

So klein und dennoch beinahe ein Fixstern!

In Bezug auf den SuW-Beitrag „Ein Brauner Zwerg bei HD 19467“ (in Heft 6/2014 Blick in die Forschung: Brennpunkt 1284)

Reiner Hennig

Einer Forschergruppe um Justin R. Crepp an der Notre Dame University in Indiana gelang es, den Planeten eines Sterns zu fotografieren, der 100 Lichtjahre von uns entfernt ist. Dieser Planet leuchtet 100 000-mal schwächer als der Stern, den er umkreist.

Wie kann man wissen, wo ein solcher Planet zu finden ist, und wie kann man ein Objekt fotografieren, das so wenig Licht zu uns sendet? Wenn ein Planet einen Stern umkreist, bewirkt er dabei auch eine winzige Bewegung des Sterns. Wenn man diese Bewegung messen kann, kann man auch etwas über den Planeten sagen, der ihn umkreist.

Dies wollen wir verstehen. Zudem beschäftigen uns dann noch mit dem Aufbau dieses Planeten und finden heraus, warum er beinahe, aber noch nicht ganz ein Fixstern ist.

Übersicht der Bezüge im WIS-Beitrag		
Astronomie	Planeten	Doppelsterne , Radialgeschwindigkeit , Entfernung und Lichtstärke , Sternaufbau , Wasserstoffbrennen
Physik	Mechanik und Thermodynamik	Leistung , Kreisbewegung , hydrostatische Gleichung, Adiabate , Energieerhaltung, Wärme , thermische Strahlung, Schwerpunkt
Fächer- verknüpfung	Astro-Ma	Genauigkeit von Näherungen, Winkelfunktionen, Komponenten von Vektoren , Logarithmus
Lehre allgemein	Kompetenzen (Wissen und Erkenntnis), Unterrichtsmittel	Aufgabenlösekompetenz, Abschätzen üben, Schlussfolgerungen ziehen, Handbewegungen als Vorstellungshilfe, akustische Erfahrung als Analogie zum optischen Dopplereffekt

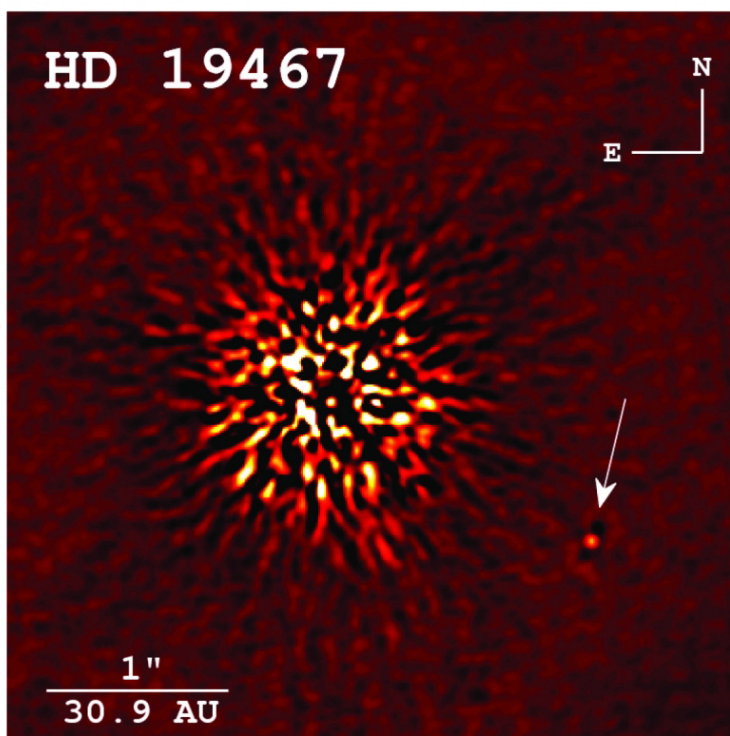


Abbildung 1:
Mit den 10-m-Teleskopen des Keck-Observatoriums gelang es, den massearmen Begleiter des Sterns HD 19467 direkt aufzunehmen (Pfeil). Das Licht des Hauptsterns wurde durch eine Blende abgedeckt. (Quelle: Crepp, J. R. et al.: Astrophysical Journal 781: 29, 2014).

1) Lichtgeschwindigkeit

Der Fixstern HD 19467 ist 100 Lichtjahre von uns entfernt. Wie viele Kilometer sind das? Licht bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von 299.792.458 m/s. Um wie viel Prozent wäre dein Ergebnis falsch, wenn du die Lichtgeschwindigkeit mit 300.000 km/s abschätzt?

