

Vom Bau und Triebwerk der Gestirne

Die jüngste Entwicklung der naturwissenschaftlichen Erkenntnis ist gekennzeichnet durch das immer stärkere Eindringen der Gedankengänge und Arbeitsweisen der Physik, insbesondere der in den letzten Jahrzehnten zu ungeahnter Blüte gelangten Atomphysik, in die Bezirke ihrer Nachbartwissenschaften. Auch die älteste und von jeher als die vornehmste der Naturwissenschaften gepriesene Astronomie hat sich dem befruchtenden Einfluß ihrer jüngeren Schwester willig gebeugt und verdankt dieser edlen Fügsamkeit eine Fülle wertvollster Erkenntnisse.

Die ältere Astronomie war infolge der auch durch die Erfindung des Fernrohrs kaum geminderten Unzugänglichkeit ihrer Forschungsobjekte im wesentlichen auf das Studium der Anordnung und der Bewegung der Himmelskörper beschränkt. Die Kenntnis der physikalischen und chemischen Beschaffenheit jener fernen Welten blieb ihr aber fast völlig versagt. Reicht doch die Bildkraft selbst des größten und besten Fernrohrs nicht aus, um selbst vom aller-nächsten Fixstern Einzelheiten der Oberfläche oder auch nur diese in ihrem Umriss erkennen zu lassen; im Gegenteil, je besser das Instrument ist, um so mehr läßt es das Sternbild im Auge des Beobachters oder auf seiner photographischen Platte zur winzigen Punktspur zusammenschrumpfen.

An die Namen Fraunhofers, des genialen Optikers, und der Physiker Kirchhoff und Bunsen ist der entscheidende Fortschritt geknüpft, der hier weiterhalf. Das unscheinbare Glasprisma, das schon Newton und Huyghens die grundlegenden Beobachtungen zu ihren Forschungen über die Natur des Lichtes lieferte und das von Fraunhofer zuerst hergestellte Beugungsgitter setzen den Himmelsforscher instand, den Boten aus der Himmelsferne zu ausführlicherem Bekenntnis seiner Geheimnisse zu zwingen. Nach der Anweisung der genannten Forscher deutet er die dunklen und hellen Linien und Streifen im Spektrum der Sonne und der Sterne als die Siegelzeichen derselben chemischen Elemente, die auch in den irdischen Lichtquellen verglühend solche nach Lage und Farbe charakteristischen Linien liefern. Er schließt aus dem Aussehen der Spektren auf den Aggregatzustand des Lichtsenders. Das Dopplersche Prinzip lehrt ihn weiter, aus geringen Verschiebungen bekannter Linien gegen ihren normalen Ort Bewegung und Geschwindigkeit des beobachteten Himmelskörpers abzulesen. Heute wissen wir die Runenschrift der Spektren noch viel weiter auszudeuten. Enthält sie doch Angaben über die Temperatur und Druckverhältnisse in der Lichtquelle, über die dort herrschenden magnetischen und elektrischen Einflüsse und den den Forscher ganz besonders fesselnden Energiehaushalt.

Von vielleicht noch größerer Bedeutung als die Ausgestaltung und Vervollkommnung der Beobachtungsmethoden durch Spektroskopie und Photometrie der Gestirne sind auch für die Astrophysik die theoretischen Fortschritte der Physik geworden. Julius Robert Mayer, Helmholtz, Clausius lehrten die großen Gesetze erkennen und anwenden, nach denen die Natur ihr allbeherrschendes Betriebsmittel, die Energie, spielen läßt, und schufen in der Thermodynamik mit ihren beiden Hauptsätzen, dem Prinzip von der Erhaltung der

Energie und der Entropie das mächtige Werkzeug, das den mannigfaltigen Energieumsatz rechnerisch zu verfolgen gestattet. An jene Forschungen anknüpfend bauen Boltzmann, Jaeger und andere Forscher die kinetische Gastheorie aus, die auf Grund statistischer Betrachtungen den Wirbelstanz der kleinsten materiellen Einheiten, der Moleküle und Atome, zu entwirren und aus der scheinbaren Unordnung der Aufbauelemente die Ordnung und das sinnvolle Getriebe im Gesamtmechanismus des im Weltgeschehen überwiegend herrschenden Stoffzustandes, des Gaszustandes, zu verstehen lehrt. Faraday, James Clark Maxwell und Heinrich Hertz entschleiern die bis dahin am wenigsten bekannte Energieform, die Elektrizität. Maxwell zeigt im besonderen, wie wir das Licht als elektromagnetische Strahlungen aufzufassen haben, Lorentz weist in seiner Elektronentheorie darauf hin, daß wie beim materiellen Geschehen die Atome und Moleküle, so bei den elektrischen Vorgängen kleinste elektrische Einheiten, die Elektronen, die Träger der in die Erscheinung tretenden Energieumwandlungen sind. Vertieftes Studium der mannigfachen Vorgänge der Wärme-, Licht- und Elektrizitätsstrahlung führt schließlich Planck, Einstein und andere Forscher zum Ausbau der heute unentbehrlichen, wenn auch in ihren tiefsten Beziehungen noch unverstandenen Quantentheorie, nach der schlechthin aller Energieumsatz quantenhaft, das heißt in sprunghaftem Austausch kleinster, unter sich gleicher Energieelemente, der Elementarquanten, sich vollzieht. Alle diese Erkenntnisse und Theorien haben mitgeholfen beim Ausbau unseres Vorstellungsbildes vom Bau des Atoms und seines Energieaustausches mit seiner Umgebung, also schließlich alles physikalischen Geschehens, in der Rutherford-Bohrschen Atomvorstellung und ihrer theoretischen Weiterbildung durch Sommerfeld, Heisenberg, Schrödinger und andere.

