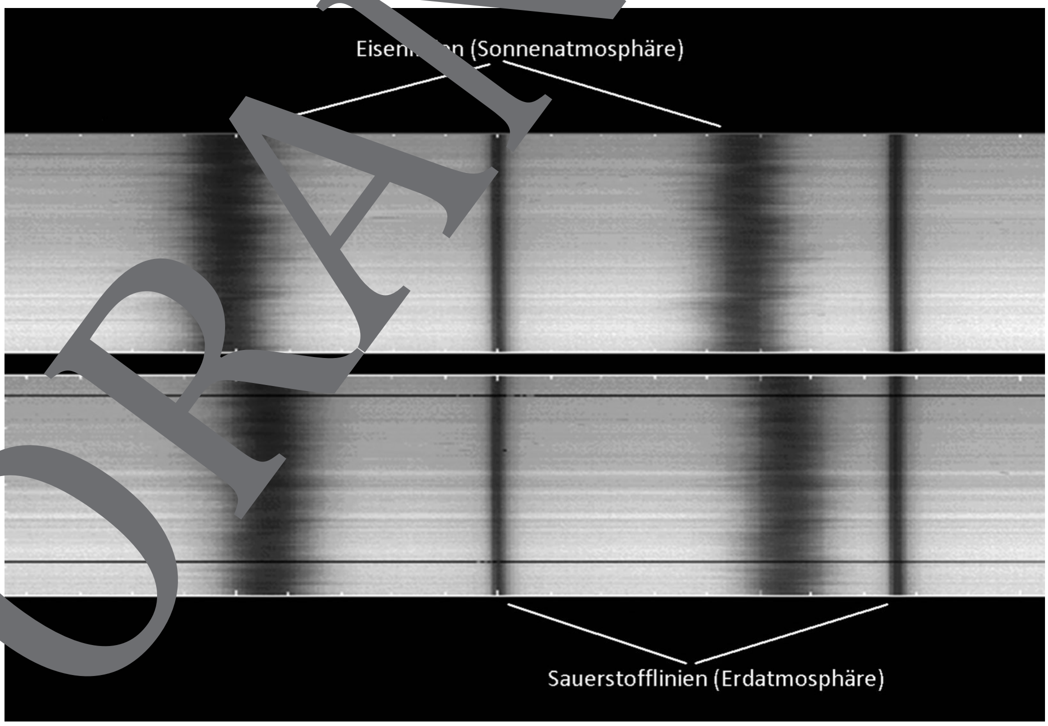


© Abbildung: Matthias Borchardt

Aufgabe 3

a) Erklären Sie, welches der beiden Spektren zum linken und welches zum rechten Sonnenrand gehört.

b) Begründen Sie, warum die beiden Sauerstofflinien keine Dopplerverschiebung aufweisen.



© Abbildung bearbeitet: Matthias Borchardt

Die Rotationsgeschwindigkeit der Sonne

M 2

Für Geschwindigkeiten, die klein gegenüber der Lichtgeschwindigkeit sind (v << c), dürfen wir die folgende Näherungsformel für den optischen Dopplereffekt verwenden: $\lambda_E = \lambda_S \cdot \left(1 \pm \frac{v}{c}\right)$.

Dabei bedeuten λ_S die Wellenlänge des Senders (Sonne), λ_E die des Empfängers (Beobachter auf der Erde), v die Geschwindigkeit des Sonnenrandes (Rotationsgeschwindigkeit der Sonne) und c die Lichtgeschwindigkeit.

Da die Wellenlängen des Lichts vom linken Sonnenrand kleiner werden (Blauverschiebung), gilt für die empfangene Wellenlänge $\lambda_{E\_links} = \lambda_S \cdot \left(1 - \frac{v}{c}\right)$. Das Licht des rechten Sonnenrandes hingegen erfährt eine Rotverschiebung – die empfangenen Wellenlängen sind etwas größer als bei den ausgesendeten Wellen. Es gilt daher $\lambda_{E\_rechts} = \lambda_S \cdot \left(1 + \frac{v}{c}\right)$.

