

Weißer Zwerge und Gravitations-Rotverschiebung

Über einen der grundlegenden von der Allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagten Effekte und einige seiner astronomischen Anwendungen

Ein Artikel von Virginia Trimble, Martin Barstow

Einer der drei klassischen Tests der [Allgemeinen Relativitätstheorie](#) sind Messungen der [Gravitations-Rotverschiebung](#) von Licht oder anderen Sorten [elektromagnetischer Strahlung](#). Allerdings gilt für diesen Test – im Gegensatz zu den zwei anderen, der [Lichtablenkung](#) und der [relativistischen Periheldrehung](#) – dass man den betreffenden Effekt auch ohne Allgemeine Relativitätstheorie korrekt vorhersagen kann. Es genügt eine Kombination der Newton'schen Gravitation und einer Teilchentheorie des Lichts mit dem [schwachen Äquivalenzprinzip](#) (schwere Masse ist gleich träger Masse). Darum sollte die Gravitations-Rotverschiebung besser als ein Test dieses Prinzips angesehen werden, nicht als ein Test der Allgemeinen Relativitätstheorie.

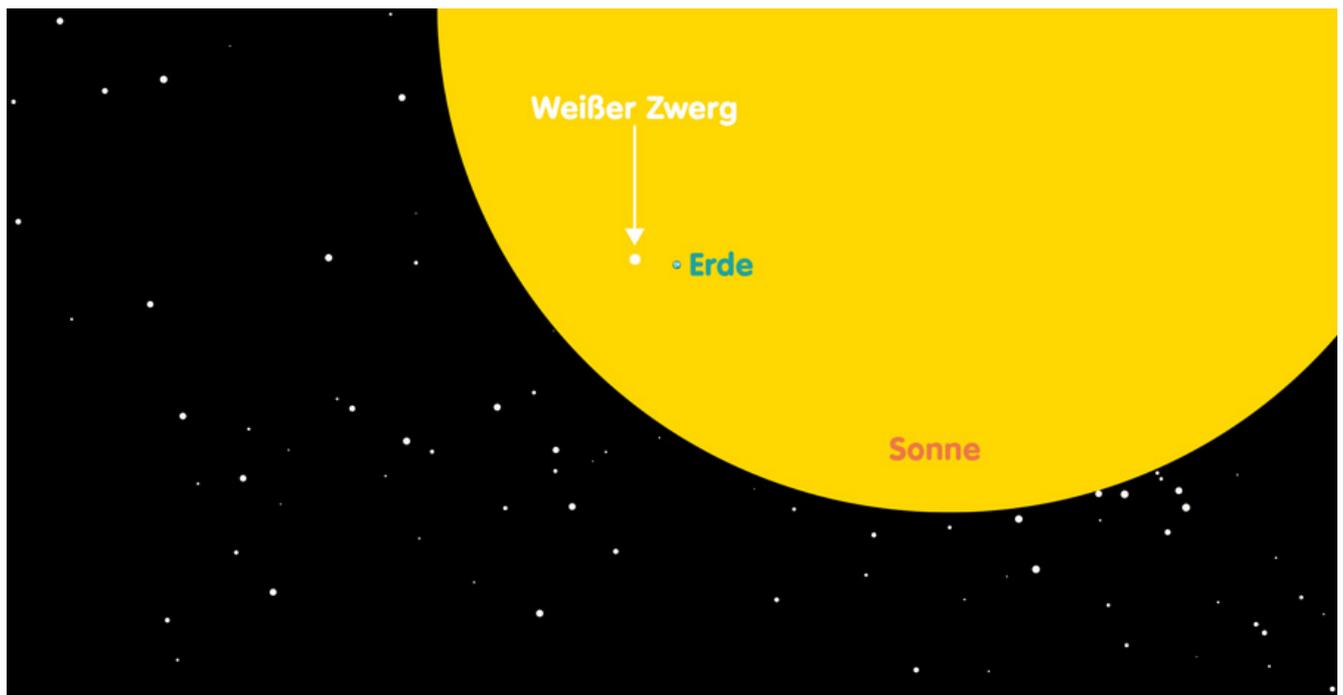
Die Gravitations-Rotverschiebung wurde erstmals in irdischen Versuchen gemessen, und zwar in den Jahren