So problematisch und umstritten im einzelnen die Verwertung dieser jüngsten Erkenntnisse wie in der Physik selber, so auf den Nachbargebieten auch noch sein mag, so setzen sie doch den in ihrem Gebrauch geschulten Forscher instand, Fragen anzugreifen, deren Beantwortung noch vor weniger als einem Jahrzehnt hoffnungslos erschien. Insbesondere gilt dies von einem Zentralproblem der Astrophysik, dem vom Aufbau und der Entwicklung der Sterne, das heute dank den Arbeiten Emdens, Jeans und vor allem A. E. Eddingtons im Vordergrund des Interesses steht. Den von diesen Forschern aufgestellten Gedankengängen und Entwicklungen nachzugehen, ist auch für den Nichtfachmann von außerordentlichem Reiz.

Das Urbild der selbstleuchtenden Himmelskörper, also der Sterne, ist für uns natürlich unser eigenes Zentralgestirn, die Sonne. Von ihr hat die astrophysikalische Erkenntnis ihren Ausgang genommen, vor allem jene grundlegende, daß wir es bei den Selbstleuchtern nicht mit glühenden festen oder flüssigen Körpern zu tun haben, sondern mit glühenden Gasbällen. Diese heute Gemeingut gewordene Annahme erschien zunächst gar nicht selbstverständlich. Noch Kirchhoff und Bökner hielten auf Grund der Beobachtung, die das Sonnenspektrum als ein zusammenhängendes, wenn auch von dunklen Linien durchzogenes Farbenband zeigt, wie es die Laboratoriumsversuche bei glühenden festen Körpern ergeben, die Sonne für einen festen oder doch zähflüssigen Körper, der von einer Atmosphäre kühlerer Dämpfe umgeben sei, in denen durch Absorption die dunklen Fraunhoferschen Linien entstehen. Erst P. Angelo

Cecchi, der berühmte Astronom des Römischen Kollegs und später der Vatikanischen Sternwarte, hat durch seine zahlreichen Beobachtungen der richtigen Ansicht Bahn gebrochen und darauf hingewiesen, daß ja auch Gase unter hohem Druck und bei hoher Temperatur zusammenhängende Spektren aussenden. Die Grundannahme der Cecchischen Sonnentheorie, daß die Sonne und wie sie auch die übrigen Fixsterne Gasbälle mit nach innen zunehmender Temperatur und Dichte seien, ist heute die Grundvoraussetzung aller Theorien über den Sternaufbau. Mit Recht steht daher P. Cecchis Name an der Spitze unserer Darlegung.

Für den Theoretiker bedeuten die Feststellungen Cecchis über die Gasnatur der Gestirne eine Erleichterung seiner Aufgabe. Der gasförmige Aggregatzustand der Materie ist der theoretischen Behandlung auf Grund der thermodynamischen Hauptsätze und der Entwicklungen der kinetischen Gastheorie am leichtesten und weitesten zugänglich. Diese liefern die mathematische Gesetzmäßigkeit, nach der der „Zustand“ einer Gasmasse sich einstellt, so daß wir rechnerisch verfolgen können, wie Temperatur, Dichte, Druck, die sogenannten „Zustandsveränderlichen“ des Gases, sich gegeneinander abgleichen.

Schon bald nach den ersten Veröffentlichungen Cecchis griff denn auch Homer Lane die theoretische Behandlung des Sonnensternproblems auf in der Abhandlung: „Über die theoretische Temperatur der Sonne, unter der Hypothese einer Gasmasse, die ihr Volum auf Kosten ihrer inneren Wärme aufrecht erhält und die Gasgesetze, wie sie uns aus irdischen Experimenten bekannt sind, befolgt“ (1870).

Lane stellt sich die Aufgabe, zu berechnen, wie sich in einer Gasmasse von Sonnengewicht die Temperatur etwa längs eines Radius vom Zentrum bis zur äußeren Oberfläche verteilt, wenn diese Gasmasse im Gleichgewicht bleiben, der Stern also nicht auseinanderfallen oder zusammenklappen soll. In einer solchen Gasmasse sind zunächst zwei Kräfte wirksam: die allgemeine Massenanziehung, die die Gasteilchen einander zu nähern sucht, und der innere Druck des Gases, der die Gesamtmasse zu erweitern, die Teilchen also voneinander zu entfernen strebt. Da wir zunächst rotierende Massen, bei denen die Zentrifugalkraft mit ins Spiel käme, nicht in Betracht ziehen, sind die angegebenen für Lane die einzigen Kräfte. Es gilt, die Bedingung zu finden, unter der für jede im Sonnenkörper gedachte Kugelschale Gleichgewicht zwischen Massenanziehung und Gasdruck besteht. Nun ist aber der Gasdruck nach den Vorstellungen der kinetischen Gastheorie, auf deren Boden Lane sich stellt, das Ergebnis der Unzahl von Stößen, die die mit großer Geschwindigkeit hin- und herfliegenden Gasmolekeln untereinander austauschen; anderseits wissen wir, daß durch die Geschwindigkeit der Moleküle, ihr mittleres Geschwindigkeitsquadrat, ein Maß für die Temperatur gegeben ist. Eben dieser Zusammenhang ermöglicht es, die Temperaturverteilung im Gleichgewicht rechnerisch zu verfolgen.

Im groben ist das Ergebnis dieser Rechnungen, daß wie der Druck, so auch die Temperatur gegen das Innere des Modellsterns dauernd ansteigt. Damit ist aber auch schon gegeben, daß aus dem Innern des Sternes ein Energiestrom dauernd nach außen geht, um schließlich von den äußersten Schichten als Licht- und Wärmestrom ins Weltall ausgestrahlt zu werden. Dieser Energie-

strom ist es, der die Sonne zum Licht- und Kraftspender für ihre dunklen Begleiter, die Planeten, macht, dem wir es insbesondere danken, daß statt Finsternis und Todeskälte Wärme und Leben unsre Erde durchpulst.

