

Astrophysikalische Arbeitswoche

im Deutschen Wissenschaftlichen Institut in Kopenhagen

vom 19. bis 24. September 1941.

Neben zwei Vorträgen allgemeineren Charakters, Prof. Heisenberg, Leipzig: *Höhenstrahlung*, und Prof. Kienle, Potsdam: *Temperatur der Sterne*, zu denen ein größerer Kreis von Angehörigen der Universität Kopenhagen geladen war, fanden vier Colloquien über astrophysikalische Spezialprobleme statt.

Im ersten Colloquium gab Dr. **Biermann**, Babelsberg, einen Bericht über die Theorie der Novae¹⁾.

Diese sog. Neuen Sterne, von denen jedes Jahr eine größere Anzahl in unserem Sternsystem aufleuchtet, sind charakterisiert durch einen sehr raschen Anstieg ihrer Helligkeit auf das Zehn- bis Hunderttausendfache des Wertes vor dem Aufleuchten. Gleichzeitig zeigt das Spektrum, daß die äußersten Schichten des Sternes mit einer Geschwindigkeit von der Ordnung 500—1000 km/s abgestoßen werden. In der Maximalhelligkeit verharrt der Stern aber nur einige Tage, um danach erst schnell, dann langsamer an Helligkeit zu verlieren, bis schließlich nach einigen Jahrzehnten die ursprüngliche Helligkeit wieder erreicht ist. Die visuelle Leuchtkraft ist in diesem Endstadium etwa gleich der der Sonne.

Man hat zunächst vermutet, daß mit dem Ausbruch ein katastrophenartiger Umbau des Sterninneren verknüpft sei. Indessen zeigt eine genauere Untersuchung, daß

1. die bei einem Ausbruch ausgestrahlte Gesamtenergie nur ein ganz kleiner Bruchteil der potentiellen und der thermischen Energie des Sternes ist;
2. sind die Nova-Ausbrüche viel häufiger, als sie es sein könnten, wenn jedem Stern, der seiner Leuchtkraft nach überhaupt eines Nova-Ausbruchs fähig wäre, ein solcher nur einmal zustoßen würde.

Es ist daher sehr wahrscheinlich, daß die Neuen Sterne nur ein besonderer Typus der Veränderlichen Sterne sind, bei dem die Periode des Lichtwechsels mindestens von der Ordnung 1000 Jahre ist, während die verhältnismäßige Seltenheit der Ausbrüche ausgeglichen wird durch eine besonders hohe Intensität. Aus dieser Auffassung folgt, daß die Oberflächentemperatur dieser Sterne in ihrem Normalzustand sehr hoch sein muß, denn auch das Endstadium eines Novaausbruchs ist gerade dadurch charakterisiert. Ferner ist bekannt, daß die Leuchtkraft dieser Sterne im Normalzustand nur mittelhoch ist. Daraus folgt, daß diese Sterne einen im Raum ziemlich seltenen Übergangstyp darstellen müssen, daß sie nämlich hinsichtlich ihres Radius zwischen den Sternen vom Typus der Sonne und den sog. Weißen Zwergen stehen sollten. Ihre mittlere Dichte dürfte von der Ordnung 10^2 sein. Sie ist also noch nicht so hoch, daß im Sterninneren wie in den Weißen Zwergen Entartung der freien Elektronen (im Sinne der statistischen Mechanik) einsetzen könnte. Im Zusammenhang mit der Theorie der Elementumwandlung im Inneren der Sterne, über die weiter unten berichtet wird, folgt daraus, daß diese Sterne in ihrem Inneren keinen Wasserstoff enthalten können.

