

<b>Zeitschrift:</b>	Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
<b>Herausgeber:</b>	Schweizerische Astronomische Gesellschaft
<b>Band:</b>	- (1960)
<b>Heft:</b>	68
 <b>Artikel:</b>	Sterbende Sterne
<b>Autor:</b>	Greenstein, Jesse L.
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-900114">https://doi.org/10.5169/seals-900114</a>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 31.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

## STERBENDE STERNE

Von JESSE L. GREENSTEIN

Mount Wilson und Palomar Observatorien, Kalifornien \*

Unter den Zehntausenden von Sternen in den nächstliegenden Teilen unserer Milchstrasse finden sich um die hundert, deren Feuer ausgegangen ist. Einst strahlten sie so hell wie jene, die wir heute am Himmel sehen. Einige hatten «normale» Grösse und die Leuchtkraft von Hauptreihen-Sternen, die heller sind als die Sonne; andere waren Riesensterne, mit Durchmessern und Helligkeiten, welche jene der Sonne weit übertrafen. Nun sind sie am Ende ihres Weges angelangt. Ihr Brennstoff ist aufgebraucht. Die einwärtsgerichtete Gravitationskraft, der nicht mehr der auswärtsgerichtete und von der hohen Temperatur aufrechterhaltene Gasdruck entgegenwirkt, hat zur Schrumpfung des Durchmessers geführt. Die gewaltige Masse des einstigen Sternkörpers ist auf das Volumen der Erde und noch kleiner zusammengepresst worden. Dabei hat schliesslich die Dichte den unvorstellbaren Wert einer Tonne pro Kubikzentimeter und mehr angenommen. Mit ihrem verdämmernden Licht, feststellbar nur mit den Instrumenten und Methoden der modernen Astronomie, strahlen sie den Rest ihrer einstigen Wärme hinaus in die kalten Tiefen des Raumes.

Diese sogenannten *weissen Zwerge* bergen die Schlüssel zur Antwort auf manche interessante astrophysikalische Frage in sich. Bis heute beruhten allerdings unsere spärlichen Kenntnisse fast ausschliesslich auf theoretischen Ueberlegungen. Ungefähr 3% aller Sterne unserer Milchstrasse sind weisse Zwerge, wir dürfen sie also als gewöhnlichen Sterntyp behandeln. Ihre Leuchtkraft ist jedoch so klein, dass nur wenige Hunderte erkannt und davon nur 80 eingehend beobachtet worden sind. Die Untersuchung ihrer Farbe und der in ihren Spektren vorhandenen Linien eröffnet neue Einblicke in den Aufbau der Elemente in jüngeren Sternen. Die ausserordentliche Massendichte stellt einen Zustand der Materie dar, den wir kaum je in irdischen Laboratorien nachahmen können. Die weissen Zwerge haben aber eine viel allgemeinere

---

\*) Diese Arbeit erschien im *Scientific American*, Januar 1959. Herausgeber und Autor haben uns freundlicherweise die Genehmigung zur Uebersetzung und Veröffentlichung erteilt. Prof. Greenstein hat die Uebersetzung geprüft und ergänzt, wofür ihm auch an dieser Stelle bestens gedankt sei.

Bedeutung: Sie sind ein Hinweis auf die Tatsache, dass die Gesetze der Thermodynamik, welche das Geschehen in der winzigen Welt unseres Planeten beherrschen, auch im unaufhaltsamen Ablauf der Lebensgeschichte der Sterne gelten.

Ein Physiker hat einmal in etwas unehrerbietiger Weise die thermodynamischen Gesetze folgendermassen umgedeutet: 1. man kann nichts gewinnen; 2. man kann Gerades nicht gerade brechen; 3. eine Situation verschlechtert sich, bevor sie sich bessert; 4. wer sagt, dass sie je bessert?

Auf die Vorgänge in den Sternen übertragen, erinnert das erste Gesetz daran, dass die Sterne keine Energie erzeugen, sondern sie nur von einer Form in die entsprechende Menge einer andern Form umwandeln: die im Gravitationspotential und in der durch thermonukleare Reaktionen umsetzbaren Masse enthaltene Energie wird in Strahlungsenergie umgewandelt. Die Sterne können also niemals mehr Energie abgeben, als jene, mit der sie begonnen haben. Ein stabiler Stern, in welchem sich die Schwere-Kontraktion und der durch die Wärme erzeugte innere Druck jederzeit das Gleichgewicht halten, kann sehr lange von der thermonuklearen Energie leben – 10 Milliarden Jahre im Falle der Sonne.

Das zweite Gesetz sagt uns, dass dies nicht ewig so weitergeht. Ein Stern kann niemals die Energie zurückgewinnen, die er in die Tiefen des Raumes hinausgestrahlt hat; der Ablauf seiner Entwicklung ist nicht umkehrbar. Indem er den Wasserstoff, den Hauptteil seiner Substanz, aufbraucht, beginnt auch sein thermonuklearer Ofen zu flackern. Die Schwere-Kontraktion stellt das Gleichgewicht durch Umwandlung von potentieller in Wärme-Energie (Kompression) wieder her. Dabei wird aber die Dichte der Sternmaterie erhöht; das neue Gleichgewicht zwischen Gasdruck, Wärme-Ableitung, Energieproduktion und Strahlungsverlust verändert die innere Struktur. Der Stern wird heller, die äussere Hülle bläht sich auf, und die Stern-Entwicklung nimmt ihren Anfang, für die hellen Sterne früher, später für die schwächeren.