Es mag schon hier die Frage gestellt werden, die wohl die schwierigste und bis heute nur unvollständig gelöste der Sterntheorie ist: Woher stammt letztlich dieser in überreicher Fülle verausgabte Energiestrom? Mit welchen Mitteln bestreitet der Gasstern seinen verschwenderischen Energiehaushalt?

Eine vorläufige Antwort, die freilich lange Zeit in Ermanglung einer besseren als die einzige gegolten hat, geben die Laneschen Rechnungen selber. Sie weisen auf die Schwereenergie der Sonne als Energiequelle hin, die sich bei der Kontraktion der Gasmasse in Wärmeenergie umsetzt. Daß dieser Energieumsatz tatsächlich vorhanden ist, daß also bei der Kontraktion eines Gases Energie frei wird, ist nach den Gasgesetzen und der allgemeinen Thermodynamik außer Zweifel. Überraschend ist aber das Ergebnis der Laneschen Ansätze, daß Sterne, für deren Masse die Gesetze der idealen Gase gelten, bei der Zusammenziehung heißer werden müssen; es muß also mit andern Worten ein solcher Energieüberfluß aus dem Innern des Sterns geliefert werden, daß nicht nur die in den Weltraum verausgabte Energie ersetzt wird, sondern auch noch Wärmeenergie zur Temperatursteigerung des Sternes übrigbleibt.

Nach den Laneschen Anschauungen erfolgt der Energietransport vom Sterninnern zur Oberfläche durch die Wärmeleitung, d. h. durch unmittelbare Übertragung der Energie von Molekül zu Molekül. Bei jedem Stoße gibt ja das raschere Molekül an das langsamere einen Teil seiner Bewegungsenergie ab, so daß diese allmählich aus dem heißeren Sterninnern mit seinen rascher bewegten Gasteilchen in die kühleren Außenschichten vordringt, in denen die Moleküle minder lebhaft durcheinandertwirbeln. Tatsächlich spielt aber im Sterninnern mit seiner in die Millionen Grade steigenden Temperatur der Energietransport durch Wärmeleitung oder -strömung nur eine ganz untergeordnete Rolle gegenüber der unmittelbaren Energiebewegung, die die Ätherschwingung zu Hilfe nimmt, der Energiestrahlung. Wir wissen ja heute, daß das letzte Agens, das den von uns als Wärme, Licht oder Elektrizität aufgefaßten Molekularwirkungen zu Grunde liegt, die Schwingungsenergie des Äthers ist und nur die verschiedene Frequenz bzw. Wellenlänge dieser Schwingungen die verschiedene Wirkung bedingt. Da nun der Energieaustausch durch Strahlung bei diesen hohen Temperaturen viel rascher vor sich geht als jener durch Leitung oder Strömung, so ist er für den Energietransport durchs Sterninnere praktisch allein maßgebend.

Da die Gesetzmäßigkeit der Energiestrahlung in ihren Hauptzügen ebenfalls erforscht ist, konnte der Ausbau der Sterntheorie durch Berücksichtigung dieser Gesetze von R. A. Sampson (1894), später von Schwarzschild und besonders von R. Emden in seinem Buche „Gasugeln“ fortgesetzt und zu einem gewissen Abschluß gebracht werden.

Noch an einer zweiten Grundannahme der Laneschen Theorie sind heute wichtige Verbesserungen und Erweiterungen anzubringen. Eine der Grundgleichungen des mathematischen Aufbaues dieser Theorie wurde dadurch gewonnen, daß man in jeder Schicht des Modellsterns Gleichgewicht ansetzt zwischen dem nach dem Zentrum der Sternkugel gerichteten Schwerkraft der

die Schicht überlagernden Massen der äußeren Kugelschalen und dem gegenwirkenden Gasdruck. Es sind also die von unten nach oben wirkenden Molekülstöße, deren Gesamtwirkung die Schwere der überlagernden Massen auszugleichen hätte. Nun wissen wir aber aus den Arbeiten Maxwells und den Experimenten Lebedews, daß auch die Ätherwellen, also die Licht- und elektrischen Schwingungen, mechanischen Druck auf die sich in ihren Weg stellende Materie auszuüben vermögen. Diese Druckwirkung ist zwar unter den bei uns herrschenden Versuchsbedingungen so gering, daß es raffinierter Experimentierkunst bedarf, sie erkennbar zu machen. Der Strahlungsdruck wächst aber sehr rasch mit steigender Temperatur — mit ihrer vierten Potenz —, so daß er bei den hohen Temperaturen im Sterninnern Werte annimmt, die bei Abschätzung des Gleichgewichts durchaus in Rechnung zu stellen sind (bei 1 000 000 Grad 2550 Atmosphären, bei 10 000 000 Grad 25 500 000 Atmosphären!).

Da der Energiestrom im Stern von innen nach außen gerichtet ist, so geht auch seine Druckwirkung entgegen der Schwere. Sie teilt sich darum mit dem Gasdruck in die Aufgabe, den Schweredruck auszugleichen. Die Theorie erlaubt, in bekannten Massen die Berechnung des jeweiligen Druckanteils der beiden Rivalen, Gasdruck und Strahlungsdruck, am Gesamtdruck. Dabei zeigt sich, daß in Massenansammlungen, deren Gesamtgewicht geringer ist als 10^{32} g (= 100 Quadrillionen Sonnen), der Strahlungsdruck neben dem Gasdruck noch kaum eine Rolle spielt. In einer Masse von 10^{32} g bestreitet der Strahlungsdruck 0,0016 Bruchteile des Gesamtdruckes, um nun mit weiter steigender Masse sich immer mehr neben dem Gasdruck durchzusetzen. Bei einer 10000mal massigeren Kugel von 10^{36} g ist das Anteilsverhältnis beider Konkurrenten an der Gesamtleistung schon das Umgekehrte wie bei 10^{32} g; hier macht der Strahlungsdruck 0,9984 des Gesamtdruckes aus, und der Gasdruck muß sich mit den verbleibenden 0,0016 Anteilen begnügen. In noch schwereren Massen verschwindet er ganz vor dem nun übermächtigen Konkurrenten.