Die genannten Daten genügen nun zur Untersuchung des inneren Aufbaus dieser Sterne nach den üblichen Methoden. Diese Untersuchung, die vom Vortr. durchgeführt wurde, ergab, daß ausgedehnte äußere Bereiche dieser Sterne sich gerade an der Grenze der Stabilität der Schichtung befinden sollten, derart, daß bei der langsamen Kontraktion ein gelegentlicher Aufbau einer Instabilitätszone mit nachfolgendem Umlappen angenommen werden kann. Die quantitative Durchführung zeigt, daß sowohl die während eines Novaausbruchs ausgestrahlte Gesamtenergie als auch die Geschwindigkeit, mit der die äußersten Schichten des Sternes fortgeschleudert werden, in ihrer Größenordnung befriedigend erklärt werden. Es ergibt sich damit ein Bild von der Natur der Nova-Ausbrüche, das sämtliche gesicherten Beobachtungstatsachen in einheitlicher Weise verständlich macht.

Im zweiten Colloquium gab Prof. **Kienle**, Potsdam, eine Übersicht über den gegenwärtigen Stand unserer Kenntnisse von der Energieverteilung im kontinuierlichen Spektrum der Sterne.

Diese Aufgabe ist im letzten Jahrzehnt an verschiedenen Stellen in zwei Schritten angegriffen worden. Zunächst hat man die Energieverteilung der Sterne verschiedenen Spektraltyps — d. h. im wesentlichen verschiedener Oberflächentemperatur — miteinander verglichen. Als Bezugssystem hat man die Energieverteilung im Spektrum der Sterne des Spektraltyps A0 gewählt, der charakterisiert ist durch eine maximale Intensität der Balmer-Serie. In besonders großem Maßstab sind, neben ausgedehnten ähnlichen Beobachtungsreihen, die in Greenwich und von einigen französischen Beobachtern angestellt wurden, derartige Relativmessungen an der Göttinger Universitätssternwarte seit 1925 durchgeführt worden, u. zw. hat man ein über den ganzen Nordhimmel verteiltes Netz

von Sternen aller Spektraltypen untereinander verglichen und ihre Energieverteilung im Bereich 3700 Å—6500 Å relativ zu dem Mittel aus neun Sternen der Spektralklasse A0 bestimmt.

Alsdann hat man einige ausgewählte Sterne an Laboratoriumslichtquellen angeschlossen und auf diese Art das ganze Netz absolut geeicht. Dieser zweite Schritt, der sog. absolute Anschluß, ist technisch erheblich schwieriger und daher nicht ganz mit der gleichen Genauigkeit durchzuführen wie der zuvor beschriebene relative Anschluß. Als Laboratoriumslichtquellen wurden dabei Wolframbandlampen verwandt, die ihrerseits in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt an einen schwarzen Körper angeschlossen wurden. Außer in Göttingen wurden derartige Messungen zum absoluten Anschluß auch in Greenwich, Ann Arbor (USA.) und Paris ausgeführt.

Die Ergebnisse dieser Messungen lassen sich folgendermaßen zusammenfassen: Die Energieverteilung im Spektrum der A0-Sterne läßt sich innerhalb der Meßfehler noch gerade durch eine einheitliche Farbtemperatur darstellen, die indessen wesentlich über der wirklichen Temperatur der Sternoberfläche liegt. Diese letztere ergibt sich aus dem beobachteten Ionisationsgrad oder auch aus der Gesamtstrahlung dieser Sterne pro Flächeneinheit der Oberfläche zu etwa 10000° abs. Die relative Energieverteilung in dem der Messung zugänglichen Spektralbereich dagegen entspricht der eines schwarzen Körpers von 15000 — 16000° . Das ist möglich, da bei diesen Temperaturen das Energiemaximum weit außerhalb des zugänglichen Spektralbereichs liegt. Nach den Messungen scheint es, daß die Farbtemperatur im langwelligen Gebiet (5000 bis 6500 Å) um einige 1000° höher ist als in dem kurzwelligen Gebiet (4000—5000 Å). Dies ist nach der Theorie der Sternatmosphären auch zu erwarten, obwohl nach dieser die Farbtemperatur eigentlich noch höher sein müßte als gemessen.