Wenn der Stern in die Schlussphase seines Daseins eintritt, schrumpft er zur letzten stabilen Form, dem weissen Zwerg, zusammen. Das dritte und vierte Gesetz der Thermodynamik kommen jetzt zur Geltung. Das dritte Gesetz besagt, dass der Stern schlussendlich die Temperatur seiner Umgebung, des Weltraumes, annimmt, und das vierte, dass er fortan weder Licht noch Wärme abgibt. In diesem Endpunkt ist aus dem

weissen ein schwarzer Zwerg geworden. Da wir nicht imstande sind, schwarze Zwerge zu beobachten, sofern es solche gibt, wollen wir sie hier ausser Betracht lassen. Jedesfalls bleibt ein Stern während Milliarden von Jahren im Stadium des weissen Zwerges. Im folgenden befassen wir uns mit der Struktur und den Bedingungen in ihrem Innern.

Die Materie von der Dichte in weissen Zwergen ist sowohl vom astronomischen als auch vom irdischen Standpunkt aus sehr sonderbar. Ein Stern wie die Sonne hat eine Dichte von rund einem Gramm pro Kubikzentimeter, ungefähr wie Wasser. Die Astrophysiker behandeln die Sonnenmaterie als ein Gas, dessen Bestandteile sich nach Wahrscheinlichkeitsgesetzen frei bewegen. Bei der hohen Temperatur im Sonneninnern ist der Wasserstoff zu 97 % ionisiert; die Elektronen sind von den Atomen abgestreift, sodass nur noch die nackten Wasserstoff-Kerne, die Protonen, übrigbleiben. Damit verliert jedes Wasserstoff-Atom sein Volumen, dessen Durchmesser rund 10000-mal jener des Protons ist. Somit besteht auch die Sternmaterie, hauptsächlich Protonen, weitgehend aus leerem Raum. Die winzigen Protonen und Elektronen können sich ebenso frei in allen Richtungen mit beliebiger Geschwindigkeit bewegen wie die Moleküle in einem stark verdünnten Gas.

Andrerseits kann so in einem weissen Zwerg die Masse von der Grösse der Sonne (332000 Erdmassen) auf das Volumen der Erde (ein Millionstel Sonnenvolumen) zusammengepackt werden. Die Dichte wächst dann auf 1000 kg pro Kubikzentimeter. Auch wenn der weisse Zwerg sich unter die Ionisationstemperatur abgekühlt hat, bleiben die Atome bei dem gewaltigen Druck in Kern und Elektronen zerteilt. Immer noch berühren sich die einzelnen Teilchen nicht; immer noch ist leerer Raum zwischen ihnen. Weil aber jedes nur noch einen beschränkten Platz zur Verfügung hat, ist sowohl seine Bewegungsgrösse (Impuls) als auch sein Ort eng umschrieben. Das Paulische Ausschliessungsprinzip der Physik sagt aus, dass niemals zwei Partikel das gleiche Energieniveau besetzen können; damit sind aber die räumlichen Koordinaten und die Bewegung aller energieärmeren Teilchen festgelegt. Die Elektronen, als die leichtesten Teilchen, sind in Raum und Geschwindigkeit gewissermassen festgefroren. Zusammenstösse können nicht beliebige Impulsänderungen bewirken; die Elektronen werden höchstens in unbesetzte Energiestufen geworfen. Einige wenige Elektronen, welche der Lichtgeschwindigkeit nahekommen und die sogenannte Fermi-Schwelle übersteigen, sind noch wie Kernteilchen freier Bewegung fähig. Das Gas befindet sich nunmehr im degenierten Zustand.

Wir verdanken Subrahmanyam CHANDRASEKHAR, dem indischen Astrophysiker vom Yerkes Observatorium, eine schöne und vollständige Theorie der stabilen entarteten Gaskugel. Merkwürdigerweise nimmt der Radius einer solchen bei zunehmender Masse ab (Abb. 1). Nach den Gesetzen für das entartete Gas kann für eine gegebene Dichte der Gasdruck berechnet werden, der nur in einem genügend zusammengebrochenen weissen Zwerg das Gewicht der äusseren Schichten zu tragen vermag. Dieser ungewohnte Zusammenhang zwischen Masse und Radius wird nicht wie in andern Sternen von Temperatur, Leuchtkraft und Energieproduktion beeinflusst (Abbildung 2). Die Masse, und damit auch der Radius, ist in der Theorie nur durch die chemische Zusammensetzung des Sterns bestimmt. Für jede chemische Zusammensetzung ist eine obere Massengrenze festgelegt. Z. B. ergibt sich aus der Theorie für einen nur aus Wasserstoff bestehenden Stern eine grösste mögliche Masse von 5.5 Sonnenmassen. Andererseits dürfte die Masse eines nur aus schwereren Elementen bestehenden Sterns 1.4 Sonnenmassen nicht übersteigen. Ein schwererer Stern müsste Masse verlieren oder eine Katastrophe durchmachen, bevor er weisser Zwerg wird. Keine der wenigen bisher bekannten Massen weisser Zwerge liegt über 1.4 Sonnenmassen, eine wichtige Bestätigung der Ansicht, dass diese Sterne ihren Wasserstoff, den wichtigsten thermonuklearen Brennstoff, aufgebraucht haben.