Diese Zahlen sind zunächst reine Theorie. Sie gewinnen aber ein ganz anderes Ansehen, wenn man die tatsächlich bekannten Massenverhältnisse der Sternwelt betrachtet. Die Masse der Sonne beträgt $1,985 \times 10^{33}$ g. Eine Statistik der bekannten Sternmassen zeigt, daß diese von $\frac{1}{6}$ bis höchstens 200 Sonnenmassen schwanken. Dabei sind aber Sterne von unter $\frac{1}{2}$ und über 30 Sonnenmassen seltenste Ausnahmen; 90% aller feststellbaren Sternmassen liegen sogar in einem noch viel engeren Massenintervall, zwischen 10^{33} g und 10^{34} g. Das ist aber gerade das Massenintervall, in dem nach der Theorie Gasdruck und Strahlungsdruck mit einigermaßen gleichem Kräfteeinsatz in Wettbewerb treten!

Eine tiefere Begründung, warum tatsächlich nur in diesem Massenintervall lebensfähige Sterne vorhanden sein sollen, können wir bei dem heutigen Stande der Forschung noch kaum geben. Mag sein, daß bei zu geringer Intensität des Strahlungsteildruckes, also unterhalb des angegebenen Massenintervalls, dem Weltkörper nur der Strahlungsstrom nach außen, also der Vortrieb mangelt, durch den er sich im Weltraum bemerkbar machen kann. Bei zu starkem Überwiegen des Strahlungsdruckes scheinen nach gewissen Untersuchungen von Zeipels, die sich allerdings auf rotierende Massen beschränken, gewisse gleichgewichtsstörende Faktoren aufzutreten, so daß das Sternindividuum der Gefahr des „Auseinander-

geblasentwerdens“ ausgesetzt scheint und auf die Dauer wenigstens nicht bestehen kann.

Immerhin ist die Tatsache, daß das Vorkommen der Sterne auf das oben gekennzeichnete Massenintervall beschränkt ist, ein eindrucksvoller Hinweis darauf, daß eben das Wechselspiel zwischen Äther und Materie das Leben der Himmelskörper ausmacht. Das ist aber gerade jener Vorgang, dessen Erforschung die Physik der letzten Jahrzehnte ihre Hauptkräfte widmete. In der Kleinwelt der Atome vollzieht sich der Energieaustausch, der letztlich alles physikalische Geschehen bedingt. So erklärt es sich, daß die neuesten Arbeiten über den Bau der Sterne, die vor allem den Namen A. S. Eddingtons tragen, im Grunde als Anwendungen der atomphysikalischen Theorien auftreten. Diese Lage hat der genannte Forscher selbst prägnant gekennzeichnet in der Vorrede zu dem seine zahlreichen Einzelarbeiten zusammenfassenden Werke: „Der innere Aufbau der Sterne“, wo er sagt: „Es würde uns gegenwärtig schwer fallen, eine Antwort auf die Frage zu geben, ob der Stern oder das Elektron der eigentliche Held unseres Epos ist.“

Die Grundvorstellung der modernen Atomtheorie, das Bohr-Rutherford'sche Atommodell mit seinem unvorstellbar kleinen Atomkern als Zentralsonne, um die in rechnerisch genau bestimmten Abständen die je nach der Beschaffenheit des Atoms an Zahl verschiedenen Elektronen gleich Planeten kreisen, ist heute beinahe populäres Gemeingut. Auch daß diese Elektronen, wenn sie aus irgend einem Grunde aus ihrer vorgeschriebenen Bahn in eine andere „emporgehoben“ werden oder von einem solchen Ausfluge zu ihrer normalen Bahn zurückkehren, eine durch bestimmte Spektrallinien charakterisierte Lichtstrahlung aussenden, ist in zahlreichen populären Darstellungen dem Gemeintwissen zugänglich gemacht worden. Obwohl die Wissenschaft in manchen Stücken schon über diese „Modelle“ hinausgeschritten ist, lassen sich die ihnen zu Grunde liegenden Tatbestände am besten und sachlich durchaus richtig in ihrer Bildersprache wiedergeben. Darum soll uns auch im Folgenden der Held unseres Epos, „das Atom in der Elektronenrüstung“, in der angegebenen Gestalt vor Augen bleiben.