Die Ursache dieses Widerspruchs zwischen Theorie und Beobachtung, der bei den Sternen höherer Oberflächentemperatur noch deutlicher ist, ist gegenwärtig noch nicht vollständig geklärt. Für die Sterne niedrigerer Oberflächentemperatur ist die Messung des wahren Kontinuums ungleich schwieriger wegen der großen Zahl der Spektrallinien. Bei der Sonne z. B. finden sich auch bei Anwendung hoher Dispersion im Spektrum unterhalb 4000 Å. höchstens noch einige „Fenster“ zwischen den Linien, durch die man das wahre Kontinuum erblickt. Auch die Theorie des kontinuierlichen Spektrums ist viel komplizierter, da höchstwahrscheinlich mehrere Mechanismen an der Absorption des Strahlungsstromes in der Sternatmosphäre beteiligt sind.

Im dritten Colloquium berichtete Dr. **Biermann**, Babelsberg, über die quantenmechanischen Methoden zur Berechnung der Oscillatorenstärken (auch f-Werte genannt) von Spektrallinien.

Diese Oscillatorenstärken sind diejenigen dimensionslosen Konstanten, mit denen die wirklichen Anzahlen der absorbierenden Atome multipliziert werden müssen, wenn man statt mit der exakten quantenmechanischen Theorie mit der klassischen Theorie der Absorption arbeiten will. Die neuere Behandlung der Absorption des Lichtes in den Spektrallinien hat nämlich gezeigt, daß man die aus der klassischen Theorie folgenden Zusammenhänge zwischen der Linienintensität und der Anzahl der absorbierenden Atome unverändert beibehalten kann, wenn man nur die letztere um den für die betreffende Spektrallinie geltenden f-Wert korrigiert. Wie man leicht überlegt, bilden die f-Werte die Grundlage für die quantitative chemische Analyse der Gestirne. Daher sind sie besonders wichtig für die Astrophysik.

Die wellenmechanische Berechnung dieser f-Werte zerfällt in zwei Schritte, nämlich 1. die Bestimmung des Atomfeldes und 2. die Berechnung der Wellenfunktionen des Leuchtelektrons.

Die Berechnung der Oscillatorenstärke aus den Wellenfunktionen von Ausgangs- und Endzustand erfordert dann nur noch eine einfache Quadratur.

Für die Berechnung des Atomfeldes hat **Hartree** 1928 ein Verfahren angegeben, das die Bestimmung eines in sich widerspruchsfreien Atomfeldes (self consistent field) zum Ziele hat. Dazu wird die Atomhülle nach den Haupt- und Nebenquantenzahlen n und l in Schalen zerlegt, in deren jeder die Verteilung der elektrischen Ladungsdichte bzw. der Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Elektrons kugelsymmetrisch ist. Infolge dieser Einschränkung reduziert sich die *Schrödinger*-Gleichung auf eine gewöhnliche lineare Differentialgleichung zweiter Ordnung. Die Vorstellung **Hartrees** ist nun, daß sich jedes Elektron im elektrostatischen Feld des Kerns und aller übrigen Elektronen bewegt. Diese Bedingung liefert ein System von Differentialgleichungen, das durch successive Approximation gelöst wird. Eine spätere Verbesserung des Verfahrens durch *Fock* trägt auch den infolge von Resonanz auftretenden Austauschkräften zwischen den Elektronen Rechnung. Das **Hartreesche** Verfahren ist die beste zurzeit bekannte Methode zur Berechnung von Atomfeldern.

Bei der Anwendung auf die Berechnung der Oscillatorenstärken ist zu beachten, daß das **Hartreesche** Verfahren in erster Linie auf die Berechnung des Feldes im Atominnern zugeschnitten ist. Berechnet man mit Hilfe dieses Feldes die Wellenfunktionen des Leuchtelektrons, so ergeben sich für die Bindungsenergie Werte, die mehr oder weniger von den richtigen abweichen. Es erscheint daher zweckmäßig, das mit Hilfe des **Hartreeschen** Verfahrens ge-

¹⁾ Vgl. dazu *Grotian*, „Deutung der physikalischen Vorgänge beim Ausbruch der Nova *Herculis*“, diese Ztschr. 50, 315 [1937].

wonnene Atomfeld so zu retuschieren, daß sich bei der Integration der Schrödinger-Gleichung die richtigen Termwerte ergeben. Dieses Verfahren ist z. B. mit Erfolg von *Trumphy* angewandt worden, und bemerkenswerterweise stimmen die so erhaltenen f-Werte z. B. im Falle des Lithiums auch gut mit der Beobachtung überein, während die von *Fock* unter Berücksichtigung der Austauschkräfte, aber nicht mit den beobachteten Termwerten, sondern mit dem unretuschierten self consistent field gerechneten f-Werte, dies mit Ausnahme des Wertes für die erste Linie nicht tun.