Das theoretische Bild des weissen Zwergsterns, durch andere Forscher erweitert, zeigt uns die bestehenden Schwierigkeiten der Prüfung durch die Beobachtung. Der dichte degenerierte Kern des Sterns ist umgeben von einer scharf begrenzten Hülle von rund 100 km Dicke; diese besteht, infolge des geringeren Druckes, aus nicht degenerierter Materie. Ueber diese Hülle lagert sich eine wenige Dutzend Meter mächtige Atmosphäre. Sie ist der einzige Teil des Sterns, der spektroskopisch untersucht werden kann. Die Spektren der tausende von Kilometern tiefen Atmosphären normaler Sterne geben uns viele Aufschlüsse über die Oberflächentemperatur und die Zusammensetzung der Sternmaterie, ja auch über das Sterninnere. Die zusammengeschrumpfte Atmosphäre eines weissen Zwerges vermag unshingegen kaum Hinweise auf seine übrigen Teile zu geben.

Evry SCHATZMANN vom Institut d'Astrophysique in Paris hat nachgewiesen, dass das Innere und die Hülle der weissen Zwerge nicht gleiche Zusammensetzung haben können. Mangels Durchmischung (Konvektion) schichten sich die Gase im starken Schwerefeld. Der wenige

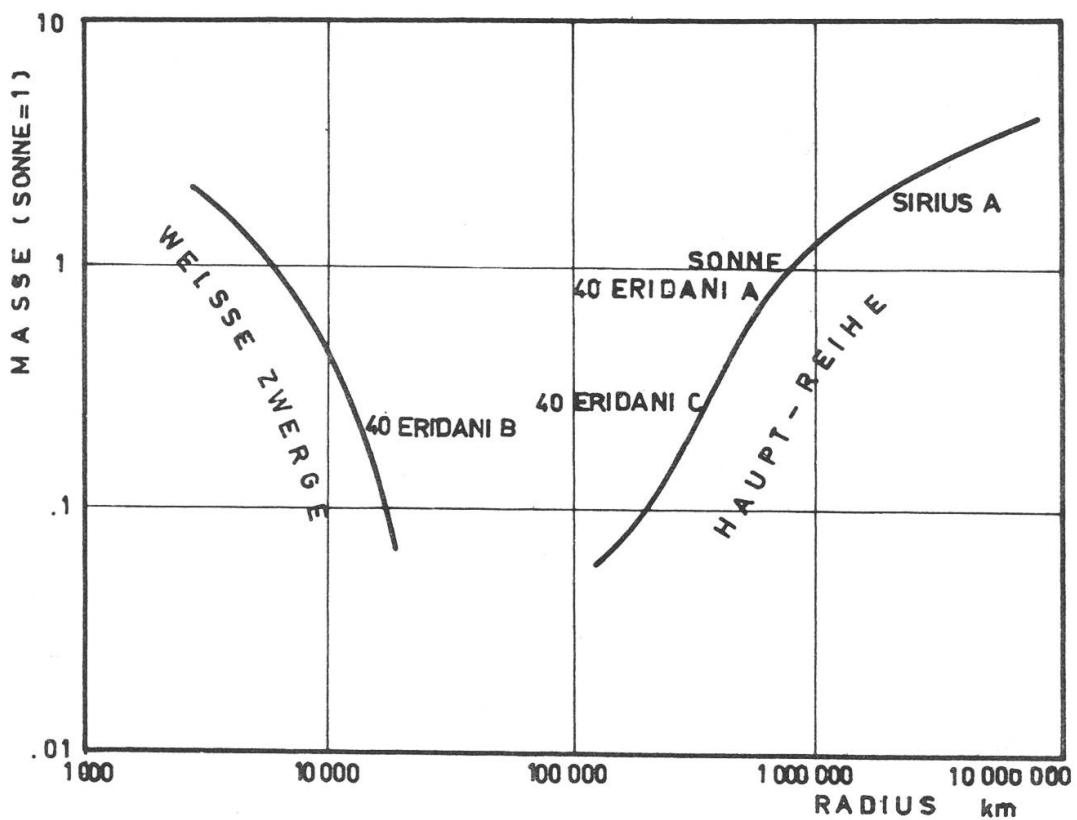


Abbildung 1 - Masse und Radius bei den weissen Zwergen (links) verhalten sich genau entgegengesetzt wie bei den gewöhnlichen Hauptreihensternen (rechts). Die letzteren zeigen mit zunehmender Masse auch zunehmenden Radius; bei den weissen Zwergen nimmt der Radius mit zunehmender Masse ab.

noch vorhandene Wasserstoff wird, seiner Leichtigkeit wegen, an die Oberfläche gepresst, während Helium und die schwereren Elemente gegen das Zentrum hin sinken. Die Elektronen, als leichteste Bestandteile, würden ganz obenauf schwimmen, wären nicht gleichzeitig elektrische Kräfte im Spiel. Die elektrischen Felder und die Kernkräfte in den geschichteten Gasmassen ziehen den Stern noch mehr zusammen, sodass die grösste mögliche Masse eines aus schweren Elementen bestehenden Sterns auf 1.25 Sonnenmassen herabgesetzt wird.

