

Zürich<sup>60</sup> verwirklicht werden sollen, lassen Steigerungen der  $\pi$ -Mesonenintensität um mindestens zwei Größenordnungen erwarten<sup>61</sup>. Solche „Mesonenfabriken“ dürften also in absehbarer Zeit bereits die technischen Voraussetzungen für eine  $\pi$ -Mesonen-

therapie bieten. Um so mehr ist es notwendig, in der Dosimetrie der  $\pi$ -Mesonen weitere Fortschritte zu machen, um auch von dieser Seite für die Anwendung der  $\pi$ -Mesonen in Biologie und Medizin gerüstet zu sein.

<sup>60</sup> J. P. BLASER, Report, Eidg. Techn. Hochschule, Zürich 1964.

<sup>61</sup> F. T. HOWARD u. N. VOGT-NIELSEN, CERN-Report 63, 19 [1963].

## NOTIZEN

### Zur Deutung des Hertzsprung–Russell-Diagramms<sup>1</sup>

H. KIENLE

(Z. Naturforsch. 21 a, 1819–1820 [1966]; eingegangen am 3. März 1966)

Herrn Professor Dr. W. GENTNER zum 60. Geburtstag gewidmet

Die ersten Klassifikationen der Sternspektren gründeten sich auf Farben und Linienintensitäten. Nachdem erkannt worden war, daß die Temperatur der wesentliche Parameter ist, der den physikalischen Zustand der Sterne beschreibt (H. C. VOGEL), ergab sich eine Umstellung der mit den Buchstaben des Alphabets bezeichneten Harvard-Klassen, wenn man sie kontinuierlich abnehmenden Temperaturen zuordnen wollte. Das führte zu den bekannten, nur auf diesem historischen Hintergrund verständlichen Reihe

O B A F G K M

Parallel mit den rein auf die Beschreibung der *Zustände* zielenden Überlegungen gingen andere, die die Spektralklassen als Repräsentanten verschiedener *Entwicklungsstufen* der Sterne, die nach fallenden Temperaturen angeordnete Reihe also zeitlich als Abkühlungsreihe verstanden wissen wollten. Daher stammt noch die Unterscheidung „frühe“ (für OBA) und „späte“ (für KM) Typen.

Als E. HERTZSPRUNG (1905/07) in der *Leuchtkraft* einen zweiten Parameter entdeckte, sprach er zunächst nur von einer „bilinearen“ Reihe der Farben, ohne sich auf eine Richtung der Entwicklung festzulegen. Erst H. N. RUSSELL griff (1914) den schon von N. LOCKYER (1887) geäußerten Gedanken eines „aufsteigenden“ und „absteigenden“ Astes auf und wurde so zum Vater der „Riesen–Zwerg-Theorie“ der Sternentwicklung. Das HERTZSPRUNG–RUSSELL-Diagramm (HRD) bekam dadurch ein Doppelgesicht: seiner eigentlichen Natur nach ein reines *Zustandsdiagramm* – mit den Variablen Leuchtkraft und Spektraltypus (bzw. Farbe oder

effektive Temperatur) –, das die in der Natur verwirklichten Zustände darstellt, wurde es nun auch als *Entwicklungsdiagramm* betrachtet, in dem die Lebenswege der Sterne eingezeichnet sind. Dabei wurde vielfach übersehen, daß eine solche „Umordnung des räumlichen Nebeneinanders in ein zeitliches Nacheinander“ (H. KIENLE, AG Leipzig 1924) einer zusätzlichen kosmogonischen Hypothese bedarf. Die das HRD beherrschende *Zustandsgleichung* („Masse–Leuchtkraft · Gesetz“ in der Sprache der Astronomen) muß ergänzt werden durch eine *Weggleichung*, d. h. ein Gesetz, nach dem die Zustandsänderungen erfolgen, in Analogie zu den Weggleichungen der Thermodynamik<sup>2</sup> (Isothermen, Adiabaten...).

In der Folge sind verschiedene solche Weggleichungen versucht worden. H. N. RUSSELL hat beispielsweise darauf aufmerksam gemacht, daß die Hauptreihe im HRD sehr nahe durch eine Kurve konstanter Mittelpunktstemperatur dargestellt werden könne und daß der aus EDDINGTONS Theorie seinerzeit folgende Wert  $T_c = 40$  Millionen Grad gerade die Temperatur sein könne, bei der die energieliefernden Kernprozesse im Innern des Sterns wirksam werden. Wie sich uns die Dinge um etwa 1930 darboten, ist dem Encyklopädie-Artikel<sup>3</sup> „Kosmogenie“ zu entnehmen, in dem die Doppelnatür des HRD bildlich dargestellt ist.

Aus dem Masse–Leuchtkraft-Gesetz folgt zwangsläufig, daß eine Entwicklung längs der Hauptreihe nach unten, im Sinne der Riesen–Zwerg-Theorie, nur unter starker Massenabnahme möglich ist. Es entbehrt nicht eines gewissen Reizes, zu bemerken, daß E. WIECHERT schon 1921 auf der AG-Versammlung in Potsdam darauf hingewiesen hat, daß die Entwicklung eines Sternes unter Massenaufsammlung gerade in der umgekehrten Richtung erfolgen könnte, als es die damals allgemein anerkannte RUSSELLSche Theorie wollte, während W. NERNST noch auf der AG-Versammlung in Breslau 1937 seine kosmogonischen Überlegungen auf die Behauptung stützte, die Astronomen hätten mit dem HRD „bewiesen“, daß die Entwicklung im Sinne Riese–Zwerg erfolge.

<sup>1</sup> Kurzfassung eines Vortrages im Colloquium des MPI für Physik und Astrophysik München, Februar 1965.