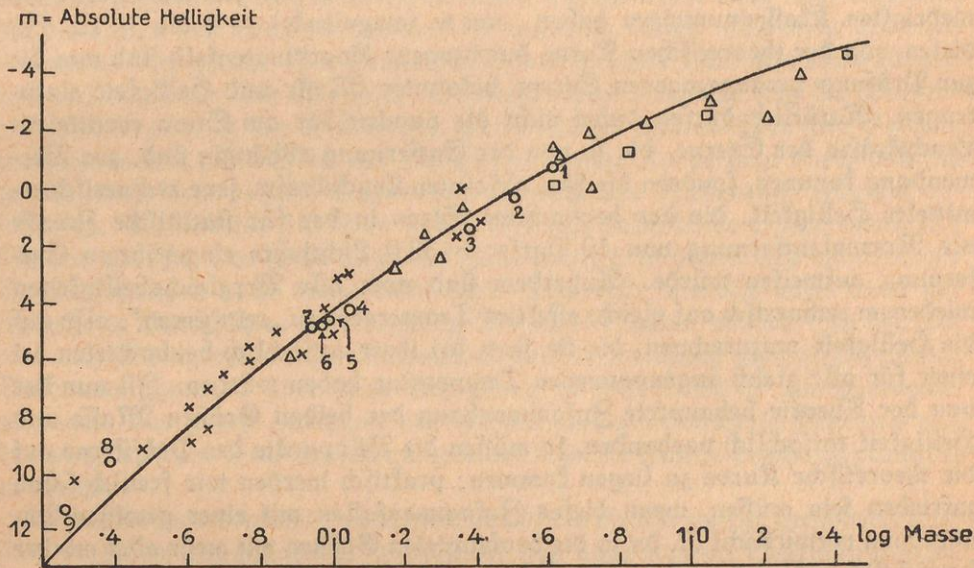
Wie verhält sich nun das Atom im Sterninnern, in das wir an der führenden Hand Eddingtons zunächst hinabsteigen? Wie können wir überhaupt von ihm Kunde erhalten? Denn aus dem Sterninnern mit seinen Millionen von Graden dringt keine Lichtstrahlung nach außen. Was von dort in der Runensprache der Sternspektren zu uns herübergesunkt wird, stammt ausschließlich aus den obersten Schichten der Sterne, wo die Temperaturen schon auf wenige Tausende von Graden herabgesunken sind. Für die Beurteilung des Verhaltens der Atome im Sterninnern sind wir auf die auf der Laboratoriumserfahrung und den allgemeinen energetischen Prinzipien aufgebaute Theorie angewiesen. Danach herrscht bei den Temperaturen des Sterninnern eine „kurzwellige“ Strahlung, wie wir sie mit unseren Röntgenröhren zu erzeugen gelernt haben. Nicht gerade die allerkurzwelligste, die wir kennen, und die der Röntgentechniker als „harte“ bezeichnen würde, sondern eine ziemlich weiche Strahlung. In diesen Strahlungsstrom sind die Atome mit ihren Elektronen eingebettet. Nun hat aber auch schon die weichste Röntgenstrahlung in ganz beträchtlichem Maße die Fähigkeit, die Elektronen aus dem Atomverbande herauszulösen, das Atom zu „ionisieren“.

Der Vorgang der Ionisation ist überall dort zu erwarten, wo ein hinreichend starker Impuls auf die kreisenden Elektronen auftritt, sei es, daß schon freie Elektronen großer Geschwindigkeit mit ihnen zusammenstoßen, sei es durch einbrechende Ströme von Atherenergie. Eben diese starken Impulse sind aber im Sterninnern mit seiner intensiven Energiestrahlung in einer Überfülle vorhanden, die wir in unseren Laboratoriumsversuchen nicht einmal erträumen dürfen. So kommt es, daß die dort vorhandenen Atome ihre „Elektronenkrinoline“ fast vollständig abgelegt haben, oder um in der Sprache der Junft zu bleiben, fast völlig „ionisiert“ sind. Dabei ist ihnen aber keine Ruhe verstatet. Könnten wir ins Sterninnere mit jener Kleintwelt angepassten Augen hineinschauen, so erblickten wir ein wildes Durcheinander von umschwirrenden Atomen oder richtiger Atomkrüppeln, die sich jeden Augenblick einer Anrennpelung durch die noch hundertmal flinker umherfliegenden freien Elektronen versehen müssen. Kommt ihnen ein solches gar zu nahe, so muß es freilich seine Zudringlichkeit mit der Aufgabe seiner Freiheit büßen. Es wird eingefangen und dem Atomverbande zur Ergänzung einverleibt. Doch da kommt schon wieder ein strudelndes Gewoge von X-Strahlen, die das Elektron mit sich nehmen und ihm die Freiheit wiedergeben, freilich für ebenso kurze Zeit, den zehnmilliardsten Teil einer Sekunde etwa. Oder zwei Atome selber prallen aufeinander und reißen sich dabei die letzten Reste ihrer Elektronenkleidung vom Leibe. So geht es hin und her im wilden Wirbeltanz, ohne daß dabei die Atome und Elektronen im ganzen genommen durchgreifende Veränderungen erfahren. Nicht einmal ihren Ort ändern sie im Mittel, ähnlich wie ja auch die Mücken im tanzenden Schwarm so ungefähr auf derselben Stelle verbleiben.

Trotzdem hat dieser „Atomjazz“, wie ihn Eddington launig nennt, seine tiefe Bedeutung. Ihm fällt die Aufgabe zu, den Strahlungsvorrat des Sterninnern nicht zu schnell nach außen gelangen zu lassen. An sich dringen ja die Atherwellen mit Lichtgeschwindigkeit vorwärts. So oft aber ein Elektron durch sie aus der vorgeschriebenen Atombahn gehoben oder gar ganz dem Atomverband entrissen wird, entzieht es dem Energiestrom eine gewisse (ganze) Zahl „Energiequanten“ und benutzt sie zur Erhöhung seiner eigenen kinetischen Energie. Dieser als Absorption bezeichnete Vorgang ist derart häufig, daß die in eine Sternschicht eintretende Strahlung schon nach dem Durchsetzen weniger Meter aufgebraucht ist. Da, wie gesagt, die Atome und die freien Elektronen trotz ihrer wilden Tänze ihre nähere Umgebung kaum verlassen, so kommt die an sie gebundene Energie für den Weitertransport, nach außen zunächst nicht in Frage. Daß ein solcher Weitertransport, nun aber stark verlangsamt, doch eintritt, dafür sorgt der entgegengesetzte Vorgang, die Emission. Sooft nämlich ein freies Elektron beim Zusammenstoß mit einem Atomrest wieder eingefangen wird, gibt es seine überschüssige kinetische Energie wieder als Strahlung an den Ather ab. Die so neu entstehende Strahlung wird dabei um so langwelliger, je weiter nach außen, also nach den Gebieten tieferer Temperaturen zu, die Emission stattfindet, bis sie schließlich von den äußersten Schichten als Licht- und Wärmestrahlung den Ausweg in den freien Weltraum findet.