Außerdem kann man der Polarisation des Atomrumpfes durch das Leuchtelektron dann auf einfache Art Rechnung tragen, indem man den zur vierten Potenz des Kernabstandes proportionalen Zusatzterm außerhalb des Atomrumpfes zum Potential hinzufügt und durch einen geeigneten Exponentialfaktor dafür sorgt, daß dieser Zusatzterm im Atominnern verschwindet. Der Einfluß der Polarisation im Atominnern läßt sich noch nicht aus der Theorie entnehmen, wird aber bei der Retusche des Kernfeldes automatisch mit berücksichtigt.

Das vierte Colloquium hatte die *Elementumwandlungen im Innern der Sterne*²⁾ zum Gegenstand, über die Dr. von *Weizsäcker*, Berlin, referierte.

Die Beobachtung zeigt uns eine bestimmte Häufigkeitsverteilung der chemischen Elemente, deren Hauptzüge charakterisiert sind durch eine dominierende Häufigkeit des Wasserstoffs und wahrscheinlich auch des Heliums, dann durch eine verschwindend geringe Häufigkeit der im Periodischen System nächstfolgenden Elemente, während die Gruppe Kohlenstoff — Stickstoff — Sauerstoff bis Neon wieder verhältnismäßig häufig ist. Von da ab nimmt die Häufigkeit im großen gesehen stetig mit wachsender Ordnungszahl ab. Außerdem zeigt die Beobachtung, daß die Sterne und insbes. die Sonne über so große Zeiträume mit ziemlich gleichbleibender Helligkeit strahlen, daß die hierbei in den Raum herausgesandten Energiemengen keinesfalls durch chemische oder normale physikalische Prozesse (etwa langsame Kontraktion) frei gemacht sein können. Es muß daher im Innern der Sterne Energiequellen anderer Art geben, und es ist sehr wahrscheinlich, daß ständige Umwandlungen der Elemente die wahren Quellen dieser überaus großen Energiebeträge sind. Diese Umwandlungen sind in den letzten zwei Jahrzehnten unter Einsatz sehr großer experimenteller Mittel im Laboratorium untersucht worden, und es existiert auch eine Theorie dieser Prozesse, die das gesamte zurzeit bekannte experimentelle Material in einheitlicher Weise zusammenfaßt.

Die Anwendung dieser Theorie auf das Innere der Sterne hat nun ergeben, daß bei der Sonne und den ähnlich aufgebauten Sternen, die eine Mittelpunktstemperatur von etwa 15—25 Mio. Grad besitzen, der wesentliche Mechanismus von der folgenden Art ist: Ein Kohlenstoff-Atom lagert zweimal ein Proton an und sendet zwischendurch ein Positron aus. Das Ergebnis ist ein Stickstoff-Kern. Dieser lagert nun wieder ein Proton an mit nachfolgender Aussendung eines Positrons; nach nochmaligem Eindringen eines Protons zerfällt indessen der Kern in einen Helium-Kern und einen Kohlenstoff-Kern. Das Gesamtergebnis dieser Reaktionskette ist also die Umwandlung von vier Protonen in einen Helium-Kern. Dabei wird fast 1% der Masse der Protonen als kinetische Energie der ausgesandten Teilchen frei. Dieser Cyclus deckt die Strahlung der Sonne z. B. für reichlich eine Milliarde Jahre, falls nur 1% der Sonnenmasse umgewandelt wird. Das systematische Studium der im Sterninneren zu erwartenden Kernprozesse hat weiterhin gelehrt, daß alle Reaktionen der Kerne Lithium bis Bor schon bei einer Temperatur von 10 Mio. Grad zum raschen Abbau dieser Elemente auf Helium führen. Dies wird auch der Grund für ihre Seltenheit im Kosmos sein. Ferner können wahrscheinlich bei dieser Temperatur auch die Protonen schon miteinander reagieren, wobei ebenfalls Helium entsteht. Die Elemente schwerer als Sauerstoff dagegen benötigen wesentlich höhere Temperaturen, um mit den Protonen zu reagieren. Das relative Mischungsverhältnis dieser Elemente wird sich daher im Sterninneren kaum ändern können.

