

leur constituant principal est le phosphate tricalcique  $\alpha$ . Après calcination, la disposition des raies du radiogramme ne change pas, mais les raies deviennent plus fines; le phosphate tricalcique  $\alpha$  et le carbonate se sont combinés en une molécule d'apatite. Si les sels osseux sont, préalablement à la calcination, débarrassés par voie chimique du carbonate qu'ils renferment, leur radiogramme change exactement comme le fait celui du phosphate tricalcique  $\alpha$  pur; il passe de la forme  $\alpha$  à la forme  $\beta$ .

Devant ces faits, une seule conclusion devenait possible: le sel principal de l'os est du phosphate tricalcique  $\alpha$  agrégé en très petites particules cristallines, ayant adsorbé du carbonate calcique ou magnésien. L'os donne un radiogramme d'apatite, parce que le phosphate tricalcique  $\alpha$  est isomorphe à l'apatite. Sous l'influence de la calcination, le carbonate se combine au phosphate et il forme à partir des sels osseux une apatite vraie; le radiogramme de cette dernière accuse des raies plus fines qu'avant la calcination, parce que le passage du phosphate tricalcique  $\alpha$  à l'apatite s'accompagne d'une augmentation du volume des particules cristallines.

Il s'agit ici d'un cas typique où, à cause du phénomène d'isomorphisme, un sel complexe, l'apatite, donne le même radiogramme qu'un des composants de sa molécule, parce que celui-ci se trouve sous une forme particulière, hydratée. Le problème n'a pu être éclairci par la diffraction des rayons X exclusivement. Il a été nécessaire d'associer cette dernière méthode à des procédés chimiques de recherche et à la mesure des indices de réfraction pour arriver à une conclusion définitive.

Nous ne cherchons nullement à discréditer une méthode d'investigation aussi objective que la détermination des structures moléculaires par la diffraction des rayons X. Notre seul but est d'éveiller l'attention à la possibilité d'interprétations erronées de roentgenogrammes dont les raies ne peuvent que refléter la forme de la maille cristalline telle qu'elle se présente dans la réalité.

#### Summary

The application of physical methods to the resolution of problems concerning biology might sometimes lead to misinterpretations. We consider, for instance, the successive stages of the study of the principal bone salt components by the X-ray diffraction method.

## Der Aufbau des galaktischen Systems

Von E. V. D. PAHLEN, Basel

Das Problem, das die Astronomen seit den ersten Anfängen ihrer Wissenschaft bis tief in die Neuzeit hinein beinahe ausschließlich beschäftigt hatte und sozusagen das Kernstück der ganzen antiken und mittelalterlichen Lehre vom Himmel bildete, war das der *Planetenbewegung*. Der ungeheure Aufwand an Scharfsinn, der zur Zerlegung und Wiederausammensetzung der äußerst verwickelten, jedoch eine tiefe und eindrucksvolle Gesetzmäßigkeit verratenden Bewegungen dieser Himmelskörper in ein System von Kreisbewegungen um fiktive Punkte, die sich wiederum auf Kreisen um die Erde bewegen sollten, verschwendet wurde, stellt ein typisches Beispiel für die unproduktiven Irrwege dar, auf die sich die wissenschaftliche Forschung verirrt, wenn sie an vorgefaßten Meinungen – hier der Annahme, daß die Himmelsbewegungen durchweg gleichmäßige Rotationen sein müßten – festhalten will. Demnach bestand die erste Tat der im 16. Jahrhundert neuerstandenen Wissenschaft notwendig in einem Akt der Zerstörung: die kunstvoll ineinandergeschachtelten ptolemäischen Kristallsphären stürzen in sich zusammen, die Erde nimmt in dem nunmehr um die Sonne als Mittelpunkt kreisenden System ihre Stelle als einfacher Planet unter den anderen Planeten ein, wodurch schon die auffälligsten von den Planeten am Himmel beschriebenen Schleifen (die sog. großen Anomalien)

als durch die Bewegung des mit der Erde verbundenen Beobachters hervorgerufene Täuschungen sich auf zwangslose Weise ausglätten lassen. Die Ersetzung der Kreisbahnen durch elliptische, die wir KEPLER verdanken, gestattet eine noch viel genauere Darstellung der tatsächlich beobachteten Bewegungen, als sie durch Einschaltung noch so vieler Sphären oder Epizyklen jemals erreicht worden wäre. Und die epochemachenden Entdeckungen NEWTONS, die die Bewegung eines Planeten nach denselben Grundsätzen zu berechnen lehrten wie etwa das Schwingen eines Pendels oder das Auf- und Abströmen des Seewassers, bringen endlich das volle Verständnis des mechanischen Aufbaus unseres Planetensystems. Von nun an ist die weitere Entwicklung auf diesem Gebiete nur noch, allerdings sehr mühsame, Kleinarbeit; das Problem des Aufbaus (wenn auch nicht der Entstehung) des Planetensystems ist prinzipiell gelöst. Dieser Abschluß ist etwa um die Mitte des 18. Jahrhunderts erreicht worden, doch war inzwischen schon ein neues Problem an die Stelle des eben gelösten getreten.