Das verdämmernde Licht, die spärliche Wärme aus ihrem Innern forttragend, hat uns den Standort einiger hundert weisser Zwergen verraten. Der hellste unter ihnen hat die Leuchtkraft von 0.01 Sonnen; der schwächste bekannte weisse Zwerg erreicht nur 0.0001 Sonnenleuchtkraft. Sterne dieser Leuchtkraft können vorläufig nur in Entferungen von weniger als 30 Lichtjahren beobachtet werden. Ihre geringe Helligkeit, zusammen mit unseren theoretischen Kenntnissen ihres innern

Aufbaues, liefert überzeugende Anzeichen dafür, dass sie aufgehört haben, Masse in strahlende Energie umzuwandeln. Selbst wenn die Temperatur 10 bis 30 Millionen Grad nicht übersteigt, würden die thermonuklearen Reaktionen bei der hohen Dichte mit ungeheurer Schnelligkeit ablaufen. Durch die dichte Lagerung der Elektronen würde die Reaktionsgeschwindigkeit noch vergrössert, da diese mit ihrer negativen Ladung die gegenseitige Abstossung der Kerne teilweise aufheben. Die einzige mögliche Erklärung für die geringe Leuchtkraft ist der kleine Anteil von Wasserstoff (0.00001) an der totalen Stern-Masse. Reaktionen, an denen schwerere Elemente – z. B. Kohlenstoff, Sauerstoff, Stickstoff und Neon – beteiligt sind, erfordern höhere Temperaturen als hier auftreten, obschon Helium in grosser Konzentration und unter hohem Druck mit ihnen reagieren kann. Eine Reihe anderer Gründe sprechen hingegen zuungunsten der Wahrscheinlichkeit jeglicher Energie-Erzeugung: In einem normalen Stern ist die Energieproduktion durch Rückkopplung reguliert; bei steigender Temperatur bläht sich der Stern auf und die Reaktionsgeschwindigkeit wird gedämpft. Nicht so in einem degenerierten Gas, wo der Druck von der Temperatur unabhängig ist. Wenn in einem degenerierten Gas eine lokale Aufheizung erfolgte, würde nur die Reaktionsgeschwindigkeit grösser, und der Stern würde explodieren. Es bleibt also die Annahme, dass die vorhandenen weissen Zwerge ihre Kernenergie-Quellen erschöpft haben.

Die geringe Leuchtkraft der weissen Zwerge erschwert die Spektralanalyse ihres Lichtes, und Kenntnisse über weitere Eigentümlichkeiten sind nur äusserst schwer zu gewinnen. Erst 80 solcher Sterne sind eingehend studiert. Mit dem lichtstarken 200-Zoll-Hale-Teleskop von Palomar Mountain habe ich 50 Spektren vom grössten bisher möglichen Masstab untersucht.

Die Spektralanalyse bestätigt mit Sicherheit, dass die weissen Zwerge tatsächlich zwerhaft sind. Der Radius kann aus den Spektren allerdings nur indirekt abgeleitet werden. Sowohl photoelektrische Farbanalyse als auch das Verhalten der Absorptionslinien im Spektrum erlauben die Bestimmung der Temperatur. Die scheinbare Helligkeit zusammen mit der davon unabhängig gemessenen Distanz gibt die absolute Helligkeit, die Leuchtkraft. Temperatur und Leuchtkraft liefern schliesslich die Grösse der leuchtenden Oberfläche und damit den Radius des Sterns. Die Ergebnisse sind äusserst eintönig: die wohlbestimmten Radien liegen sämtliche zwischen 5 000 und 20 000 km, im Gegensatz zu der Streuung bei normalen Sternen, deren Radien 0.1 bis

10 Sonnenradien (zu je 696 000 km) für Hauptreihen-Sterne und bis zu 10 000 für rote Riesen betragen. Der Radius des kleinsten bekannten weissen Zwergs wird auf nur 4500 km geschätzt, einiges weniger als der Erdradius. Dies entspricht sehr nahe dem theoretisch erwarteten Wert. Für diesen Radius errechnet sich eine Masse von 1.2 Sonnen und Zentraldichte von 10 000 kg/cm<sup>3</sup>.