1960-65 von Pound, Rebka und Snider von der Universität Harvard. Die Messung wurde an Gammastrahlen vorgenommen, die von [Atomkernen](#) ausgesandt und absorbiert wurden. Auch für Sonnenlicht ist die Gravitations-Rotverschiebung nachgewiesen worden. Allerdings sind die Messungen aufgrund der Gasbewegungen an der Sonnenoberfläche nicht sehr genau: Wann immer Licht von einer bewegten Quelle abgestrahlt wird, kommt eine von der Bewegung abhängige Frequenzverschiebung ins Spiel, der so genannte [Dopplereffekt](#). Bei der Sonne ist der Dopplereffekt aufgrund der sich bewegenden Gase größer als die Gravitations-Rotverschiebung, die das Licht erfährt, wenn es im Gravitationsfeld der Sonne nach außen läuft.

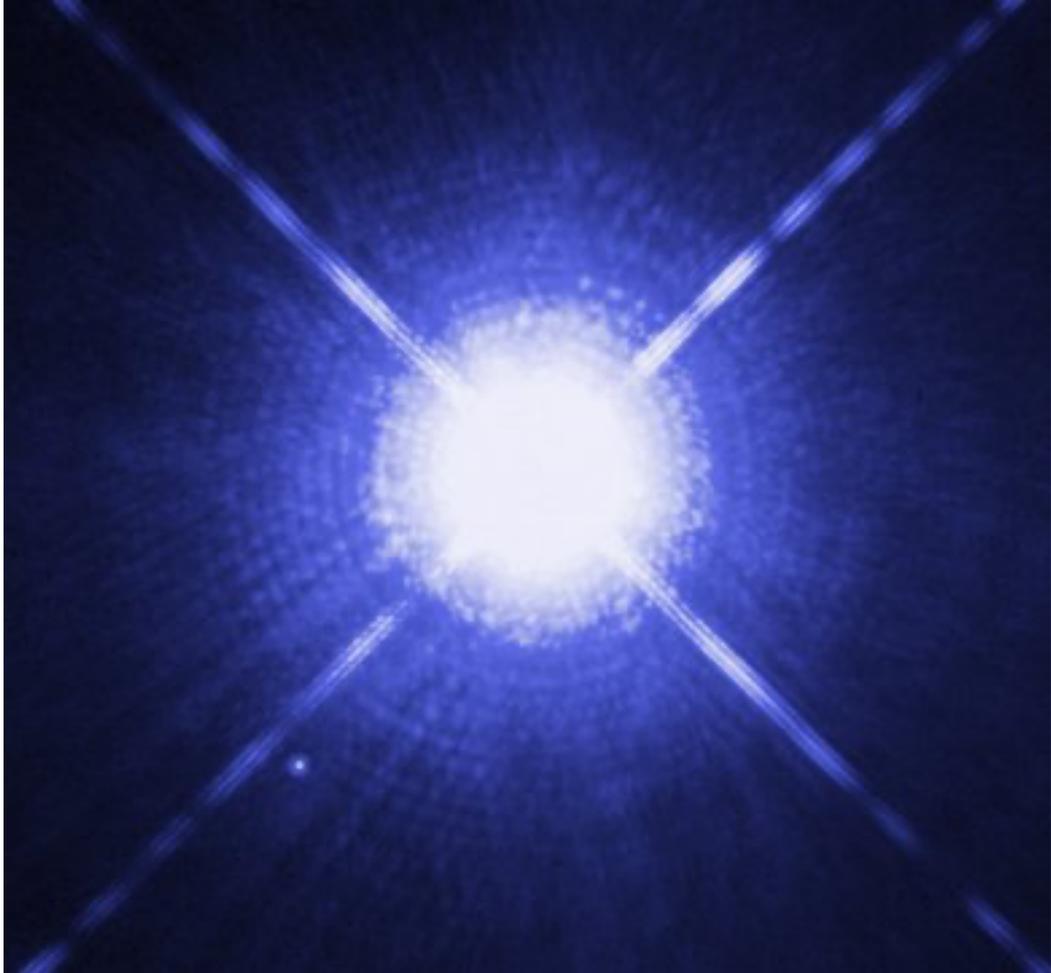
Gravitations-Rotverschiebung in Weißen Zwergsternen

Gemäß der Vorhersagen ist die Rotverschiebung von Licht, das von der Oberfläche eines massereichen Objekts zu einem entfernten Beobachter läuft, proportional zur Masse des Objekts, geteilt durch seinen Radius. Damit sind die so genannten [Weißen Zwergsterne](#), die sich bilden, wenn Sterne niedriger Masse (wie unsere Sonne) ihren Kernbrennstoff erschöpft haben, interessante Beobachtungskandidaten: Ein Weißer Zwerg hat ungefähr die gleiche [Masse wie die Sonne](#), aber einen um den Faktor 100 kleineren Radius.