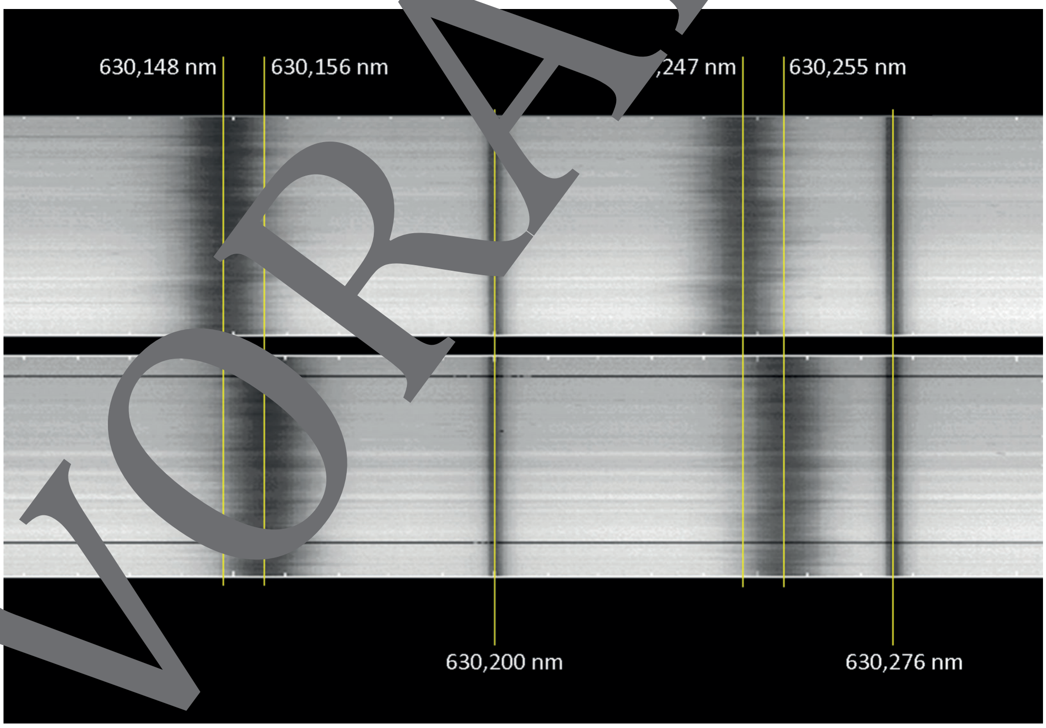
Aufgabe 1

a) Leiten Sie her: Für den Wellenlängenunterschied Δλ der Spektrallinien, die an den beiden Sonnenrändern aufgezeichnet wurden, gilt $\lambda_{E\_rechts} - \lambda_{E\_links} = \Delta\lambda = 2 \cdot \lambda_S \cdot \frac{v}{c}$.

b) Leiten Sie weiter her: Aus $\Delta\lambda = 2 \cdot \lambda_S \cdot \frac{v}{c}$ ergibt sich die Formel für die Rotationsgeschwindigkeit der Sonne: $v = \frac{\Delta\lambda}{2 \cdot \lambda_S} \cdot c$.

Aufgabe 2

In dem unten abgebildeten Spektrum wurden die Wellenlängen der Absorptionslinien (Fraunhoferlinien) eingetragen.



© Abbildung bearbeitet: Matthias Borchardt

M 3 Die differenzielle Rotation der Sonne

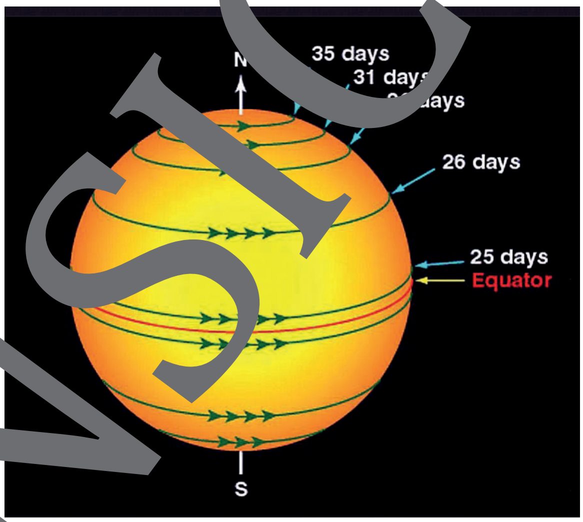
Wie lange benötigt die Sonne im Bereich ihres Äquators für eine Umdrehung?