Dieser hier nur sehr summarisch geschilderte Vorgang des Energietransportes durch das Sterninnere ist das Kernstück der modernen physikalischen Theorien vom Sternaufbau. Natürlich ist das Ziel dieser Theorie mit einer

solchen Beschreibung keineswegs erreicht; es gilt vielmehr, aus den Ansaggleichungen, die das Gleichgewicht zwischen Schwere, Strahlungsdruck und Gasdruck ausdrücken und die Bilanz der mannigfach durcheinanderspielenden Energiewandlungen aufzustellen suchen, eine Formel herauszuarbeiten, die aus bekannten oder beobachtbaren Sternaten die uns vor allem interessierende Sternstrahlung zu berechnen gestattet. Obwohl das Sterninnere besonders wegen des weitgetriebenen Abbaus der komplizierteren Atomgebilde physikalisch „einfacher“ ist als die Systeme, mit denen wir es unter unseren irdischen Verhältnissen zu tun haben, bedurfte es zur Bewältigung dieser Aufgabe des ganzen physikalischen und mathematischen Rüstzeugs der Atom- und Quantentheorie. Trotzdem in den Einzelheiten dieser Arbeit noch genug der



○ Erstklassige, × Zweitklassige, □ Cepheiden, Δ Verfinsterungsveränderliche.

1 Capella, 2 Capella (schwächere Komponente), 3 Sirius, 4 α Centauri¹, 5 Sonne, 6 α Centauri², 7 Hyaden (Mittel aus sechs Doppelsternen), 8 Krüger 60¹, 9 Krüger 60².

Fragezeichen und Dunkelheiten übrig bleiben, ist es der Meisterhand Eddingtons gelungen, aus dem Gleichungsgewühl seiner Ansätze die gesuchte Leitformel herauszukristallisieren. Die von ihm aufgestellte „Massenhelligkeitsformel“ (Luminositätsgesetz) erlaubt, für einen Stern gegebener Masse die aus ihm austretende Strahlung zu berechnen, wobei noch die Oberflächentemperatur, die sog. effektive Temperatur des Sternes, als bekannt vorauszusetzen ist. In Wirklichkeit geht allerdings auch noch die Dichte bzw. das mittlere Molekulargewicht der Sternmasse in die Formel ein, doch spielt es praktisch die Rolle einer festen Größe, da eben infolge der weitgehenden Ionisation das Durchschnittsgewicht der als gleichwertige Individuen auftretenden Teilchen, Elektronen und Atomreste für alle Gassterne so ziemlich das gleiche ist, gleichviel welche chemischen Elemente die Sternmasse ursprünglich in sich vereinigt.

Hier ist nun der Ort, wo an Stelle der rein physikalischen Theorie die astronomische Beobachtung in ihre Rechte eintritt. Da wir die Helligkeit der Sterne unmittelbar beobachten können, ist nunmehr die Möglichkeit gegeben, die Theorie an der Erfahrung zu prüfen.

Diese Prüfung läßt sich am einfachsten und anschaulichsten mit Hilfe einer Kurvendarstellung ausführen. Es gilt, den in der Eddingtonschen Formel rechnerisch ausgedrückten Zusammenhang zwischen Sternmasse und Helligkeit graphisch wiederzugeben. Im rechtwinkligen Koordinatensystem sind auf der wagrechten Achse die Massenwerte, tatsächlich aus praktischen Gründen ihre Logarithmen, aufgetragen, wobei die Sonnenmasse als Einheit genommen ist (Punkt 0,0 der Achse), auf der senkrechten die Helligkeiten im astronomischen Maße der Größenklassen, wobei bekanntlich die hellsten Sterne die niedrigsten Klassennummern haben, von m (magnitudo) -4 bis $+12$. In dieses von der theoretischen Kurve durchzogene Koordinatenfeld sind nun die zur Prüfung herangezogenen Sterne bekannter Masse und Helligkeit einzutragen. Natürlich dürfen dabei nicht die unmittelbar am Stern ermittelten Leuchtkräfte der Sterne, die ja von der Entfernung abhängig sind, zur Verwendung kommen, sondern die sog. absoluten Leuchtkräfte, jene rechnerisch ermittelte Helligkeit, die der beobachtete Stern in der für statistische Zwecke als Normalentfernung von 10 Parsec = 32,6 Lichtjahre eingeführten Entfernung aufweisen würde. Außerdem sind noch alle Vergleichshelligkeiten wiederum rechnerisch auf gleiche effektive Temperatur zu „reduzieren“, also auf die Helligkeit umzurechnen, die sie statt bei ihrer tatsächlich beobachteten bei einer für alle gleich angenommenen Temperatur haben würden. Ist nun der von der Theorie behauptete Zusammenhang der beiden Größen Masse und Helligkeit tatsächlich vorhanden, so müssen die Bildpunkte der Prüfsterne auf die theoretische Kurve zu liegen kommen; praktisch werden wir freilich schon zufrieden sein müssen, wenn dieses Zusammenfallen mit einer gewissen Annäherung verwirklicht ist, da ja die beobachteten Größen mit mehr oder minder beträchtlichen Unsicherheiten und Fehlern behaftet sind.

Da wir Sternmassen unmittelbar nur an gewissen Doppelsternsystemen zu bestimmen imstande sind, deren Entfernungen zugleich trigonometrisch oder in Ermangelung dieser Möglichkeit auf Grund mehr oder minder plausibler Abschätzungen ermittelt werden konnten, ist das zu unserer Prüfung verfügbare Material nicht allzu reichhaltig und auch nicht gleichwertig. Capella, Sirius, Alpha Centauri, die Sonne selber, sechs Doppelsterne aus der Sterngruppe der Hyaden und ein als Krüger 60 bezeichneter Doppelstern sind in erster Linie dabei verwendet. Dazu kommen noch eine Reihe anderer Sterne, bei denen die Massenbestimmung als von zweiter Güte zu bezeichnen ist.