Die folgende Abbildung zeigt die relativen Größen unserer Sonne, der Erde, und eines Weißen Zwergsterns. Die Sonne ist in diesem Maßstab so groß, dass sie nicht ganz auf das Bild passt:



Dementsprechend ist die Rotverschiebung für Weiße Zwerge viel größer als für die Sonne – einige Zehntausendstel anstatt einiger Millionstel der Wellenlänge. Der bekannteste Weiße Zwerg ist Sirius B, Begleiter des Sterns Sirius, den einige Leser bereits mit dem bloßen Auge gesehen haben dürften. Sirius B ist nicht mit dem bloßen Auge sichtbar, kann aber mit Teleskopen beobachtet werden. Das folgende Bild stammt vom [Weltraumteleskop Hubble](#); Sirius B ist der kleine Fleck links im Bild. Die kreuzförmige Struktur und der Ring um Sirius B sind Artefakte, die durch die Teleskopoptik zustande kommen:



[Bild: NASA, ESA, H. Bond (STScI) und M. Barstow (Univ. of Leicester)]

Bereits in den 1920er Jahre wurde erkannt, dass Sirius B einen sehr kleinen Radius hat, und eine Reihe von Wissenschaftlern, insbesondere Walter S. Adams vom Mount Wilson-Observatorium, versuchten, die Gravitations-Rotverschiebung zu messen. Das Ergebnis von Adams entsprach jedermanns Erwartungen, und so dauerte es Jahrzehnte, bis irgendjemand Notiz davon nahm – und sich darüber beschwerte, dass rund die Hälfte des Lichtes, das Adams gemessen hatte, Streulicht des deutlich helleren Sirius A war.

Der scheinbare Abstand von Sirius A und B ändert sich von Jahr zu Jahr, während die Sterne einander umkreisen. Zwischen 1930 und 1950 standen die beiden so dicht beieinander, dass keinerlei Messungen möglich

waren. Die erste korrekte Messung der Rotverschiebung dürfte die von Daniel M. Popper in den 1950er Jahren gewesen sein. Die Genauigkeit der Messung wurde durch Jesse L. Greenstein und seine Kollegen mit Hilfe des 200 inch (5 m)-Teleskops auf dem Mount Palomar im Jahre 1970 noch einmal deutlich verbessert. Das Ergebnis stimmte mit der Allgemeinen Relativitätstheorie (beziehungsweise dem Äquivalenzprinzip) überein.

Die Gravitations-Rotverschiebung als astronomisches Werkzeug

Der moderne Grund dafür, Einstein-Rotverschiebungen für das Licht Weißer Zwerge zu messen, ist, dass wir mit ihrer Hilfe unser Verständnis dieser ausgeglühten Sternleichen auf die Probe stellen können, denn in ihrem Innerem sind ganz andere physikalische Gesetze wichtig als im Inneren unserer Sonne oder anderer normaler Sterne. Aus der Gravitations-Rotverschiebung lässt sich das Verhältnis zwischen der Masse des Sterns und seinem Radius bestimmen, M/R . Eine weitere Größe, die sich aus der Analyse von Sternspektren ergibt, ist die Schwerebeschleunigung an der Oberfläche des Sterns (auf der Erdoberfläche beträgt die Schwerebeschleunigung 9.81 m/s^2 – die Beschleunigung, die ein frei fallender Körper nahe der Erdoberfläche erfährt). Daraus lässt sich das Verhältnis der Objektmasse zum Quadrat seines Radius bestimmen, M/R^2 . Aus der Kombination der beiden Größen lassen sich

sowohl die Masse M des Objekts als auch sein Radius R berechnen.