2) Die Helligkeit eines fernen Sternes

Viele Sterne, die wir am Nachthimmel sehen, leuchten stärker als unsere Sonne. Trotzdem ist es nachts bei uns ziemlich dunkel und kälter als am Tag, und wir sehen die Sterne nur als kleine Punkte am Himmel. Warum?

Die Sonne scheint auf die Erde und liefert uns viel Energie. Auf die Atmosphäre der Erde treffen pro Sekunde etwa 1300 J auf jeden Quadratmeter, wenn die Fläche senkrecht zur Sonneneinstrahlung steht. Dies ist eine **Leistung** von etwa $1,3 \text{ kW/m}^2$. Welche Leistung trifft dann auf eine Fläche von 1 cm^2 ?

Wäre die Sonne doppelt so weit entfernt, würde sich ihre Energie auf die 4-fache Fläche verteilen. Die Energie, die pro Sekunde auf eine Fläche von 1 cm^2 fällt, wäre also $0,13 \text{ W/cm}^2 \times \frac{1}{4} = 0,033 \text{ W/cm}^2$. Die Sonne ist von uns $1,496 \cdot 10^{11} \text{ m}$ entfernt. Wie lange braucht das Licht von der Sonne zur Erde? Wenn ein Stern so weit von uns entfernt ist, dass das Licht von ihm zu uns 100 Jahre braucht, sagt man, er ist 100 Lichtjahre von uns entfernt. Welche Energie von der Sonne würden wir pro Sekunde auf 1 cm^2 empfangen, wenn die Sonne 100 Lichtjahre entfernt wäre?

Ein Planet leuchtet 100.000-mal schwächer als der Fixstern, den er umkreist. Wie viel Leistung würde ein Teleskop vom Fixstern HD 19467 empfangen, das eine kreisförmige Empfangsfläche mit einem Durchmesser von 10 m hat? Welche Leistung nimmt es vom Planeten auf, der 100.000-mal schwächer leuchtet?

3) Sterne umkreisen einander.

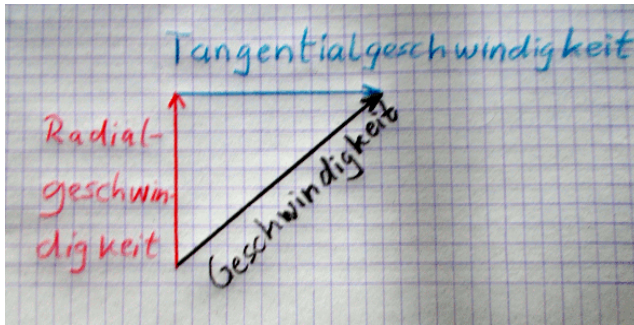
Wie können wir herausgefunden, ob ein Stern einen Planeten hat? Betrachten wir zuerst 2 gleich große Sterne, die sich umeinander bewegen. Stelle diese Bewegung durch deine linke und deine rechte Faust dar!



Du siehst, dass sich die linke Faust abwechselnd auf dich zu bewegt und von dir weg bewegt. Beide Fäuste bewegen sich um einen Punkt (den **Schwerpunkt**). Beide Sterne haben den gleichen Abstand r vom Schwerpunkt. Sind die beiden Massen m_1 und m_2 unterschiedlich groß, so sind auch ihre Abstände r_1 und r_2 vom Schwerpunkt unterschiedlich groß. Es gilt $m_1 \cdot r_1 = m_2 \cdot r_2$. Beide Körper umkreisen in der gleichen Zeit T den Schwerpunkt. Wenn beide Körper dabei auf einer **Kreisbahn** laufen, wie groß ist dann ihre Geschwindigkeit?

Der Planet Jupiter und die Sonne umkreisen einen gemeinsamen Schwerpunkt. Wenn die Sonne die Masse m_S hat, hat der Planet Jupiter die Masse $m_J = m_S : 317,8$. Die Umlaufdauer des Planeten Jupiter beträgt 11,9 Jahre. Der Abstand Jupiters von der Sonne beträgt $r_1 + r_2 = 779$ Millionen km. Mit welcher Geschwindigkeit v_1 bewegt sich die Sonne um den gemeinsamen Schwerpunkt?