Für den Hauptteil der Sterne, die sog. Hauptreihensterne, reichen die beschriebenen Prozesse als Energiequellen aus. Für die überdichten Weißen Zwerge braucht man wegen ihrer geringen Leuchtkraft keine besonderen Energiequellen anzunehmen. Die Sterne von hoher Leuchtkraft und großem Radius dagegen, die „Riesen“, bieten der Theorie besondere Schwierigkeiten, die noch nicht behoben werden konnten. Wahrscheinlich sind die Riesen sehr alte Sterne, und dann müßten sie einen überdichten, vielleicht aus Neutronen bestehenden Kern aufweisen, wenn die gegenwärtige Theorie der Energieerzeugung nicht noch irgendwelche Prozesse übersehen hat. Dies ist aber kaum anzunehmen. Daß die Riesen, wie es der Fall zu sein scheint, einen gewissen Minimalwert der Masse besitzen, könnte mit der geschilderten Eigentümlichkeit des Aufbaus zusammenhängen.

Eine Art Kernprozesse, die erst in jüngster Zeit untersucht worden ist, beruht darauf, daß beim β -Zerfall Neutrinos einen erheblichen Teil der Energie mit sich führen können, die das Elektron bei seinem vorherigen Eindringen in den Kern mitbrachte. Nach einer neueren Untersuchung von *Gamow* scheint es denkbar, daß diese Vorgänge für die Deutung einer extrem hellen Klasse von

Neuen Sternen, der Supernovae, wichtig sind; für die gewöhnlichen Novae dürften sie aus verschiedenen Gründen ohne Belang sein. Da diese Prozesse erst bei Temperaturen oberhalb 90 Mio. Grad in Gang kommen, spielen sie für die normalen Sterne sicher keine Rolle.

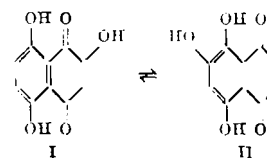
Die auf der Kopenhagener Arbeitswoche behandelten Probleme (vgl. Einleitung) bieten besonders schöne Beispiele für den innigen Zusammenhang zwischen Physik und Astrophysik. Beide haben sich in den letzten Jahrzehnten zum beiderseitigen Nutzen in vielfacher Weise befruchtet.

Göttinger Chemische Gesellschaft.

233. Sitzung am 24. November 1941.

Dr. K. Wallenfels, Heidelberg: *Über die Naphthochinonfarbstoffe der Seeigeln.*

Die Ovarien des Seeigels *Arbacia pustulosa* sind tiefrot gefärbt. Der Farbstoff, das Echinochrom, besitzt biologische Wirkung als Gamon. Es aktiviert die Spermatozoen noch in einer Verdünnung von 1:2,5 Milliarden³⁾. Der Farbstoff hat die Konstitution eines Penta-oxy-äthyl-naphthochinons⁴⁾. Aus den Stacheln derselben Art wurde ein ähnlich gebauter tieferer Farbstoff isoliert, der ein Penta-oxy-acetyl-naphthochinon darstellt⁵⁾. Bei anderen Arten von Seeigeln wurden noch weitere Stachelfarbstoffe, wahrscheinlich ähnlichen Baues, aufgefunden. — Oxynaphthochinone können in verschiedenen tautomeren Formen vorliegen. Vom Naphthopurpurin sollte es 2 Isomere I und II geben.