Allerdings treten dabei einige Probleme auf. Erstens muss bekannt sein, wie sich der Weiße Zwerg durch den Raum bewegt. Diese Bewegung führt schließlich zu einer eigenen Wellenlängenverschiebung aufgrund des [Dopplereffekts](#). Will man die Gravitations-Rotverschiebung aus den gemessenen Wellenlängen des Sternenlichts bestimmen, dann muss man zunächst wissen, wie diese Wellenlängen durch den Dopplereffekt verändert worden sind.

Für Weiße Zwerge, die als Teil eines Doppelsternsystems einen normalen Stern umkreisen (wie etwa Sirius), und für Sterne, die Teil eines Sternhaufens wie z.B. der Hyaden sind, reichen die Beobachtungsdaten aus, um die Bewegung des Sterns und damit die Dopplerverschiebung zu bestimmen. Die Alternative besteht darin, statistisch vorzugehen und die Daten einer Vielzahl beobachteter Objekte zu bestimmen, die über den ganzen Nachthimmel verteilt sind. Enthält die Stichprobe eine hinreichend große Anzahl an Sternen, werden sich einige davon auf den Beobachter zu bewegen, andere vom Beobachter weg. Berechnet man die durchschnittliche Frequenzverschiebung dieser Sterne, dann werden sich die Dopplerverschiebungen ungefähr herausmitteln, und was übrig bleibt, ist die Gravitations-Rotverschiebung.

Das zweite Problem betrifft die „Spektrallinien“, die charakteristischen Maxima oder Minima der Lichtaussendung. Astronomen verwenden sie, um Wellenlängenverschiebungen festzustellen – diese Verschiebungen lassen sich daran ablesen, wie sich die Position der Spektrallinien verändert hat. Idealisiert betrachtet, entspricht jede Wellenlänge nur einer einzigen charakteristischen Frequenz. In Wirklichkeit sind die Spektrallinien aufgeweitet und überdecken so einen etwas größeren Frequenzbereich. Dafür sind mehrere Effekte verantwortlich, von kleinen Dopplerverschiebungen aufgrund von Gasbewegungen bis hin zur Wechselwirkung der Atome des Gases untereinander. Aufgrund der hohen Schwerebeschleunigung an der Oberfläche Weißer Zwerge sind ihre Spektrallinien bis zu hundert Mal breiter als bei normalen Sternen. Derart breite Linien erschweren die genaue Bestimmung der Frequenzverschiebungswerte. Weitere Effekte, etwa die Streuung von Licht in den oberen Atmosphärenschichten der Sterne, verschärfen das Problem. Und überhaupt leuchten diese Sterne nur äußerst schwach.

Ergebnisse von Untersuchungen an Weißen Zwergen

Die erste Stichprobe von Spektren Weißer Zwerge, die groß genug für eine statistische Untersuchung war, stellte Greenstein am Palomar-Observatorium in den

1950er und 1960er Jahren zusammen – freilich für einen anderen Zweck; Greensteins Hauptinteresse galt der chemischen Zusammensetzung von Sternen. Die Aufgabe, die Gravitations-Rotverschiebung zu bestimmen, wurde 1965 einer Doktorandin, Virginia Trimble, als Forschungsprojekt in ihrem zweiten Studienjahr übergeben – zum Teil, weil angenommen wurde, eine solche Auswertung könnte unmöglich funktionieren.

Das wichtigste Ergebnis von Trimbles Forschungsarbeit war demnach vielleicht, dass sich die Aufgabe doch als lösbar erwies. Außerdem lagen die auf diese Weise bestimmten Massen, abgeleitet aus den beobachteten Rotverschiebungen (M/R) und Modellen für den Zusammenhang von M und R , die sich aus der Physik sehr dichter Materie ergeben, zwischen den bereits bekannten Werten: den 0,4 Sonnenmassen des Weißen Zwergs „40 Eri B“ (Begleiter des Sterns 40 Eridani im Sternbild Fluss Eridanus) und den 1,0 Sonnenmassen des Sirius B. Die Massen von 40 Eri B und Sirius B lassen sich ableiten, da man die Umlaufbahn dieser Sterne um ihre Begleiter kennt. Zudem ergaben Trimbles Daten, dass die Massen der vergleichsweise jungen Weißen Zwerge im Sternhaufen Hyaden etwas größer sind als der Durchschnitt. All diese Ergebnisse sind auch beim heutigen Wissensstand noch gültig.