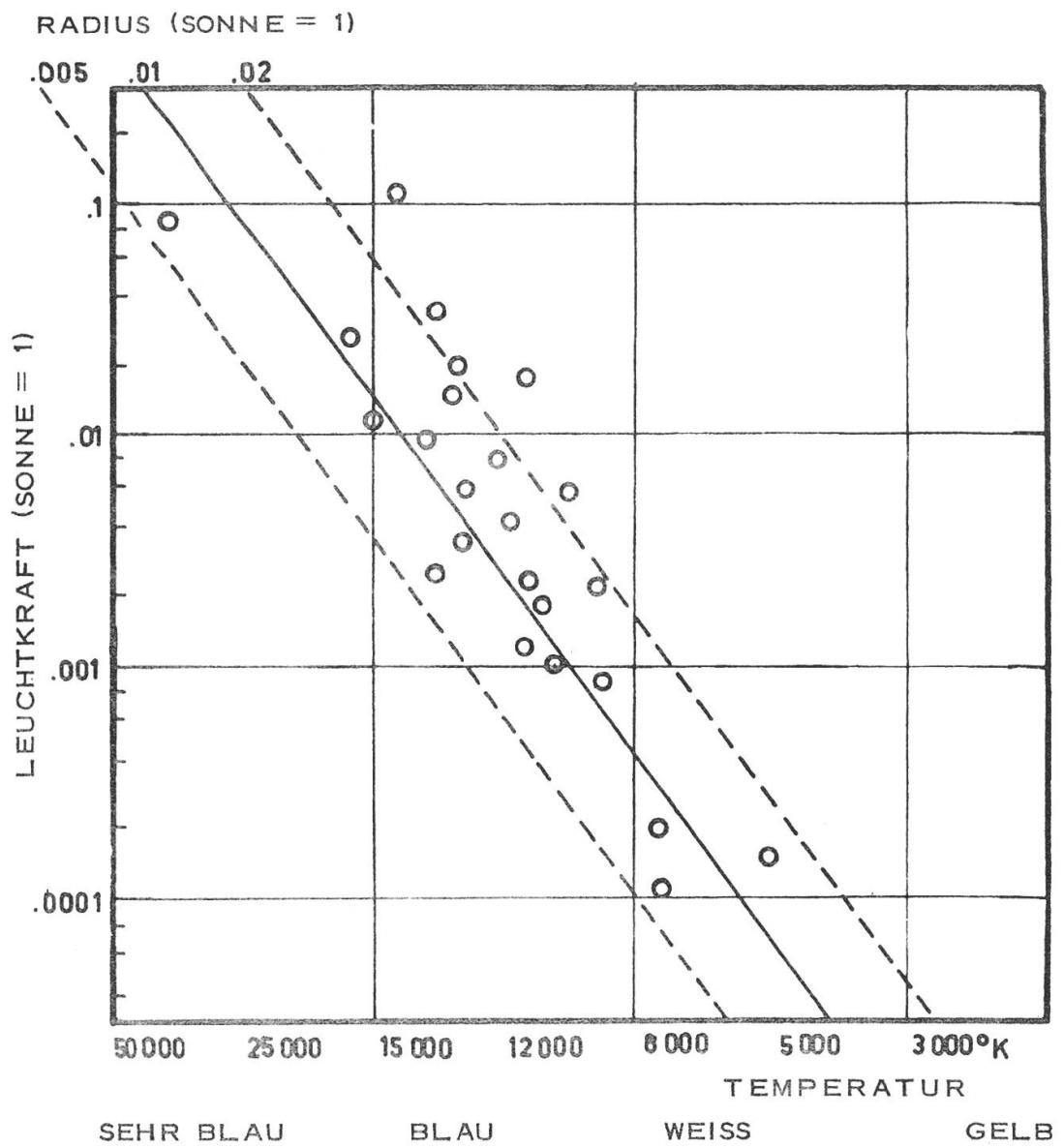


Abbildung 2- Radius und Temperatur weisser Zwerge zeigen keine gegenseitige Abhängigkeit. Sterne verschiedener Radien kommen bei allen Temperaturen vor, wie die eingezeichneten Punkte zeigen. Dies deutet darauf hin, dass sich die Zergsterne ohne weitere Gravitations-Kontraktion abkühlen.

Die Beobachtung bestätigt auch eine der wichtigsten theoretischen Voraussagen, nämlich dass der Radius nicht von der Oberflächentemperatur abhängt (Abbildung 2). Die von uns bearbeiteten Sterne haben Temperaturen von 50 000 bis 4000 °K. Der heisste ist ein blau-weißer Stern in der frühesten Phase der Entwicklung als weisser Zwerg, der kälteste ein schwacher röthlich-weißer Zwerg. Aus der Darstellung in Abbildung 2 ist ersichtlich, dass es Sterne gleichen Radius von beliebiger Temperatur gibt. Da ihre ursprünglichen Massen bestimmt unterschiedlich waren, ist es klar, dass sie mit kleiner Streuung der Radien in der linken oberen Ecke des Diagrammes beginnen und dann ohne weitere Schwere-Kontraktion sich abkühlen, hinab in die rechte untere Ecke.

Leider ist es unmöglich, diesen Radius-Bestimmungen entsprechend zuverlässige Masse-Bestimmungen gegenüberzustellen. Nach den Newtonschen Gesetzen können die Massen aus der beobachteten Bahnbewegung nur für Sterne berechnet werden, die Mitglieder von Mehrfach-Systemen sind. Wir kennen drei solcher Zwerge. Von zweien, Sirius B und Procyon B, liegen wohl zuverlässige Massen vor, nämlich 1 und 0.65 Sonnenmassen; die Hauptsterne, Sirius A und Procyon A, sind jedoch derart hell und nah, dass keines der aufgenommenen Spektren ein wirklich ungestörtes Bild der Zwerge gibt. Daher ist die Messung ihrer Radien immer noch unmöglich.

Von den weissen Zwergen, die Mitglieder von Mehrfach-Systemen sind, ist 40 Eridani am besten untersucht. Dieser Stern ist genügend weit von den anderen Komponenten entfernt, dass gute Spektren erhältlich sind, und doch genügend nahe, dass die Bahnbewegung eine einigermassen gesicherte Massenbestimmung zulässt. Aus dem Spektrum habe ich einen Radius von 10 500 km, 0.016 Sonnenradien, abgeleitet; aus der Gravitationswirkung ergibt sich eine Masse von 0.45 Sonnen. Das theoretische Masse-Radius-Gesetz hätte, in guter Uebereinstimmung, 0.39 Sonnen ergeben. Wenigstens in diesem einzigen vollständig beobachteten System findet so die wohlfundierte Theorie eine kräftige Stütze.