Aufgabe 1

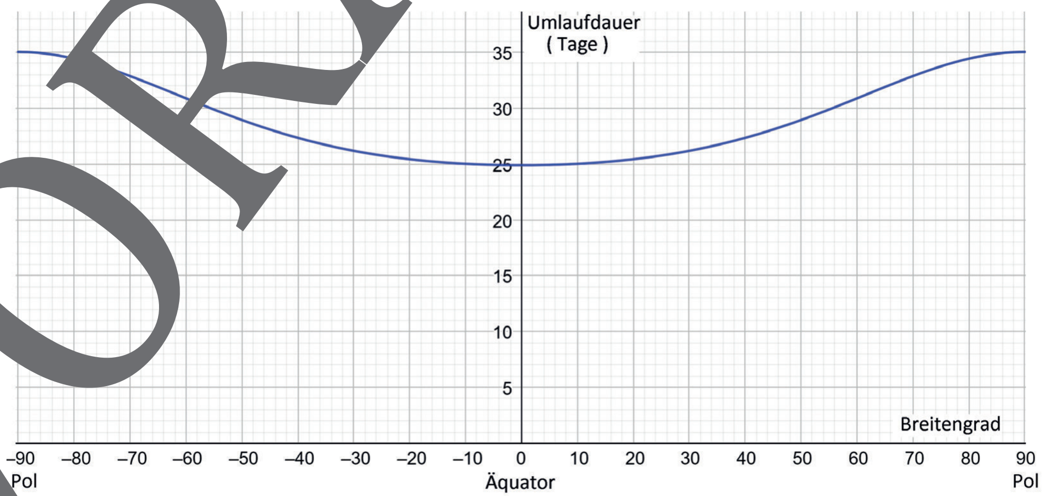
a) Die Umlaufdauer T ergibt sich aus der Formel $T = \frac{2\pi \cdot R_{Sonne}}{v_{Rotation}}$. Begründen Sie diese Formel.

b) Der Radius der Sonne am Äquator beträgt R_{Sonne} = 696.342 km. Berechnen Sie die Umlaufdauer T und geben Sie das Ergebnis in Tagen an.
<u>Hinweis:</u> Sie können den Radius in km und die Rotationsgeschwindigkeit in km/s einsetzen. Dann erhalten Sie die Umlaufzeit in Sekunden, was Sie dann noch in Tage umrechnen müssen.

Sie müssten bei Aufgabe 1 als Ergebnis etwa 25 Tage für die Umlaufzeit der Sonne am Äquator erhalten haben. Dieser Wert gilt erstaunlicherweise aber nicht für andere Regionen der Sonnenoberfläche. Die folgenden beiden Abbildungen zeigen, dass die Umlaufzeit steigt, je näher man den Polen der Sonne kommt. Dieses Phänomen wird in der Astronomie auch „Differenzielle Rotation“ genannt und erklärt sich durch die Beschaffenheit der Sonnenkugel. Diese ist nämlich kein fester, starrer Körper, sondern besteht aus einem sehr heißen Plasma – einer Art Flüssigkeit unter extremsten Bedingungen: Im Inneren der Sonne herrschen Temperaturen von mehreren Millionen Grad, während es auf der Sonnenoberfläche „nur“ 6000 Grad sind. Durch diesen enormen Temperaturunterschied kommt es zu starken Verwirbelungen und zu bremsenden Effekten innerhalb der Sonnenkugel.