Wenn Astronominnen und Astronomen einen Wert für die Gravitations-Rotverschiebung angeben, ist dies

üblicherweise eine Geschwindigkeit. Dabei handelt es sich schlicht um die Geschwindigkeit, mit welcher sich ein Körper von uns weg bewegen müsste, damit der Dopplereffekt eben diese Rotverschiebung erzeugte. In der Palomar-Studie betrug die durchschnittliche Rotverschiebung der Weißen Zwerge rund 53 km/s, entsprechend einer durchschnittlichen Masse von 0,75 [Sonnenmassen](#). Der Begleiter von 40 Eridani hatte dagegen lediglich eine Rotverschiebung von 23 km/s, entsprechend seiner bekannterweise kleineren Masse. In den 1980er Jahren maßen Koester, Stauffer und Wegner unabhängig voneinander die Gravitations-Rotverschiebungen weiterer Sterne (zusätzlich zu den 80, die Greenstein und Trimble untersucht hatten), und fanden eine etwas geringere Durchschnitts-Rotverschiebung von 44 km/s, entsprechend einer etwas kleineren Durchschnittsmasse von etwa 0,65 Sonnenmassen.

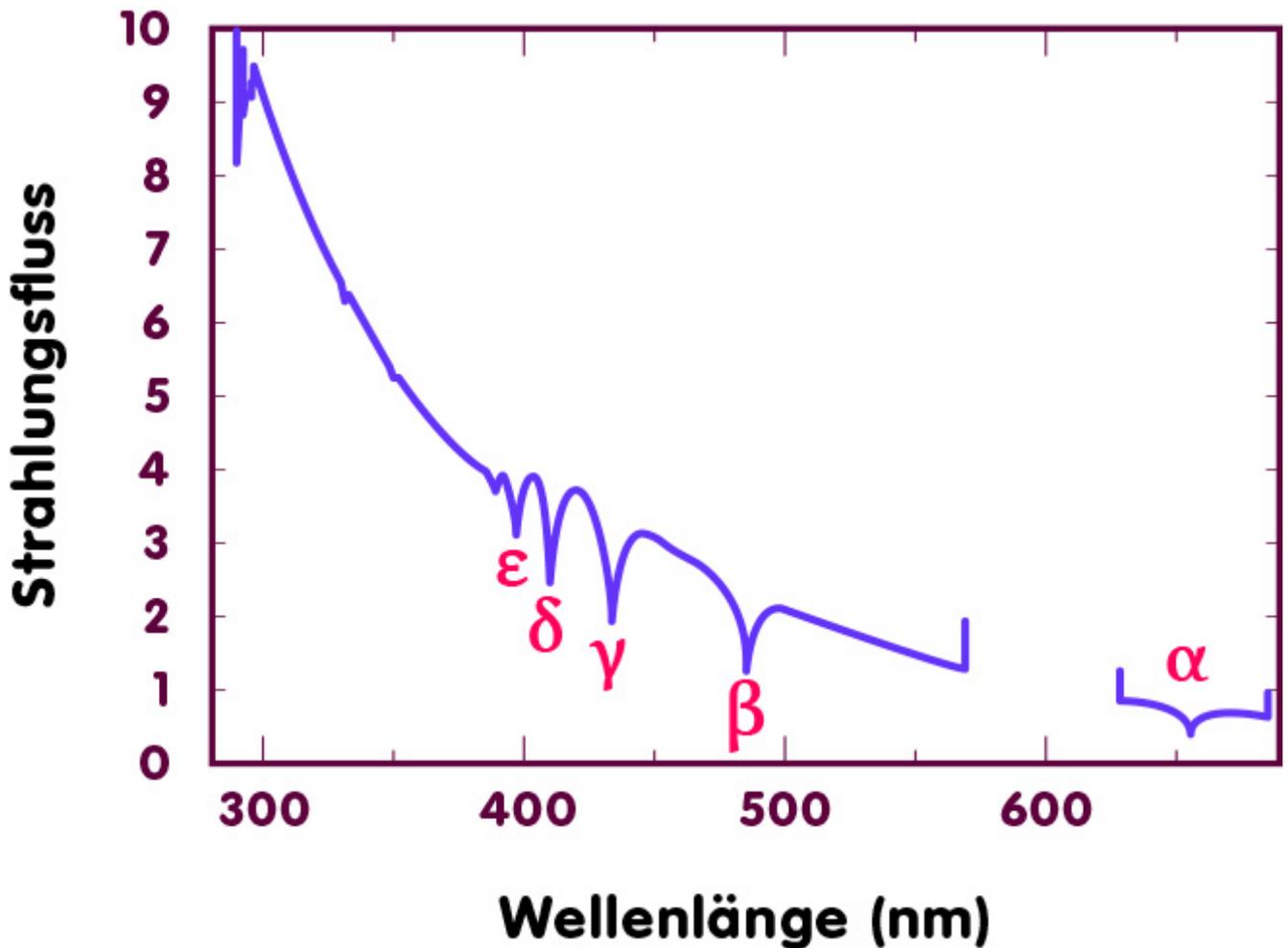
Das Hubble-Weltraumteleskop peilt Sirius an

