

Die Entwicklungswege der Sterne

Mit seiner Untersuchung des Zusammenhangs von Spektraltyp und Helligkeit der Sterne legte Ejnar Hertzsprung vor hundert Jahren die Grundlagen für eines der wichtigsten Hilfsmittel der modernen Astrophysik, das Hertzsprung-Russell-Diagramm.

Am 22. Dezember 1905 lieferte der Postbote bei der Redaktion der „Zeitschrift für wissenschaftliche Photographie“ in Leipzig ein Manuskript des damals 32-jährigen Ejnar Hertzsprung ab, das den prosaischen Titel „Zur Strahlung der Sterne“ trug. Diese Arbeit, deren zweiter Teil 1907 in derselben Zeitschrift erschien, zählt heute zum klassischen Schrifttum der modernen Astrophysik [1]. Ihr Erkenntnisinhalt besitzt Aktualität bis zum heutigen Tag. Es handelte sich um eine von mehreren Gelegenheitsprodukten des jungen Wissenschaftlers, die dieser zu unterschiedlichen Themen bereits herausgebracht hatte. Mit Hertzsprungs beruflicher Ausbildung als Chemieingenieur hatte das Thema freilich nichts zu tun. Der junge Mann betätigte sich damals als „Privatgelehrter“, ohne einem bestimmten thematischen Schwerpunkt zu folgen [2].

In der besagten Arbeit war er der Frage nachgegangen, ob es bei den Sternen möglicher Weise einen Zusammenhang zwischen deren Spektraltypen als Ausdruck der Temperaturen und den tatsächlichen

(sog. absoluten) Helligkeiten gäbe. Die Astronomen hatten seit altersher stillschweigend angenommen, dass die absoluten Helligkeiten der Sterne im Großen und Ganzen alle gleich wären. Die unterschiedlichen scheinbaren Helligkeiten, wie sie uns bei ihrem Anblick entgegen treten, seien lediglich auf die verschiedenen Entfernungen der Sterne zurückzuführen.

Nach der Entdeckung des Planckschen Strahlungsgesetzes 1900 war jedoch zu erwarten, dass heißere Sterne deutlich mehr Energie abstrahlen als kühlere und somit die absoluten, d. h. auf eine Einheitsentfernung reduzierten Helligkeiten je nach Sterntemperatur durchaus unterschiedlich ausfallen.

Konkreter Anlass für Hertzsprungs Studie ist eine Bemerkung gewesen, die er in den „Harvard Annals“, der Publikationsreihe des US-amerikanischen Harvard Observatory, gelesen hatte. Dort hatten nämlich Antonia C. Maury und Annie J. Cannon in ihrer großen und sorgfältigen Spektralklassifikation [3] auf eine Merkwürdigkeit hingewiesen, für die sie keine Erklärung geben konnten. Sie hatten zur genaueren Charakterisierung der Spektren sog. Unterabteilungen a, b und c eingeführt und dabei festgestellt, dass die Linien in den Spektren von Sternen der Unterabteilung c auffallend schärfer waren als die Linien bei den Abteilungen a und b. Hertzsprung fragte sich nun, ob es nicht möglicherweise systematische Unterschiede in den absoluten Helligkeiten der Sterne dieser verschiedenen Gruppen geben könnte.

Um die absoluten Helligkeiten der Sterne zu bestimmen, bedurfte es natürlich für jedes Objekt einer Entfernungsangabe, denn nur dann konnte man (mit der bekannten scheinbaren Helligkeit des jeweiligen Sterns) auf eine Einheitsentfernung reduzieren und somit die absolute Helligkeit bestimmen. Doch



Der dänische Astronom Ejnar Hertzsprung (1873–1967) war ursprünglich Chemieingenieur. (Quelle: Archiv D. B. Herrmann)

gerade an zuverlässig bestimmten Sternentfernungen mangelte es, da die Messung trigonometrischer Parallaxen nur bis in vergleichsweise geringe Distanzen reicht und außerdem methodisch sehr schwierig ist. So entschloss sich Hertzsprung, die Eigenbewegungen der Sterne als Entfernungskriterium zu benutzen. Statistisch gilt nämlich, dass die Eigenbewegungen, d. h. die tangentialen Komponenten der räumlichen Bewegungen der Sterne, umso geringer ausfallen, je weiter die Sterne entfernt sind.