4) Radialgeschwindigkeiten



Wenn ein Auto auf uns zufährt, klingt sein Fahrgeräusch etwas höher als wenn es von uns wegfährt. Beim Licht bewirkt eine Bewegung auf uns zu, dass die Farbe des Lichts etwas blauer wird, und eine Bewegung von uns weg bewirkt, dass das Licht etwas rötlicher wird. Diese Farbveränderung wird als Doppler-Effekt bezeichnet. Man kann sie heute sehr genau messen. Aus ihr kann man die Geschwindigkeit ermitteln, mit der ein Stern sich auf uns zu bewegt

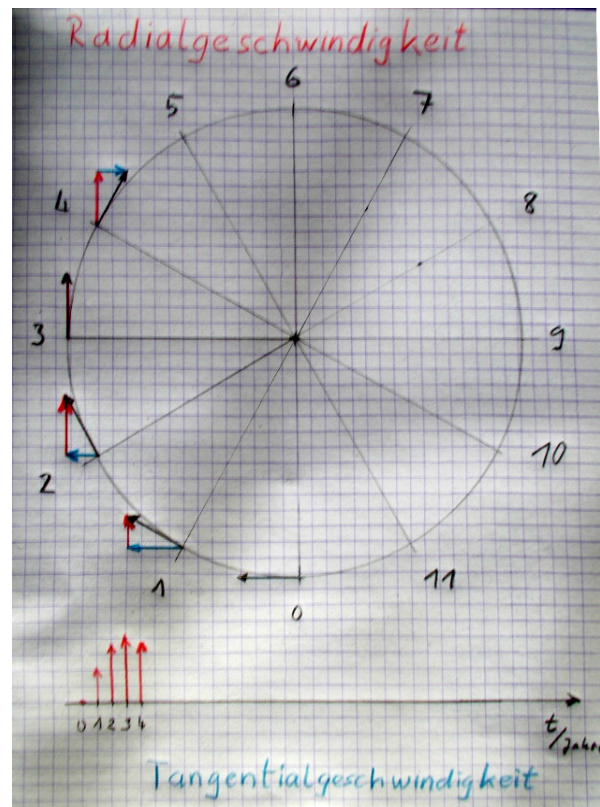
oder von uns weg bewegt. Diese Geschwindigkeit bezeichnet man als **Radialgeschwindigkeit**. Man kann sie inzwischen auf wenige m/s genau bestimmen. Tangentialgeschwindigkeit nennt man den Anteil der Geschwindigkeit, der senkrecht zu unserer Sehrichtung steht. Mache dir Gedanken darüber, wie genau man die Tangentialgeschwindigkeit in 100 Lichtjahren Entfernung bestimmen kann.

Um die Radialgeschwindigkeiten besser zu verstehen, zeichne einen Kreis mit dem Durchmesser von 15 cm. Dieser Kreis soll den Umlauf eines Planeten um seinen Zentralstern beschreiben.

Dieser Umlauf soll 12 Jahre dauern und mit konstanter Geschwindigkeit geschehen. Für jedes Jahr markieren wir einmal den Ort des Planeten (das entspricht dann den Stunden auf dem Zifferblatt einer Uhr), und für jeden dieser Orte tragen wir die Geschwindigkeit des Planeten als einen 2 cm langen Pfeil ein. Diese Pfeile sind immer tangential zum Kreis.

Stelle nun jeden dieser Pfeile als die Summe zweier Pfeile dar, von denen einer senkrecht und einer waagrecht ist. Die senkrechten Teilpfeile stellen dann die Radialgeschwindigkeit des Planeten dar.

Zeichne ein Diagramm, bei dem du für 2 Umläufe des Planeten für jedes Jahr die Radialgeschwindigkeit einträgst. Wähle dafür als horizontale Achse die Zeit und als Einheit 0,5 cm pro Jahr. Die senkrechte Achse ist dann für die Radialgeschwindigkeit. Du siehst, wie die Radialgeschwindigkeit abwechselnd zunimmt oder abnimmt. Wie groß ist der Abstand zwischen den Maxima dieser Kurve?



Betrachten wir einen Planeten, bei dem die maximale Radialgeschwindigkeit 9,6 km/s beträgt und der in 29,63 Jahren die Sonne umkreist. Wie groß ist der Durchmesser seiner Umlaufbahn?

Die Radialgeschwindigkeit des Sterns HD 194367 wurde 17 Jahre lang sehr genau gemessen. Aus den kleinen regelmäßigen Veränderungen, die man dabei gefunden hat, konnte man feststellen, dass dieser Stern einen Planeten hat, in welcher Zeit er einmal den Fixstern umrundet und wie groß seine Umlaufbahn ist. Deshalb lohnte es sich, diesen Fixstern mit einem sehr großen Teleskop zu fotografieren, um den unbekanntem Planeten erstmals zu sehen.