Die Spektren der weissen Zwerge (Abbildung 3) bestätigen ganz allgemein auch die theoretischen Schlüsse bezüglich ihrer chemischen Zusammensetzung. Bei einigen besonderen heissen weissen Zwergen zeigen sie entweder überhaupt keine Wasserstoff-Linien, oder die vorhandenen Linien weisen auf verhältnismässig spärliche Wasserstoff-Reste hin. Verglichen mit den Spektren normaler Sterne, in denen die

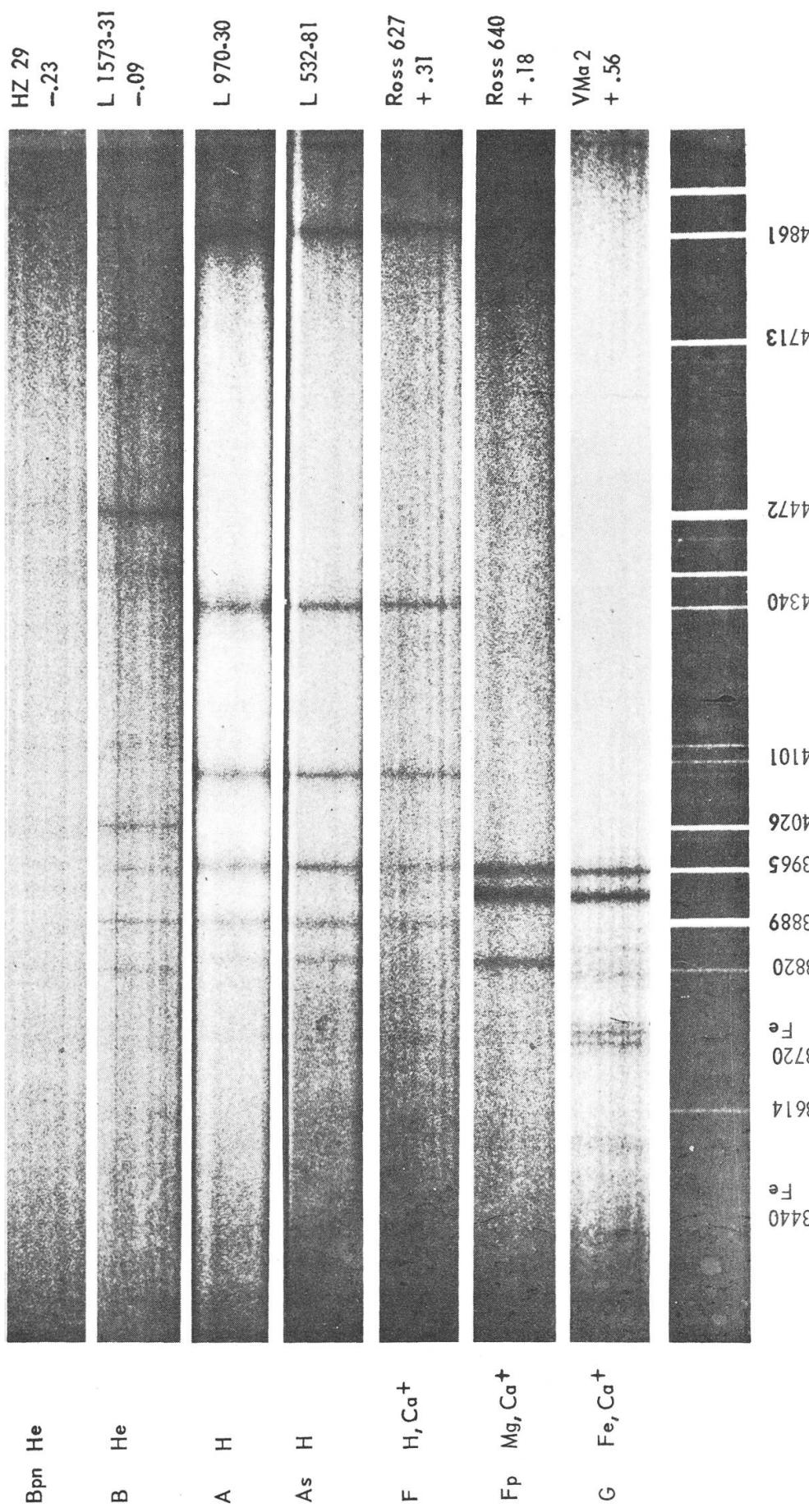


Abbildung 3 - Spektren einiger weißer Zwerg (Typenbezeichnung links aussen, Sternbezeichnung rechts). Die Absorptionslinien nur einiger weniger chemischer Elemente (zweite Kolonne von links) sind darin enthalten. Das unterste Spektrum ist ein Vergleichsspektrum von Helium und Wasserstoff. Im Spektrum vom Typ A (L 970-30) sind die diffusen und in charakteristischer Weise verbreiterten Absorptionslinien zu erkennen.