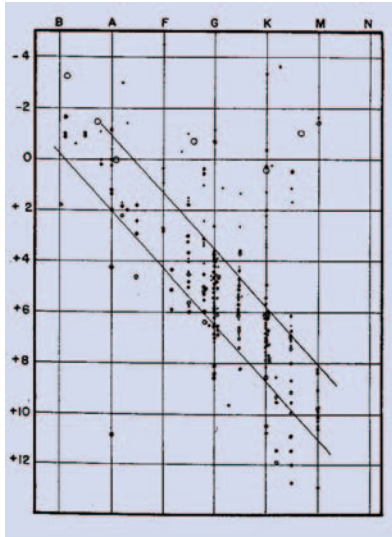
Hertzsprung ging äußerst behutsam vor: Ehe er auch nur vereinzelt Daten heranzog, die ihm nicht zuverlässig erschienen, schloss er sie lieber aus. Die Ergebnisse seiner Untersuchung, die ausschließlich auf bereits publizierten Beobachtungsdaten anderer beruhte, fasste er selbst am Schluss des zweiten Teils zusammen. In moderner Terminologie formuliert, hatte er folgende überraschende Fakten entdeckt:

► Die Sterne der mittleren bis späten Spektralklassen (Temperaturen zwischen etwa 6000 K und 3000 K) sind in zwei „Serien“ aufgespalten, die sich bei gleichem Spektraltyp (d. h. Temperatur) durch unterschiedliche absolute Helligkeiten auszeichnen.

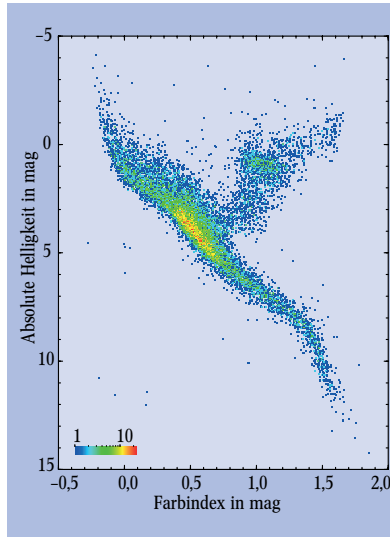
► Als Ursache für diese Erscheinung vermutet er unterschiedlich große Oberflächen der jeweiligen



Mit diesem Inserat vom 5. Februar 1902 bot Albert Einstein im Anzeiger für die Stadt Bern Privatstunden an. Auf die Anzeige hin meldete sich Maurice Solovine, der gemeinsam mit Einstein und Conrad Habicht die „Akademie Olympia“ gründete (vgl. S. 35 ff).



Der Vergleich zwischen dem ersten Hertzsprung-Russell-Diagramm (1913, links) und einer modernen Variante (Farben-Helligkeits-Diagramm) nach den Daten des Astrometriesatelliten HIPPARCOS (1997, rechts) veranschaulicht sehr



gut, wie stark das Wissen über die Stern-
daten gewachsen ist. Auffälligstes Merkmal ist die Anordnung der meisten Sterne entlang der sog. Hauptreihe, die von links oben nach rechts unten verläuft. (Quelle: U. Bastian, ARI Heidelberg)

Prof. Dr. Dieter B. Herrmann, Archenhold-Sternwarte, Alt-Treptow 1, 12435 Berlin

Sterne. Ein Stern geringer Temperatur mit sehr großer absoluter Helligkeit sollte im Vergleich zu einem Stern derselben Temperatur, aber geringerer absoluter Helligkeit, viel größer sein. Diese Vermutung lag umso näher, als in einigen Fällen durch Daten von Doppelsternen große Massen der absolut helleren Sterne auszuschließen waren.

► Diese „Roten Riesen“ unter den Sternen sind relativ selten je Volumeneinheit des Weltalls. Als Erklärung zieht Hertzsprung in Erwägung, dass es sich bei diesen Objekten um relativ rasch durchlaufende Entwicklungsstadien der Sterne handeln könnte.

► Hertzsprung vermutete, dass es auch spektrale Äquivalente für die großen Unterschiede in den absoluten Helligkeiten von Sternen desselben Spektraltyps gibt. Diese wurden 1914 durch Walter S. Adams und Ernst Kohlschütter tatsächlich gefunden.

Die Arbeit „Zur Strahlung der Sterne“ erwies sich als folgenreich – zunächst für Hertzsprungs Karriere: Der astronomische „Amateur“ stieg dank der Förderung durch Karl Schwarzschild rasch zum Professor in Göttingen auf und dann – als Schwarzschild nach Potsdam ging – zu dessen Mitarbeiter am dortigen Astrophysikalischen Observatorium. Nach Schwarzschilds Tod wechselte Hertzsprung 1919 an die Sternwarte im holländischen Leiden, deren Direktor er von 1935 bis 1944 war.