<sup>2</sup> Auf diese Analogie hat R. EMDEN in den Münchener Colloquien um 1918 hingewiesen.

<sup>3</sup> Enc. d. math. Wiss., Bd. VI, 2, B, 28 [1934].



Dieses Werk wurde im Jahr 2013 vom Verlag Zeitschrift für Naturforschung in Zusammenarbeit mit der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V. digitalisiert und unter folgender Lizenz veröffentlicht: Creative Commons Namensnennung-Keine Bearbeitung 3.0 Deutschland Lizenz.

Zum 01.01.2015 ist eine Anpassung der Lizenzbedingungen (Entfall der Creative Commons Lizenzbedingung „Keine Bearbeitung“) beabsichtigt, um eine Nachnutzung auch im Rahmen zukünftiger wissenschaftlicher Nutzungsformen zu ermöglichen.

This work has been digitized and published in 2013 by Verlag Zeitschrift für Naturforschung in cooperation with the Max Planck Society for the Advancement of Science under a Creative Commons Attribution-NoDerivs 3.0 Germany License.

On 01.01.2015 it is planned to change the License Conditions (the removal of the Creative Commons License condition "no derivative works"). This is to allow reuse in the area of future scientific usage.

Die Ansätze zu einer neuen Deutung des HRD möchte ich in den beiden folgenden Erkenntnissen sehen:

1. Die Hauptreihe im HRD der galaktischen Sternhaufen ist eine schmale Linie; die „kosmische Streuung“ der Sternzustände quer zur Hauptreihe ist klein (HRD der Praesepe, O. HECKMANN, Göttingen 1934).

2. Das HRD eines galaktischen Haufens kann aufgefaßt werden als Kurve konstanten Wasserstoffgehaltes; abnehmender Wasserstoffgehalt entspricht einer Verschiebung nach rechts längs Linien konstanter Masse (B. STRÖMGREN, VJS der AG 1933).

Wenn die energieliefernden Kernprozesse, die im Inneren der Sterne ablaufen, in der Fusion  $H \rightarrow He$  bestehen, dann sollten die Bildpunkte der Sterne im HRD erst dann von der Hauptreihe abwandern beginnen, wenn sich im Zentrum ein isothermer Heliumkern gebildet hat. Da der zeitliche Ablauf dieses Prozesses von der Masse des Sternes abhängt, erfolgt das Abwandern von der Hauptreihe um so früher, je größer die Masse (bzw. die Leuchtkraft) ist. Das Abbiegen der Hauptreihe im HRD der Sternhaufen wurde so zu einem Kriterium für das Alter der Haufen; das Alter bezogen auf die „*initial sequence*“, die die Sterne in dem Zeitpunkt darstellt, in dem die ersten Kernreaktionen einsetzen.

Dieser Deutung liegt die Annahme zugrunde, daß die Sternhaufen Gruppen gleichen Ursprungs und Alters seien; nur dann kann sinnvoller Weise der zeitliche Ablauf der Entwicklung auf eine *initial sequence* ( $t=0$ ) bezogen werden. Man hat dann die folgenden Phasen zu unterscheiden:

1. *Kontraktionsphase* von der Entstehung des Sterns – die ein Problem für sich darstellt! – bis zum Einsetzen der ersten Kernreaktionen: Weg zur Hauptreihe.

2. *Wasserstoff-Brennphase*: Verweilen auf der Hauptreihe.

3. *Helium-Brennphase*: Abwandern von der Hauptreihe.

Was sich dann abspielt und wie – Aufbau schwererer Kerne, periodische Instabilitäten, Massenabstoßung, Explosion, gravitativer Kollaps –, ist noch weitgehend Gegenstand der Spekulation. Die zahlreichen in Gang befindlichen Modellrechnungen werden langsam Klärung offener Fragen bringen.

Inzwischen haben sich die Anzeichen dafür vermehrt, daß die Voraussetzung gleichen Alters für die Sterne eines Haufens nicht immer zutrifft, daß die Sternentstehung in Gruppen möglicherweise kein einmaliger Akt, sondern ein fortlaufender Prozeß ist. Damit aber gewinnen die Aussagen über das individuelle Alter einzelner Sterne, die sich auf die aus der Analyse der Spektra abgeleitete Häufigkeitsverteilung der Elemente, insbesondere die Isotopenverhältnisse stützen, erhöhte Bedeutung.

Wenn wir den Satz von VOGT-RUSSELL: „Der innere Aufbau eines Sterns ist eindeutig durch Masse und chemische Zusammensetzung bestimmt“ heute abwandeln in: „Der heutige Zustand eines Sterns ist eindeutig bestimmt durch ursprüngliche Masse und chemische Zusammensetzung“, dann involviert das, daß wir über eine vollständige Theorie der Vorgänge verfügen, die eine Änderung der Masse und der chemischen Zusammensetzung bewirken. Bei der Konfrontierung der Ergebnisse der Modellrechnungen mit der Wirklichkeit, d. h. der Identifizierung theoretischer Entwicklungsstadien mit bestimmten Sterntypen im HRD, spielt dann aber das halbempirisch aus spektroskopischen Daten abgeleitete Alter eine Rolle.

Es ist mehrfach darauf hingewiesen worden, daß die zwei Parameter des üblichen HRD den physikalischen Zustand der Sterne nicht hinreichend charakterisieren. Die von D. CHALONGE vorgeschlagene dreiparametrische Darstellung trägt dem Rechnung; ähnlich die Verwendung von Zweifarbdendiagrammen. Vielleicht darf man in dem *radioaktiven Alter* den wirklich relevanten dritten Parameter sehen.