Es wurde aber bisher nur eine Form erhalten, die je nach den Bedingungen als I oder II reagiert. Man kann I und II auch als Grenzformeln eines mesomeren Zustandes auffassen, bei welchem dem Wasserstoff der peri-OH-Gruppen kein fester Platz zugewiesen werden kann. Echinochrom kann in 6 verschiedenen tautomeren Formen existieren, in welchen es als 1,2-, 1,4-, 2,6-Naphthochinon aufzufassen ist. Bei den Acetylnaphthochinonen vom Typ des Stachelfarbstoffs ergibt sich eine weitere Komplikation durch Enolisierung der CO-Gruppe der Seitenkette. Auch haben diese Verbindungen als o-Oxy-acetophenone die Möglichkeit zur Bildung eines weiteren Chelatringes. Die Hydrierung von 2-Acetyl-3-oxy-naphthochinon zeigt, daß bei verschiedenem pH verschiedene tautomere Formen bevorzugt sind.

Auch das Redoxpotential kann zur Aufklärung solcher Konstitutionsfragen herangezogen werden. Substitution von Naphthochinon führt je nach Art und Ort zu einer bestimmten Erniedrigung des Potentials. Bei Einführung mehrerer Substituenten addiert sich die Wirkung sehr regelmäßig. So kommt es, daß mit steigender Substitution das Potential schnell negativer wird. Echinochrom hat daher ein extrem negatives Potential, das aber infolge der großen Zersetzlichkeit der Leukoverbindung nicht genau gemessen werden kann. Das von *Cannan* gemessene Potential von 0,1995 V⁶⁾, das an einem noch unreinen Präparat gemessen wurde, ist sicher noch um etwa 100 mV zu positiv. pH-Messungen an Seeigeleiern zeigen, daß die reduzierende Kraft der Zellen nicht ausreicht, um die Reduktion zum Leukofarbstoff durchzuführen. Dies führte zur Aufdeckung eines anderen Mechanismus der Oxydo-Reduktion des Echinochroms. Echinochrom ist selbst Reduktionsmittel. Es vermag an geeignete Acceptoren wie p-Benzochinon oder 2,6-Dichlorphenol-indophenol u. a. 2 Atome Wasserstoff abzugeben. Das Dehydroechinochrom entspricht dem Naphthodichinon, das man erhält, wenn man Naphthazarin mit Bleitetraacetat dehydriert⁷⁾. Wie dieses ist es hellgelb gefärbt. Es läßt sich durch Ascorbinsäure, Glutathion, Hydrazobenzol oder H₂S wieder zur tieffarbigen „Leukostufe“ reduzieren. Das Potential dieser Oxydo-Reduktion liegt in der Gegend von 0 bei pH 7, also im selben Bereich wie das der meisten biologischen Redoxsysteme.

Bei der Untersuchung der Frage, mit welchem Oxydationsmittel die Eizelle Echinochrom dehydrieren kann, hat man an H₂O₂ gedacht, da in den Seeigeleiern gelbes Ferment nachgewiesen ist und daher sicher H₂O₂ entsteht. H₂O₂ ist jedoch ohne jede Wirkung auf Echinochrom. Fügt man jedoch etwas Peroxydase (aus Meerrettich) hinzu, so bleicht die Lösung sofort aus, die tiefrote Farbe geht in Hellgelb über. Der Vorgang läßt sich stufenphotometrisch verfolgen, das pH-Optimum liegt im selben schwachsauren Bereich wie bei der Oxydation von Hydrochinon. Die Rückverwandlung ins rote Echinochrom gelingt wieder mit verschiedenen Reduktionsmitteln.

³⁾ R. Kuhn, diese Ztschr. 53, 1 [1940].

⁴⁾ R. Kuhn u. K. Wallenfels, Ber. dtsch. chem. Ges. 72, 1407 [1939].

⁵⁾ R. Kuhn u. K. Wallenfels, ebenda 74, 1594 [1941].

⁶⁾ L. Michaelis, Oxydations-Reduktionspotentiale, Berlin 1933; Nord-Weidenhagen, Handbuch der Enzymologie, Stuttgart 1940.

⁷⁾ Zahn u. Oehwat, Liebigs Ann. Chem. 462, 72 [1928].