Für die Entwicklung der Astrophysik war die Arbeit „Zur Strah-

lung der Sterne“ von geradezu bahnbrechender Bedeutung. Das heute so genannte Hertzsprung-Russell-Diagramm avancierte zu einem der wichtigsten Hilfsmittel bei der Erforschung von Evolutionsprozessen der Sterne (Henry Norris Russell hatte Hertzsprungs Entdeckung 1910 unabhängig noch einmal gemacht und den Zusammenhang zwischen den absoluten Helligkeiten und Spektraltypen der Sterne in einem zweidimensionalen Diagramm graphisch dargestellt).

Zunächst erschien es plausibel, dass Sterne sich durch Verdichtung aus großen Gasansammlungen herausbilden, als „Rote Riesen“ begin-

nen, dann immer kleiner und heißer werden, um schließlich wieder abzukühlen und als „Rote Zwerge“ zu enden. Dem entsprach ein Lebensweg im Hertzsprung-Russell-Diagramm, der rechts oben begann, auf die Hauptreihe führte und die Bildpunkte der Objekte schließlich auf der Hauptreihe nach rechts unten wandern ließ.

Doch dann wurde 1919 die Masse-Leuchtkraft-Beziehung entdeckt – übrigens wieder unter wesentlicher Mitwirkung von Hertzsprung. Demnach besaßen Sterne größerer Leuchtkraft auf der Hauptreihe des Hertzsprung-Russell-Diagramms auch stets die größeren Massen. Ein nach der maximalen Kontraktion sehr heißer und nun einfach auskühlender Stern hätte demnach dramatisch an Masse verlieren müssen.

Damals erkannte Hertzsprungs Kollege und Briefpartner Arthur S. Eddington, dass man erst das Problem der Herkunft der Sternenergie lösen müsse, ehe man die Evolution zutreffend beschreiben könne. Und nun war plötzlich Einsteins $E=mc^2$ auf das Engste mit Hertzsprungs Entdeckung verflochten – zwei Entdeckungen des Jahres 1905 flossen in einem Problem zusammen!

Die weitere Entwicklung kann hier nur noch im Telegrammstil berichtet werden: Erst in den 30er-Jahren fanden Bethe und Weizsäcker den Kernfusionsmechanismus, der die Energie der Sterne tief in ihrem Inneren freisetzt. Beim Aufbau schwererer aus leichteren Elementen (z. B. Helium aus Wasserstoff) tritt ein „Massendefekt“

KURZGEFASST...

■ Der optische Doppler-Effekt

Johannes Stark (1874–1957) entdeckte in den Spektren von Kanalstrahlen zusätzlich zu den bekannten Spektrallinien breite Streifen, die zu kürzeren Wellenlängen verschoben sind. Er erklärte dies durch eine Doppler-Verschiebung der von den Atomen emittierten elektromagnetischen Strahlung, verursacht durch die Bewegung der Atome in Richtung des Beobachters. Für die Entdeckung des optischen Doppler-Effekts, der auch von besonderer Bedeutung für die Astronomie ist, und der Linien-Aufspaltung in elektrischen Feldern (Stark-Effekt) erhielt Stark den Physik-Nobelpreis 1919. *J. Stark, Phys. Zeitschr. 6, 893 (1905)*

■ Radioaktiver Zerfall

Der österreichische Physiker Egon von Schweidler (1873–1948) zeigte, dass sich das exponentielle Gesetz des radioaktiven Zerfalls aus Wahrscheinlichkeitsgesetzen

ableiten lässt, wenn man annimmt, dass die Wahrscheinlichkeit des Zerfalls zeitlich konstant und für alle Atome der selben Art gleich ist. Ausgehend von Messungen der Zerfallszeit radioaktiver Elemente gelang Schweidler damit die Entdeckung des ersten nicht-kausalen Prozesses in der Physik. *E. von Schweidler, Premier Congres Internationale de Radiologie, Liege (1905) Chapt. 15, Section 1*

■ Der Bragg-Peak

William Henry Bragg (1862–1942, Nobelpreis 1915) wies nach, dass die Ionisation von Alpha-Teilchen am Ende ihrer Reichweite ein scharfes Maximum besitzt, den sog. Bragg-Peak. Das gilt auch für Elektronen, Protonen und schwere Ionen und wird bei der Strahlentherapie von Tumoren genutzt. Durch Anpassen der Teilchenenergie lässt sich dabei der Bragg-Peak in das kranke Gewebe legen. *W. Bragg und R. Kleemann, Phil. Mag. 10, 318 (1905)*

auf; die gemäß Einsteins Formel diesem Defekt entsprechende Energie wird freigesetzt und bildet die Quelle der Strahlung der Sterne.