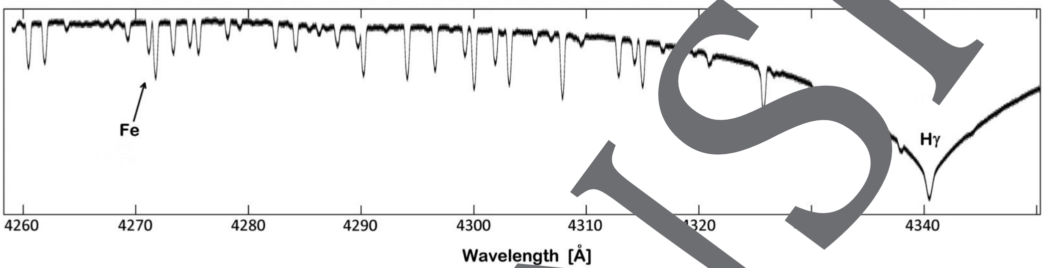
© Abbildung: NASA



© Abbildung: Matthias Borchardt

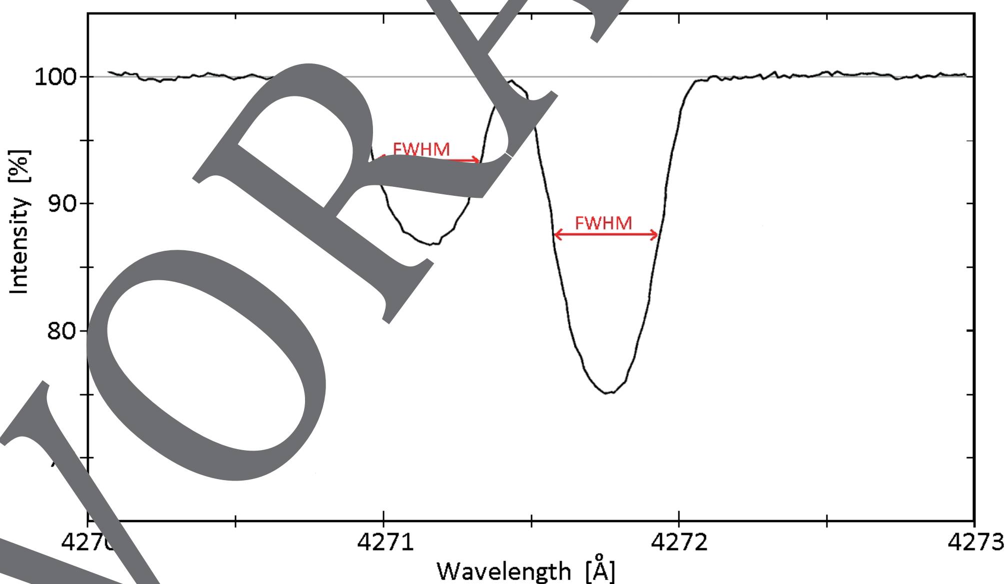
Die Rotationsgeschwindigkeit des Sterns *Sirius A* M 5

Sirius ist der hellste Stern am Nachthimmel. Seine Entfernung zur Erde beträgt etwa 8,6 Lichtjahre. Um die Rotationsgeschwindigkeit dieses Sterns zu bestimmen, lässt sich das Verfahren, das Sie im Material M 2 bei der Sonne benutzt hatten, nicht anwenden. Zur Messung der Sonnenrotation hatten Sie die Dopplerverschiebungen des linken und des rechten Sonnenrands bestimmt und daraus die Rotationsgeschwindigkeit berechnet. Der Stern Sirius ist aber so weit entfernt, dass es kaum möglich ist, die Ränder des Sterns einzeln aufzulösen. Vielmehr fließt das Licht der gesamten Sternscheibe gleichzeitig in den Spektrographen. Dennoch ist es möglich, auch bei weit entfernten Sternen deren Drehgeschwindigkeit zu messen oder zumindest abzuschätzen. Dies geschieht über die sogenannte **Rotationsverbreiterung** von Spektrallinien („Rotational Broadening"). Die untere Abbildung zeigt einen Ausschnitt aus dem Spektrum von Sirius. Dargestellt ist der Bereich um die kräftige Hγ-Absorptionslinie. Deutlich sind zahlreiche weitere kleinere Absorptionslinien zu erkennen. In der englischsprachigen Fachliteratur ist es üblich, die Wellenlängen des Lichts in der Maßeinheit Ångström (Å) anzugeben. Es gilt: $1\,Å = 10^{-10}\,m$.



© Abbildung bearbeitet: Matthias Borchardt

Wir interessieren uns für die beiden gekennzeichneten Eisenlinien (Fe), denn diese Spektrallinien wurden mit einem hochauflösenden Spektrographen sehr genau vermessen (s. u.):



© Abbildung bearbeitet: Matthias Borchardt

Line profiles in Sirius A, observed with the ESO coudé echelle spectrometer. The resolution was λ/Δλ=130 000. The two lines are Fe I (4271,153 Å) and Fe I (4271,759 Å).