5) Aufbau eines Sterns

Um zu verstehen, was ein Stern oder ein großer Planet ist, beschäftigen wir uns damit, wie er aufgebaut ist. Betrachten wir dazu eine große kugelförmige Gaswolke. Im Falle des Begleiters des Sterns HD 194367 hat sie die 57- bis 67-fache der Masse des Planeten Jupiter. Berechne die Masse dieses Begleitsterns.

Zerlegen wir diese **Gaskugel** in Gedanken in eine Kugel im Zentrum und in viele ineinander liegende Kugelschalen außen herum. Kugelschalen und Kugel haben den gleichen Mittelpunkt. Alle Atome in der Gaswolke ziehen alle anderen Atome der Gaswolke durch die Schwerkraft an. Hat man eine Kugelschale, in der überall die gleiche Dichte herrscht, so wirkt die Schwerkraft aller Atome der Kugelschale so, dass eine Masse, die sich im Innenraum der Kugelschale befindet, überhaupt nicht angezogen wird. Eine Masse außerhalb der Kugelschale wird so angezogen, als ob alle Massen der Schale in einem Punkt im Zentrum der Kugelschale vereinigt wären. Was bedeutet dies für die Anziehung, die ein kugelförmiger Stern auf einen anderen kugelförmigen Stern ausübt?

Das Gewicht einer Kugelschale lastet auf allen anderen Kugelschalen, die weiter innen liegen, und auf dem Zentrum der Gaswolke. Was bedeutet dies für den Druck im Gas der Gaswolke, wenn man von außen nach innen geht? Wo ist der Druck im Stern am größten?

6) Gase lassen sich zusammendrücken.

Nimm eine Luftpumpe, verschließe ihre Öffnung mit dem Daumen und drücke sie schnell zusammen. Dann spürst du, dass der Druck in der Pumpe umso höher wird, je stärker du die Pumpe zusammendrückst, und dass die Luft in der Pumpe dabei wärmer wird.

Die Drücke, die von außen auf die Kugelschalen wirken, drücken die Kugelschalen so stark zusammen, dass der Gasdruck in der Kugelschale genau so groß wird, wie der Außendruck. Dann ist die Kugelschale stabil.

Das gleiche gilt auch für die Kugel im Zentrum. Allerdings wird dann das Gas wärmer. Dabei gilt: Wird ein Gasvolumen, z. B. eine unserer Kugelschalen, zusammengedrückt, und bleiben dabei die Anzahl der Teilchen und die (Wärme-)Energie darin gleich, so nimmt sein Druck p und seine Temperatur T zu. (Als Temperaturskala wird hier die Kelvin-Skala verwendet, die nicht beim Gefrierpunkt des Wassers, 0 °C , startet, sondern bei $0\text{ K} = 273,15\text{ °C}$.) Dabei gilt immer $T \sim p^{(1 - 1/\gamma)}$ oder $p^{(1 - 1/\gamma)} / T$ ist konstant. Da bei einem Gas mit der Dichte ρ normalerweise auch $p \sim \rho \cdot T$, so folgt daraus: $T \sim (\rho \cdot T)^{(1 - 1/\gamma)}$. Daraus folgt dann $T \sim \rho^{(\gamma - 1)}$. Bei vielen Sternen ist $\gamma = 5/3$. Dann gilt $T \sim \rho^{(2/3)}$.

Bei den Sternen ist meist der Unterschied zwischen der kleinsten und der größten Dichte sehr groß. Deshalb ist es sinnvoll, wenn man hier die **Logarithmus-Funktion** verwendet. Dann gilt die einfache Formel $\log(T) = \log(a \cdot \rho^{(2/3)}) = \log(a) + 2/3 \cdot \log(\rho)$.

Wie bezeichnet man in der Mathematik einen Zusammenhang zwischen den Größen x und y , wenn $y = a + b \cdot x$? Was ist der Graph einer solchen Funktion?

Wenn wir $\log(T)$ als y -Achse auftragen und $\log(\rho)$ als x -Achse, so liegen in jeder Schicht unserer Gaswolke die Werte von $\log(T)$ und $\log(\rho)$ auf der gleichen Kurve. Was kannst du über diese Kurve sagen? Was geschieht in diesem Diagramm, wenn eine Gasschicht zusammengedrückt wird?