Tatsächlich zeigt schon der erste Blick auf die Kurve eine verhältnismäßig sehr gute Übereinstimmung der Theorie mit dem vorliegenden Beobachtungsmaterial. Das ist natürlich nicht nur für den Theoretiker hoch erfreulich, auch die astronomische Praxis ist an dem glücklichen Ergebnis im höchsten Grade interessiert, da sie ja nun in der theoretischen Massenhelligkeitsformel ein Mittel besitzt, aus der Helligkeit von Sternen, deren Masse nicht unmittelbar ermittelt werden kann, wie z. B. der Einzelsterne, die Masse zu erschließen. Es liegt kein Grund vor, zu bezweifeln, daß die physikalischen Voraussetzungen der

Theorie in ihren Hauptzügen auf fast alle Sterne zutreffen. Da nun ihr Hauptergebnis an dem Beobachtungsmaterial Probe hält, ist ihre weitere Anwendung, wenn sie mit der immerhin notwendigen Kritik vorgenommen wird, durchaus gerechtfertigt und erfolgversprechend.

Wie jede neue Entdeckung hat auch der erfolgreiche Vorstoß Eddingtons eine Fülle neuer Fragen und Perspektiven erschlossen. Die erste Überraschung brachte gerade die Durchführung des Vergleiches zwischen Theorie und Erfahrungsmaterial, wie er in unserem Kurvenbild vorliegt. Unter den Voraussetzungen der Theorie steht an hervorragender Stelle die Annahme, daß die Materie der von ihr erfaßten Sterne sich im Zustande der vollkommenen Gase befinde. Nur für diesen gelten die Gasgesetze in der in den Grundgleichungen angelegten Form. Nach unseren irdischen Erfahrungen kann aber Materie, die die Dichte des Wassers und darüber aufweist, längst nicht mehr als vollkommenes Gas gelten. Die Dichte der Sonne ist schon 1,42, also etwa anderthalbmal die Dichte des Wassers. So mußte man erwarten, daß die Massenhelligkeitsbeziehung für Sterne von Sonnendichte und darüber ihre Geltung verlieren würde. Ein Blick auf die Eddingtonsche Kurve zeigt aber, daß sich gerade auch diese dichten Sterne dem theoretischen Kurvenzuge sehr gut anschließen. An und für sich ist es immer eine sehr bedenkliche Sache, wenn eine Theorie zu gut, das heißt auch auf Fälle zutrifft, in denen ihre wesentlichen Voraussetzungen nicht verwirklicht sind. Das erste Verdikt wird dann auf fehlerhafte Durchführung oder falsche Annahmen lauten müssen. In der Tat war auch Eddington im ersten Augenblicke der Überraschung geneigt, ein solches Verdammungsurteil über seine Schöpfung zu fällen. Es ist ihm dann aber gelungen, das zuerst durchaus unerwartete und unerwünschte Ergebnis aus den physikalischen Grundanschauungen der Theorie heraus durchaus plausibel zu machen.

Unsere Laboratoriumserfahrungen, aus denen die Gasgesetze hergeleitet sind, sind an einem Atommaterial gewonnen, das nach unseren Begriffen normal ist und insbesondere seine volle Elektronenausrüstung fast unverfehrt mit sich führt. Ein Atom mit seinen nach Atommaßen weitgedehnten Elektronenringen verlangt aber zur vollen Auswirkung seiner Kräfte auch einen verhältnismäßig weiten Raum und setzt einer Einschränkung seines Eigenraumes starke Kräfte entgegen, die bei der Kompression auf größere Dichte mit ins Spiel treten und die Abweichungen von der Idealforn der Gasgesetze verursachen. Nun sahen wir aber, daß im Sterninnern „die Krinolinen außer Mode gekommen sind“, somit der für die nun leichtgeschürzten Atomreste und die noch viel winzigeren freien Elektronen, die hier als Individuen des „Elektronengases“ im Sinne der kinetischen Gastheorie mit auftreten, benötigte Eigenraum viel geringer geworden ist. Die eben genannten Abwehrkräfte gegen die Verdichtung kommen also erst bei viel stärkerer Zusammenpackung bzw. Dichte zur Geltung, somit auch die Abweichungen vom idealen Gaszustande. Die Erweiterung des Gültigkeitsbereiches der Massenhelligkeitsformel hat somit nichts Überraschendes oder gar Bedenkliches mehr. — Wie weit tatsächlich die Zusammenballung der fast völlig ionisierten Atommassen getrieben werden kann, zeigen die Beobachtungen an einigen Sternen, die man ihres die Weißglut anzeigenden Spektralcharakters wegen „weiße Zwerge“ genannt hat.

Ihr bekanntester Vertreter ist der sog. Siriusbegleiter, die kleinere Komponente des als Doppelstern erkannten Sirius, der von Bessel zunächst durch Rechnung ermittelt und gut dreißig Jahre später von dem amerikanischen Optiker Alban Clark bei Prüfung eines seiner berühmten Fernrohrobjektive zuerst gesehen wurde. Bei diesem führt die Massebestimmung nach der bei den Doppelsternen angewandten Methode auf Dichtewerte, die zunächst als „grotest“ allgemein abgelehnt wurden. Der dichteste uns aus den Aufbaustoffen der Erde bekannte Grundstoff ist das Metall Osmium, von dem 1 cm-Würfel 22,5 g wiegt, also 22,5mal so viel als 1 cm Wasser. Im selben Maße ausgedrückt, ergibt sich für die Masse des Siriusbegleiters die Dichte 61 000, also das rund Dreitausendfache der Dichte des schwersten Erdmetalls. An einem Kubikzentimeter dieser Masse würde ein starker Mann schon sehr gehörig zu schleppen haben, wiegt er doch über einen Zentner.