Zweifellos stellen die Gravitations-Rotverschiebungen, die Greenstein und seine Kollegen 1971 veröffentlichten, ein sehr wichtiges Ergebnis dar. Andererseits war die Messunsicherheit der Ergebnisse – insbesondere aufgrund des geringen Abstandes von Sirius B und A – zu groß, als dass es möglich gewesen wäre, anhand dieser Daten zu entscheiden, welches der mehreren

konkurrierenden Modelle der inneren Struktur Weißer Zwerge der Wirklichkeit am nächsten kommt. Auch die Qualität der fotografisch festgehaltenen Spektren, aus denen die anderen wichtigen physikalischen Parameter bestimmt wurden (wie Sterntemperatur und die Schwerebeschleunigung an der Sternoberfläche) ließ zu wünschen übrig. Seit der Pionierarbeit von Greenstein hat sich vieles geändert. Insbesondere ist die beobachtende Astronomie ins Elektronikzeitalter eingetreten. Moderne Kameras sind deutlich empfindlicher als fotografischer Film, sie können dementsprechend detaillierte Informationen festhalten, und die von ihnen aufgenommenen Daten können direkt im Computer analysiert werden. Trotz dieser Verbesserungen blieb die Anwesenheit von Sirius A ein Problem – zumindest bis zum Aufkommen moderner weltraumbasierter Teleskope wie des Hubble-Weltraumteleskops (kurz „Hubble“).

Von seinem Beobachtungsstandort oberhalb der Erdatmosphäre kann das Hubble-Weltraumteleskop deutlich schärfere Bilder schießen, als sie bodengebundenen Teleskopen üblicherweise zugänglich sind. Damit lässt sich das Streulicht von Sirius A, das die Messungen an Sirius B verfälscht, dramatisch reduzieren. Allerdings war die relative Lage von Sirius A und B während des Großteils der Karriere von Hubble recht ungünstig: Hubble nahm 1990 den Beobachtungsbetrieb auf, und im Jahre 1993 erreichte der Abstand von Sirius A und Sirius B am Nachthimmel seinen Minimalwert. Nun,

da sich die Sterne wieder etwas voneinander entfernt haben und genaue Hubble-Bilder des Systems vorliegen, ist es wieder möglich geworden, Sirius B direkt zu beobachten. Die folgende Abbildung zeigt zwei Spektren, die 2004 mit dem „Space Telescope Imaging Spectrograph“ (STIS) des Hubble aufgenommen wurden:



[Bild nach Abb. 4 in Barstow et al., *Mon.Not.Roy.Astron.Soc.* 362 (2005) 1134-1142.]

Die zwei [Spektren](#) wurden in verschiedenen Beobachtungsmodi des Instruments aufgenommen. Rechts ist eine Spektrallinie – ein deutliches Minimum der Kurve – namens H α zu sehen (H steht dabei für Hydrogenium, also Wasserstoff). Dieser Teil des Spektrums wurde mit vergleichsweise hoher Auflösung aufgenommen, und für die Messung der Rotverschiebung

verwendet. Der linke Teil der Kurve wurde bei geringerer Auflösung aufgenommen; er wurde verwendet, um die Temperatur des Sterns und die Schwerebeschleunigung an seiner Oberfläche zu bestimmen. Alle eingezeichneten Linien sind so genannte „Balmer-Linien“, eine bestimmte Serie von Spektrallinien des Wasserstoffs.