Wasserstoff-Linien in der Regel kräftig sind, müsste bereits dieser Umstand einige weisse Zwerge als Sondergruppe von Himmelskörpern kennzeichnen. Die Spektren des verbreitetsten Typs (Typ A) zeigen, wenn schon, nur die Wasserstoff-Reste, aber keine schwereren Elemente. Hier sind infolge der Gravitationswirkung alle schweren Elemente, selbst Helium, aus der Atmosphäre ins Stern-Innere gezogen und der Wasserstoff an die Oberfläche gequetscht worden. Bei weissen Zwergen mit Oberflächen-Temperaturen unter  $8000^{\circ}$  verschwinden die Wasserstoff-Linien vollständig, nur einige wenige, Metallen zugeordnete, Linien sind noch sichtbar. Ein derartiger Stern ist Ross 640, dessen Temperatur, wäre überhaupt noch Wasserstoff vorhanden, an und für sich für die Erzeugung von Wasserstoff-Linien genügt. Gewöhnlich lassen die weissen Zwerge kaum wie die normalen Sterne den Zusammenhang zwischen Linienintensität und Temperatur erkennen. Die unterschiedliche Zusammensetzung ihrer Atmosphäre liesse sich wohl als Hinweis auf ihre Vergangenheit deuten. Aus dem Spektrum von Ross 640 können wir schliessen, dass dieser Stern und die andern seiner Art nach Erschöpfung ihres Wasserstoffs bereits mit dem Aufbau schwerer Elemente aus Helium begonnen haben. Der kälteste der spektrographischen Analyse noch zugängliche Stern ist vorläufig van Maanen 2 (VMa 2). Sein absonderliches Spektrum deutet darauf hin, dass er als metallarmer Stern der langlebigen und beständigen Population II begonnen hat. Da seine gegenwärtige geringe Leuchtkraft auf rund fünf Milliarden Jahre Zwergdasein schliessen lässt, muss van Maanen 2 sein gesamtes Leben als heller Stern bereits vor der Bildung der Sonne und der Erde durchlebt haben. Bei einem andern noch schwächeren, kühleren und älteren Stern sind bis jetzt überhaupt keine Linien mit Bestimmtheit nachgewiesen worden.

Man mag sich fragen, welches Interesse für den Astrophysiker ein Spektrum hat, dem die aufschlussreichsten Teile, die Absorptionslinien, vollkommen fehlen. Wir haben manche Beobachtungsnacht und viele Monate Messung gebraucht, um die tatsächliche Abwesenheit jeglicher Absorptionslinien in den Spektren von sechs weissen Zwergen sicherzustellen. Selbst mit Hilfe der empfindlichsten photoelektrischen Methoden waren weder Linien noch Banden nachzuweisen, die mehr als 5% tief sind\*. Verschiedene Erklärungen sind möglich. Die

---

\*) d.h. deren Intensität um mehr als 5% von jener ihrer Umgebung im Spektrum abweicht; m. a. W., die keine sicher erkennbaren Schwärzungsunterschiede auf der photographischen Platte hervorzurufen vermögen (d. Ue.).

wahrscheinlichste kann vielleicht gefunden werden, wenn die in den Spektren anderer weisser Zwerge auftretenden Linien näher untersucht werden. Die extreme Verbreiterung und Abschwächung der Wasserstoff-Linien in einigen Spektren macht ihr vollständiges Verschwinden bei sehr hohem Druck verständlich. Diese Linien-Verbreiterung ist auf statistisch verteilte elektrische Felder und auf Zusammenstöße zwischen geladenen Teilchen zurückzuführen. Volker WEIDEMANN von der Bundesanstalt in Braunschweig (der dank einer Subvention des Air Force Office of Scientific Research mit uns arbeitete) hat im Spektrum von van Maanen 2 Eisen-, Magnesium- und Kalzium-Linien gefunden, deren Verbreiterung auf eine 10000-mal grössere Stoss-Häufigkeit der Teilchen als in der Sonnenatmosphäre hinweist. Er schätzt den Druck in dieser Sternhülle auf 2000 Atmosphären; die Dichte genügt, um die Bildung von Molekülen zuzulassen. Trotzdem ist es überraschend, dass die Linien, wie in den sechs erwähnten weissen Zwergen, überhaupt ganz verschwinden.

Das Rätsel wurde noch verwirriger, als wir auf einige Spektren stiessen, welche diffuse schwach ausgeprägte Banden aufweisen, die keinen laboratoriumsmässig festgestellten Linien entsprechen. Diese Banden sind vielleicht den unter ungewohnten Temperatur- und Druckverhältnissen strahlenden Molekülen oder unbeständigen Radikalen\* zuzuschreiben. Wir kennen aber das Verhalten der Atome in der extremen Umgebung der Atmosphären weisser Zwerge überhaupt noch nicht.

Bei wenigstens einem Stern hat unsere Generation den Uebergang von der normalen Evolution zum weissen Zerg miterleben können. Es ist die wiederkehrende Nova WZ Sagittae, die 1913 explodierte und 1946 einen erneuten Ausbruch mit einer Helligkeitssteigerung um den Faktor 1000 zeigte. Ihre heutige Leuchtkraft ist ein Hundertstel der Sonne, und ihr Spektrum ist dem eines weissen Zwergen ähnlich, nur dass ihm noch Emissionslinien überlagert sind. Diese Linien röhren wahrscheinlich von der fortwährend ausgeschleuderten Materie her. WZ Sagittae führt uns einen, wenn auch nicht den einzigen, Vorgang vor, durch welchen Sterne Masse verlieren können und so den Uebergang in die Endphase ihres Lebens vollziehen.