Wir haben Grund zu der Annahme, daß die Zahl dieser auch in anderer Hinsicht sehr interessanten Himmelskörper gar nicht gering ist, wenn wir auch nur wenige näher kennen. Obwohl sie der Theorie noch manche Rätsel aufgeben, haben wir angesichts der Eddingtonschen Feststellungen heute keinen Grund mehr, die ihnen zukommenden extrem hohen Dichtezahlen als unmöglich abzulehnen.

Ernster sind die Schwierigkeiten, die der Anerkennung der Eddingtonschen Theorie bei den Anhängern der heute meist vertretenen Theorie der Sternentwicklung erwachsen. Wir möchten aber die Erörterung dieser äußerst interessanten Probleme und Kontroversen für eine spätere Darstellung aufsparen. Dagegen seien zur Vervollständigung unserer Kenntnis vom physikalischen Aufbau der Sterne noch einige kurze Ausführungen über die Verhältnisse in den oberen Sternschichten angefügt.

Die Eigenarbeit Eddingtons beschränkt sich im wesentlichen auf die Erforschung des Sterninnern. Nun haben aber gerade die von seiner Arbeit weniger erfaßten äußeren Schichten für den Astrophysiker begreiflicherweise besonderes Interesse. Leider bieten sie der theoretischen Erschließung, die Eddington für die tieferen Schichten mit so viel Glück durchführte, stärkeren Widerstand, hauptsächlich darum, weil hier in der nur nach Tausenden statt nach Millionen Grad zählenden Temperatur die durch die hochgetriebene Ionisation verursachten Vereinfachungen fortfallen. „Die einfache Kultur des Sterninnern hat hochgetriebener Zivilisation Platz gemacht.“ Schon beginnt der chemische Unterschied der Elemente, den wir im Sterninnern praktisch vernachlässigen konnten, eine entscheidende Rolle zu spielen. Es treten Strömungen und Wirbel auf, teils durch den Einfluß der Rotation, auf die wir im Vorigen gleichfalls keine Rücksicht zu nehmen brauchten, teils durch Sondervorgänge elektromagnetischer Natur: elektromagnetische Wirbelfelder, wie sie schon vor Jahrzehnten Hale in den bekannten Sonnenflecken festgestellt hat. In einer im Vergleich zu den Sternausmaßen verschwindend dünnen Schicht, der „Photosphäre“ — Eddington schätzt ihre Dicke auf etwa 15 km —, entstehen die dunklen Absorptions- und die selteneren hellen Emissionslinien der Sternspektren. Magh Ned Saha, ein indischer Astronom, hat für ihre Deutung die Richtlinien angegeben. Dabei spielt nicht etwa das Vorhandensein oder Nichtvorhandensein der einzelnen Elemente die Hauptrolle —

das Nichtauftreten der charakteristischen Linien ist kein Beweis für ein wirkliches Nichtvorhandensein des fraglichen Stoffes in der betreffenden Schicht —, sondern die Schlüsse, die aus dem Auftreten einzelner bestimmter Linien auf den elektrischen Zustand der aussendenden Atome, auf die in der Schicht herrschende Dichte und vor allem auf die Temperatur zu ziehen sind.

Noch über der Photosphäre liegt eine an Ausdehnung viel mächtigere Schicht, die Chromosphäre, die die Materie nur noch in äußerster, unseren Laboratoriumsmitteln gar nicht mehr erreichbarer Verdünnung enthält. Sie ist nach Milne physikalisch gekennzeichnet durch die fast unumschränkte Alleinherrschaft des von den Lichtstrahlen ausgeübten Strahlungsdruckes, der mit den wenigen dort noch vorhandenen Atomen, namentlich dem Calcium, Fangball spielt. Diese Calciumatome schwimmen gleichsam oben auf dem Lichtstrom, aber nur, wenn sie eines ihrer Bahnelektronen verloren haben, also einfach ionisiert sind. Gelingt es ihnen, das verlorene Elektron wieder einzufangen, so sinken sie wieder in die tiefere Schicht zurück, bis ein neuer Lichtimpuls sie wieder ionisiert und ihnen die Schwebefähigkeit wiedergibt.

Noch weit über die Chromosphärenschicht hinaus erstrecken sich dann jene Schichten, die als Korona den eigenartig schönen Anblick der Sonne bei totaler Verfinsterung gewähren. Sie sind noch fast unerforscht, insbesondere ist die Zugehörigkeit der in ihrem Spektrum auftretenden hellen Linie im Grün der Koronulinie zu einem im System der chemischen Elemente verzeichneten Grundstoff noch nicht ermittelt.

Was wir im Vorigen von dem großangelegten Versuche Eddingtons und seiner Vorgänger, eine Theorie des innern Aufbaues der Gestirne und des verwickelten Triebwerks ihrer Strahlungstätigkeit zu schaffen, mitteilen konnten, reicht leider nicht von weitem an die Fülle der in den Arbeiten jener Forscher gebotenen Aufschlüsse und Probleme heran. Einiges wird noch nachzutragen sein, wenn wir die Folgerungen besprechen, die aus diesen Arbeiten für die Auffassung der Kosmogonie und Sternentwicklung zu ziehen sind. Freilich ist der mühsamen Forscherarbeit auf diesen Gebieten, auch nach dem Urteil ihrer erfolgreichsten Pioniere, einstweilen nur ein sehr bescheidener Teilerfolg beschieden. Das ist nun aber einmal das Los alles wissenschaftlichen Fortschreitens, daß es neue Türen nur eröffnet, um den Weg zu vielen andern, noch schwerer versperrten freizulegen. Wie sollte es auch anders sein, wenn ein Menschenhirn Schöpfergedanken nachzugehen sich unterfängt? Immerhin, jeder Blick in die Werkstatt des Schöpfers, der Kleinstes und Größtes, Atom und Sternriesen, so wunderbar miteinander verwob, ist reicher Gewinn und wohl allen Mühens der Weisen wert.

Albert Maring S. J.