7) Energie

Jeder Körper gibt Energie in Form von Strahlung ab, auch unsere Gaswolke. Wie viel abgestrahlt wird, hängt ab von der Beschaffenheit der Oberfläche des Körpers ab und von seiner Temperatur T . Ein optimaler Strahler sendet dadurch bei Zimmertemperatur etwa 46 mW pro Quadratcentimeter aus. Für die Ausstrahlung I gilt dabei $I \sim T^4$, d. h. doppelte Temperatur in K führt zu 16-facher Ausstrahlung. Wie viel würde ein optimaler Strahler aussenden bei einer Temperatur von 100 K , 900 K oder 3000 K . Eine Gaswolke, die Licht ausstrahlt, wird durch ihre Ausstrahlung zum Stern.

Woher kann unsere Gaskugel nun die Energie beziehen, die sie abgibt? Wenn die Gasatome einander näherkommen und dem Zentrum der Gaswolke näherkommen, nimmt ihre Lageenergie ab. Dafür wird ihre Dichte größer und damit auch ihre Temperatur und die Bewegungsenergie ihrer ungeordneten Bewegung. Diese Bewegungsenergie wird als **Wärme** bezeichnet. Die Hälfte der abgegebenen Lageenergie wird dabei in Wärme verwandelt, die andere Hälfte wird abgestrahlt. Was geschieht dabei mit Temperatur und Dichte im Zentrum des Sterns? Wie wirkt sich diese Änderung im $\log(T)$ - $\log(\rho)$ -Diagramm aus? Der Stern erzeugt also Energie, indem er schrumpft

8) Geht es immer so weiter?

Wenn die Dichte der Atome im Zentrum des Sterns so groß wird, dass die Atome so dicht gepackt sind wie in einem Metall, ist dort eine weitere Temperaturerhöhung nicht mehr möglich und eine weitere Energieabgabe durch Schrumpfen auch nicht mehr. Wie in einem Metall wird in diesem Bereich die Übertragung von Energie von einem Ort zum anderen sehr schnell, und überall in diesem Bereich herrscht nun die gleiche Temperatur. Was bedeutet das für die darüberliegenden Schichten? Wie wird die weitere Entwicklung des Sterns aussehen?

9) Wasserstoff-Brennen

Gas im Weltraum, auch unsere Gaswolke, besteht zum größten Teil aus Wasserstoff. Bei hohen Temperaturen im Zentrum des Sterns verlieren die Wasserstoffatome ihr Elektron. Die Kerne der Wasserstoff-Atome fliegen durcheinander und stoßen einander. Ist die Temperatur und die Dichte dort hoch genug, haben sie so viel Energie, dass sie beim Stoß zusammenbleiben und zu Heliumkernen verschmelzen. Dies geschieht, wenn der Stern eine Masse von etwa 80 Jupitermassen hat. Diese Art der Energieerzeugung nimmt mit zunehmender Temperatur sehr stark zu. Bei dieser Verschmelzung der Atomkerne wird sehr viel Energie frei. In diesem Zustand befinden sich viele Sterne, z.B. unsere Sonne. Was bedeutet dies für das Schrumpfen des Sternes? Was wird geschehen, wenn nicht mehr genügend Wasserstoff-Atome im Zentrum sind? Warum ist wohl die Lebensdauer von kleinen Sternen wie etwa unsere Sonne, viel größer als die Lebensdauer von Sternen, die 30-mal so viel Masse haben? Warum ist unser Begleitstern des Sterns HD19467 beinahe, aber nicht mehr ganz ein Fixstern?

Verwendete Literatur:

Unsöld, Albrecht und Baschek, Bodo: Der neue Kosmos. Einführung in die Astronomie und Astrophysik. 6., völlig neu bearbeitete Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1999.

Für die Überlegungen zu Sternaufbau und Sternentwicklung stütze ich mich hier hauptsächlich auf eine Vorlesung von Prof. Dr. Volker Weidemann über Sternaufbau und Sternentwicklung, die ich in den siebziger Jahren des 20. Jahrhunderts in Kiel bei ihm hören durfte.

„Weitere WIS-Materialien zur Astronomie und allen ihren Bezügen finden sie unter der Adresse www.wissenschaft-schulen.de (Fachgebiet Astronomie).

Wir würden uns freuen, wenn sie zum vorliegenden Beitrag Hinweise, Kritiken und Bewertungen an die Kontaktadresse des Autors senden könnten.“