M 7 Weitere Parameter des Doppelsternsystems β-Aurigae

Die Umlaufgeschwindigkeit der beiden Sterne im Doppelsternsystem β-Aurigae beträgt leicht gerundet v = 110 km/s. Die Umlaufzeit T hat einen Wert von 3,96 Tagen, was sich aus der periodischen Aufspaltung der Spektrallinien ergibt.

Der Abstand der beiden Sterne

Mithilfe dieser beiden Ergebnisse und der Formel für die Umlaufgeschwindigkeit eines Körpers auf einer Kreisbahn $v = \frac{2\pi \cdot r}{T}$ können Sie den Radius r der Umlaufbahnen berechnen. Wenn Sie diesen Radius verdoppeln, erhalten Sie den Abstand der beiden Sterne während ihrer Umläufe und somit auch die große Halbachse $a = 2 \cdot r$ des Doppelsternsystems.

Aufgabe 1

Berechnen Sie den Radius der Umlaufbahnen der beiden Sterne und die große Halbachse a des Systems.

Die Massen der beiden Sterne

Mithilfe des dritten Keplergesetzes $\frac{a^3}{T^2} = \frac{G \cdot (M_1 + M_2)}{4\pi^2}$ erhalten Sie die Massensumme $M_1 + M_2$ des Doppelsternsystems und da wir davon ausgehen können, dass die Massen in etwa gleich sind, auch die beiden Einzelmassen.[1]

Aufgabe 2

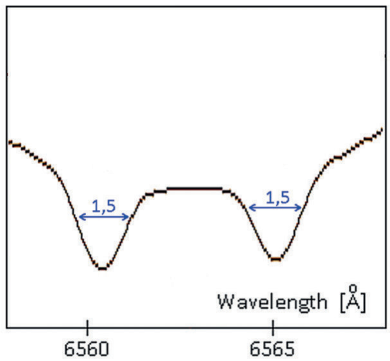
Stellen Sie das Keplergesetz nach der Massensumme um und berechnen Sie die Massen.

Die Rotationsgeschwindigkeiten der beiden Sterne um ihre eigenen Achsen

Aus der Verbreiterung der Spektrallinien lässt sich die Rotationsgeschwindigkeit der Sterne um ihre eigenen Achsen abschätzen.

Aufgabe 3

Verwenden Sie die Halbwertsbreiten der Spektrallinien und berechnen Sie mit der Formel $v_{Rot} = \frac{\Delta\lambda}{2 \cdot \lambda_S} \cdot c$ die Rotationsgeschwindigkeiten der beiden Sterne.



© Abbildung: Matthias Borchardt

Anmerkung

Aus der genannten Umlaufzeit von 3,96 Tagen folgt, dass sich die beiden Sterne auf einer sehr engen Umlaufbahn umrunden. Daher kann man davon ausgehen, dass es sich um eine sogenannte „gebundene Rotation" handelt. Das bedeutet, dass die Sterne aufgrund der starken Gezeitenreibung keine Eigenrotation mehr aufweisen. Wie kann es dann aber sein, dass die Spektrallinien dennoch eine deutliche Rotationsverbreiterung aufweisen? Der Stern rotiert für den entfernten

1 Die Gleichheit der Massen erschließt sich aus den nahezu identischen Radialgeschwindigkeitskurven der beiden Sterne, die recht genau ermittelt werden konnten.

Testen Sie Ihr Wissen! – Lernerfolgskontrolle M 8

Das 7400 Lichtjahre entfernte Sternsystem HD 51076 (HI Mon) ist ein spektroskopischer Doppelstern. Das bedeutet, dass man die beiden Sterne im Fernrohr nicht als getrennte Lichtpunkte wahrnehmen kann. Vielmehr meint man, einen Einzelstern vor sich zu haben. Mithilfe des Spektrums dieses einzelnen Lichtpunktes kann man trotzdem erkennen, dass es sich um ein Doppelsternsystem handelt.