Wie alle lebenden Dinge auf unzählige Arten leben und sterben können, haben auch die Sterne viele Möglichkeiten der Entwicklung und des Todes. Wenn wir gelernt haben, im Spektrum der weissen Zwerge

---

\*) chemisch reaktionsfähige Gruppen verschiedener Atome (d. Ue.).

besser zu lesen, werden wir auch ihren zurückgelegten Lebensweg übersehen können. Ihr schwaches Licht mag uns Hinweise geben auf den zeitlichen Ablauf der Prozesse in ihrem thermonuklearen Ofen.

Ein weisser Zwerg lässt sich viel Zeit zum Sterben. Sein Licht verrät den langsamem Verlust an Wärme, die vom Innern durch das schlecht leitende entartete Gas nach aussen sickert. Die Wärme-Energie ist nur noch in den nicht-entarteten Atomkernen und in den wenigen Elektronen über der Fermi-Schwelle gespeichert. Auch wenn die einstige Temperatur sehr hoch war, ist diese Wärme-Energie der einzige greifbare Energievorrat für das ganze Lebensende. Das Licht des kühler werden den Sterns nimmt ab, und damit auch der Temperaturabfall nach aussen. Der Energieumsatz sinkt, und der zeitliche Ablauf der weiteren Entwicklung verlangsamt sich im gleichen Masse. Nach Martin SCHWARZ-SCHILD vom Princeton Observatory braucht ein hauptsächlich aus Helium bestehender weisser Zwerg drei Milliarden Jahre, um sich vom blau-weißen Ausgangsstadium auf  $7\,000^{\circ}$  im gelb-weißen abzukühlen. Weitere fünf Milliarden Jahre verstreichen, bis der Stern die Sichtbarkeitsgrenze bei  $4\,000^{\circ}$  (rot-weiß) erreicht.  $4\,000^{\circ}$  bedeutet aber immer noch glühend rot. Von rot bis infrarot verdämmert der Stern während phantastischer Zeiträume, denen gegenüber das Alter unserer Milchstrasse klein erscheint.

Die Temperaturabnahme bringt die Zone des degenerierten Zustandes immer näher an die Oberfläche heran. Die freien Elektronen werden immer seltener, und bei tiefen Temperaturen degenerieren schliesslich auch die Atomkerne. Wenn sämtliche Teilchen, Elektronen und Kerne, alle tiefsten erlaubten Energie-Niveaus besetzt halten, hört jegliche Strahlung auf, und der Stern wird zum gigantischen «Molekül». Dieses ist der Abschluss des irreversiblen Prozesses, womit auch das vierte thermodynamische Gesetz erfüllt ist. Freilich enthält unsere Milchstrasse noch keine eigentlichen schwarzen Sterne, sie ist dazu viel zu jung.

Am Ende dieser eben beschriebenen «Einbahn» wartet mit grosser Wahrscheinlichkeit allen Sternen das schliesslich Auslöschen. Wie wird der Himmel aussehen, wenn die Zeit auch unserer Sonne abgelaufen ist und unsere Planeten um einen sterbenden Stern kreisen? In ungefähr sieben Milliarden Jahren wird die Sonne ein heißer blau-weißer Zwerg sein, so klein, dass sie dem unbewaffneten Auge auf der Erde nicht mehr als Scheibe erscheint. Die Temperatur auf unserem Planeten wird noch rund  $-180^{\circ}\text{C}$  betragen. Der nächtliche Himmel

wird nicht mehr von Sternen übersät sein, da die Neubildung von Sternen aufgehört haben wird und die hellen Sterne unserer Sternbilder längst verlöscht sein werden. Kein Stern wird mehr sichtbar sein, ausser vielleicht einem zufällig nahe unserem sterbenden System vorbeiziehenden roten Hauptreihen-Stern, der so wenig strahlt, dass sein Kernenergie-Vorrat für tausende von Milliarden Jahren ausreicht. Alle andern einst hellen Sonnen werden weisse Zwerge sein, zu schwach um gesehen zu werden, und schwarze Nacht wird uns umhüllen. Nur noch ganz nahe einem der leuchtschwachen roten Sterne könnte man sich lebentragende Planeten denken, in einer für uns unvorstellbaren Weise und für unvorstellbare Zeiten.

(Eingegangen am 17. Oktober 1959.)      Uebersetzung von F. EGGER.

## ZUM 90. GEBURTSTAG VON DR. FRIEDRICH SCHMID

Ein Forscher eigener Prägung, Friedrich Schmid, Doctor honoris causa der Eidgenössischen Technischen Hochschule, Zürich, wird am 5. Oktober 1960 die Vollendung seines 90. Lebensjahres feiern.

Im hochgelegenen Dorfe Oberhelfenswil im Toggenburg brandet noch nicht die Flut der modernen Hast. Einsam, wie ein Granitfels, hält der Jubilar der täglichen Brandung des modernen Lebens stand.

Dr. Schmid widmet sich neben andern Wissenszweigen hauptsächlich der Erforschung jener sonderbaren Lichterscheinung am Nachthimmel, des Zodiakallichtes, welches die Stadtbewohner im Meere der verschwenderischen, künstlichen Lichteffekte nicht mehr zu erkennen vermögen.

Dr. Schmid hat in rund 70 Jahren mehr als 1100 Nächte wissenschaftlichen Forschungen geopfert, und seine Aufzeichnungen über Beobachtungen umfassten kürzlich 2196 Zodiakallichter, 822 Gegen-scheine, 790 sümmerliche Nachtscheine, 271 Lichtbrücken Ost-West, 105 Nordlichter usw.