Die Entwicklungswege der Sterne stellten sich nunmehr im Hertzsprung-Russell-Diagramm völlig anders dar, als anfangs angenommen. Seine zentrale Bedeutung aber hat das Diagramm und damit Hertzsprungs Entdeckung aus dem Jahre 1905 bis heute beibehalten.

DIETER B. HERRMANN

- [1] *E. Hertzsprung*, Zur Strahlung der Sterne (I),(II), Z. wiss. Photograph. **3**, 429 (1905) bzw. **5**, 86 (1907), neu hrsg. mit Einl. und Anm. von *D. B. Herrmann* (Ostwalds Klassiker, Bd. 255), Harri Deutsch, Frankfurt/Main, 5. Aufl. (2001)
- [2] Detaillierte Informationen zu Hertzsprungs Leben und Werk in: *D. B. Herrmann*, Ejnar Hertzsprung. Pionier der Sternforschung, Springer, Berlin, Heidelberg u. a. (1994)
- [3] *Annals of the Astronomical Observatory of Harvard College*, Vol. XX–VIII, Cambridge/Mass. 1897–1901

Das Rätsel des Magnetismus

Die Arbeiten von Paul Langevin zum Dia- und Paramagnetismus stehen an Anfang des Verständnisses der magnetischen Eigenschaften von Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern.

Im Jahre 1905 veröffentlichte Paul Langevin seine Theorie des Dia- und des Paramagnetismus [1, 2]. Beide Phänomene waren für die Physiker lange Zeit ein Rätsel, das letztlich erst durch die Quantenmechanik gelöst werden konnte. Jedoch legte Langevin die Grundlage für ihr Verständnis. Seine Basis war die Maxwell-Theorie mit der alten Äthervorstellung. Dazu kam die Elektronentheorie, deren Ausarbeitung vor allem auf Hendrik A. Lorentz zurückging, der ja auch eine wesentliche Rolle bei der Entwicklung der Relativitätstheorie durch Albert Einstein spielte.

Drei Zitate aus der Langevinschen Arbeit [2] mögen den historischen Kontext beleuchten, in dem sie entstanden ist: „Seit einigen Jahren weiß man, wie fruchtbar sich die Konzeption erwiesen hat, welche in der Materie eine Ansammlung von elektrisch geladenen Zentren oder Elektronen sieht und damit das notwendige Band liefert zwischen dem Äther, dem Sitz der elektrischen und magnetischen Felder, und der Materie, der Quelle und dem Empfänger

der elektromagnetischen Erregungen, die durch den Äther übertragen werden.“ (S. 70, übersetzt vom Verfasser). Kurz danach schreibt Langevin, ein Molekül sei aufgebaut aus mindestens zwei Sorten von Elektronen, positiven und negativen, da es elektrisch neutral ist (S. 79). Schließlich heißt es: „... und wenn,



Paul Langevin (1872–1946) hat sich neben dem Magnetismus auch mit der Brownschen Bewegung beschäftigt.^{+) Seine Arbeiten zum Ultraschall während des Ersten Weltkriegs lieferten die Grundlagen für die Sonar-Technik.}

wofür alles spricht, dieser Quotient [aus Ladung und Masse] mindestens tausendmal größer für die negativen Elektronen oder Kathodenstrahlteilchen als für die positiven ist, sind es die ersteren, in jeder Materie enthalten, die die wesentliche Rolle bei der Produktion des Diamagnetismus spielen.“ (S. 89). Wie man sieht, ist es noch ein weiter Weg bis zu den Atommodellen von Rutherford (1911) und Bohr (1913). Bemerkenswert ist auch, wie stark sich die Vorstellung eines Äthers unter den Forschern der Zeit gehalten hat, wo doch zur gleichen Zeit Einstein und seine Vorgänger dem Äther den Garaus machten.

Natürlich gab es vor Langevin viele Versuche, den *Diamagnetismus* (also die negative magnetische Suszeptibilität) von Molekülen, Flüssigkeiten und Festkörpern zu verstehen. Hierzu sei auf das heute noch interessante Buch von van Vleck verwiesen [3]. Ein einfacher Zugang ergibt sich über das Larmor-

^{+) 1911 nahm Langevin auch am berühmten ersten Solvay-Kongress teil. Auf dem Gruppenfoto der Teilnehmer (siehe S. 43 in diesem Heft) steht Langevin rechts von Einstein.}