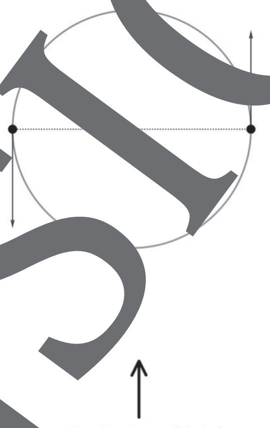
Aufgabe 1

Erklären Sie, wie sich im Spektrum die binäre Struktur des „Sterns" bemerkbar macht.

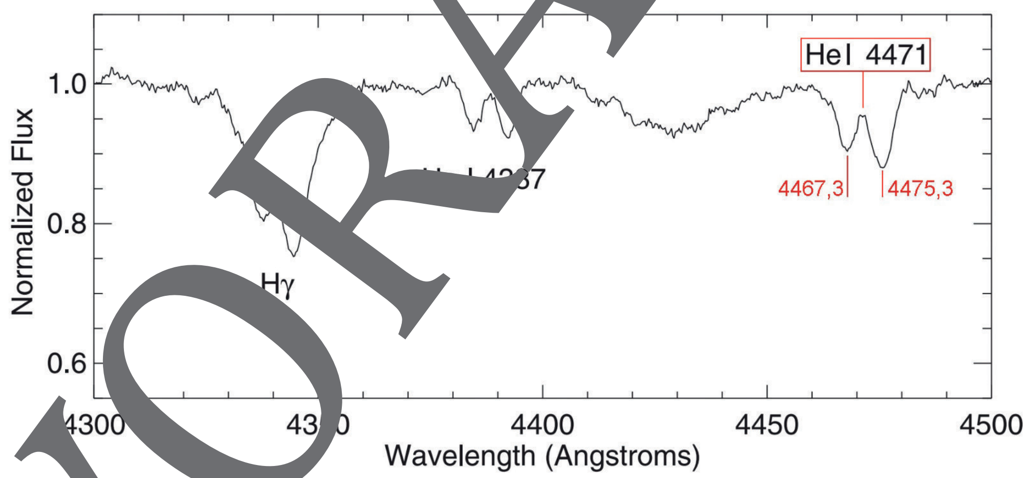
Aufgabe 2

Das untere Spektrum wurde zu dem Zeitpunkt aufgenommen, als die beiden Sterne bez. des Beobachters (Erde) ihren maximalen Abstand hatten. Dies ist die Situation, in der sich der eine Stern genau auf uns zu- und der andere von uns wegbewegt (s. Abbildung), was aufgrund des Dopplereffekts zu einer Aufspaltung der drei sichtbaren Spektrallinien führt. Aus der Wellenlängendifferenz der beiden Komponenten der Helium-Linie (λ = 4471 Å) lässt sich die Umlaufgeschwindigkeit der beiden Sterne mithilfe der Formel $v = \frac{\Delta\lambda}{2 \cdot \lambda_S} \cdot c$ berechnen.

Bestimmen Sie die Wellenlängendifferenz $\Delta\lambda$ und berechnen Sie die Umlaufgeschwindigkeit der beiden Sterne um ihren gemeinsamen Schwerpunkt.



© Abbildung: Matthias Borchardt



© Abbildung bearbeitet: Matthias Borchardt

RAAbits Online
@RAABE

Mehr Materialien für Ihren Unterricht mit RAAbits Online

Unterricht abwechslungsreicher, aktueller sowie nach Lehrplan gestalten – und dabei Zeit sparen.
Fertig ausgearbeitet für über 20 verschiedene Fächer, von der Grundschule bis zum Abitur: Mit RAAbits Online stehen redaktionell geprüfte, hochwertige Materialien zur Verfügung, die sofort einsetz- und editierbar sind.

- Zugriff auf bis zu **400 Unterrichtseinheiten** pro Fach
- Didaktisch-methodisch und **fachlich geprüfte Unterrichtseinheiten**
- Materialien als **PDF oder Word** herunterladen und individuell anpassen
- Interaktive und multimediale Lerneinheiten
- Fortlaufend **neues Material** zu aktuellen Themen

Testen Sie RAAbits Online 14 Tage lang kostenlos!

www.raabits.de

RAAbits Online – Das Portal für Unterrichtsmaterialien und Schulorganisation