Die neu bestimmte Rotverschiebung für Sirius B von 80.42 ± 4.83 km/s, die Martin Barstow und seine Kollegen veröffentlicht haben, ist sehr viel genauer als und gut vereinbar mit den früheren Messungen. Kombiniert man diese Werte mit den Temperatur- und Schwerebeschleunigungsmessungen aus dem Hubble-Spektrum, lassen sich Sternmasse und Radius von Sirius B mit nie zuvor erreichter Genauigkeit ableiten: Die Masse beträgt 0.978 ± 0.005 Sonnenmassen, der Radius 0.00864 ± 0.00012 Sonnenradien. Mit Hilfe dieser genauen Messwerte lassen sich die verschiedenen Modelle zur inneren Struktur Weißer Zwerge effektiv auf die Probe stellen.

Messungen, Modelle, Massen

Es gibt nicht für viele Sterne Messungen, die so genau sind wie bei Sirius B. Die meisten bekannten Weißen Zwerge sind nicht Teil eines Doppelsterns, und ihre Massen können nur abgeschätzt werden. Für solche Abschätzungen werden zum einen genaue Untersuchungen der Sternspektren benötigt, die einen Wert für die Schwerebeschleunigung und damit für M/R^2

liefern. Diese Informationen kombiniert man mit dem Zusammenhang von M und R, der sich aus Modellen für die innere Struktur Weißer Zwerge ergibt. Zusammengenommen liefern Messwerte und Modelle dann die Werte für die einzelnen Größen M und R. Die mittels direkter Messung gewonnenen Werte für Sirius B sind deswegen so wichtig, weil sie die Zuverlässigkeit der bei diesen Abschätzungen benutzten Modelle bestätigen.

Was also sind die typischen Massen Weißer Zwerge? Die Antwort ist nicht so einfach, wie es den Anschein haben mag, da die Exemplare mit den kleinsten und größten Massen in den üblichen Durchmusterungen oft übersehen werden: Diejenigen mit den kleinsten Massen nehmen deutlich schneller an Helligkeit ab als Weiße Zwerge mit größeren Massen, und diejenigen mit besonders großen Massen sind von Anfang an nicht so hell wie Durchschnittszwerge. Berücksichtigt man diese Auswahleffekte bei der statistischen Auswertung, dann liegt die durchschnittliche Masse Weißer Zwerge bei rund 60% einer Sonnenmasse. Allerdings gibt es eine beträchtliche Anzahl von Weißen Zwergen mit Massen bis hinunter zu 0,4 oder hinauf zu 1,3 Sonnenmassen. Dieser letzte Wert liegt bereits sehr nahe an dem für stabile Weiße Zwerge erlaubten Maximalwert, der so genannten [Chandrasekhar-Masse](#).

Weitere Informationen

Kolophon

Virginia Trimble

ist Professorin für Physik an der University of California, Irvine, und Astronomin am Observatorium Las Cumbres. Ihre Forschungsthemen sind die Struktur und Evolution von Sternen, Galaxien, und des Universums als Ganzem, sowie die Wissenschaftler, die sich damit befassen. Für *Einstein Online* hat sie (zusammen mit Martin Barstow) ein Thema wieder aufgegriffen, das sie während ihrer Doktorandenzeit erforscht hat: [Weiße Zwerge und die Gravitations-Rotverschiebung](#).

Martin Barstow

ist Pro Vice Chancellor, Professor für Astrophysik und Direktor des Institute of Space and Earth Observation an der Universität Leicester. Seine Forschungsthemen sind heiße Weiße Zwerge, das interstellare Medium, und die Entwicklung und der Einsatz von Detektoren, mit denen sich diese Objekte beobachten lassen. Zusammen mit Virginia Trimble hat er das Vertiefungsthema [Weiße Zwerge und die Gravitations-Rotverschiebung](#) geschrieben.

Zitierung

Zu zitieren als:

Virginia Trimble, Martin Barstow, "Weiße Zwerge und Gravitations-Rotverschiebung" in: *Einstein Online* **Band 04** (2010), 04-1102