Der Hintergrund, auf dem sich die Bewegungen der Planeten abspielen, und durch den sie für uns überhaupt erst wahrnehmbar und meßbar werden, ist die *sphaera stellarum fixarum* der Alten, d. h. die mit Sternen übersäte Himmelskugel, die an keiner dieser Be-

wegungen auch nur den geringsten Anteil nimmt, denn ihre scheinbare tägliche Umdrehung um ihre Achse war ja bereits im Altertum vollständig richtig als Wirkung der täglichen Umdrehung der Erde um ihre eigene Achse erklärt worden. Somit stand die *sphaera fixarum* überhaupt ganz unbeweglich da, und da man weder die Entfernung bis zu ihr messen noch gegenseitige Verlagerungen der an ihr haftenden Sterne feststellen konnte, begnügte man sich lange Jahrhunderte hindurch damit, sie bloß zu beschreiben, d. h. die gegenseitigen Lagen und die Helligkeiten der mit unbewaffnetem Auge sichtbaren Sterne zu notieren. Mit der Erkenntnis, daß die Sonne den Hauptkörper und den Mittelpunkt unseres Systems bildet, und der naheliegenden Vermutung, daß sie uns, von einer sehr großen Entfernung aus gesehen, wahrscheinlich wie ein Stern erscheinen würde, gewann nun aber diese bis dahin so vernachlässigte *sphaera fixarum* plötzlich ein ganz neues, gewaltiges Interesse. Die Erkenntnis, daß die Sonne nichts als ein Stern unter Sternen ist, hat nämlich eine unvergleichlich größere Tragweite als die Einsicht, daß es sich bei unserer Erde nur um einen der um sie kreisenden Planeten handelt, weil dadurch unser ganzes Planetensystem in ein «Übersystem», nämlich «das System der Sterne» oder die «Sternwelt», als einfaches winziges Element dieses neuen, augenscheinlich sehr viel ausgedehnteren Gebildes eingeordnet wird. Aber nun wurden, namentlich nach der Erfindung des Fernrohrs, allmählich noch einige weitere Eigenschaften dieses Übersystems bekannt, aus denen hervorging, daß es eine vom Planetensystem gänzlich verschiedene Beschaffenheit haben mußte:

1. Während das Planetensystem eine ausgesprochene Monarchie ist, in der die Bewegung eines jeden Planeten beinahe ausschließlich durch die in der Sonne zusammengeballte riesige gravitierende Masse diktiert wird, scheint unter den Sternen eine überragende Autorität zunächst nicht vorhanden zu sein, sondern, wie in einer Republik, weitgehende Gleichberechtigung aller Mitglieder zu herrschen.

2. Die Anzahl der Systemmitglieder ist in beiden Fällen eine völlig verschiedene: Den sieben Planeten der mittelalterlichen Astronomen standen bereits über 6000 mit dem bloßen Auge sichtbare Sterne gegenüber, und heute ist, trotz der inzwischen erfolgten Entdeckung von etwa 2000 kleinen Planeten, dieser Unterschied zugunsten des Sternsystems noch viel krasser geworden: die Anzahl der uns heute bekannten Sterne ist nicht eintausendmal, sondern etwa eine Million Male größer als die Zahl der uns bekannten Planeten.

3. Eine Ähnlichkeit beider Systeme besteht wohl darin, daß die sie bildenden Körper bemerkenswerterweise eine *Ebene* im Weltraum zu bevorzugen scheinen, mit anderen Worten, in einer verhältnismäßig dünnen Schicht im Raume angeordnet sind. Jedoch haben die

Vorzugsebene des Planetensystems und die Vorzugsebene des Sternsystems schlechterdings nichts miteinander zu tun: im ersteren Falle fällt diese Ebene etwa mit der Ekliptik (der Ebene der Erdbahn um die Sonne) zusammen, im zweiten Falle ist es die durch das helle Band der *Milchstraße* am Himmel markierte Ebene, die mit der Ekliptik einen Winkel von über  $60^\circ$  bildet. Schon die ersten Beobachtungen, die GALILEI zu Anfang des 17. Jahrhunderts mit Hilfe eines selbstgebauten Fernrohrs anstellte, ließen ihn erkennen, daß dieses Band aus Tausenden und aber Tausenden von schwachen, mit dem bloßen Auge nicht mehr getrennt wahrnehmbaren Sternen besteht, die sich längs eines größten Kreises der Himmelssphäre, den man den «galaktischen Äquator» nennt, in auffälligster Weise häufen. Jedoch reichten die damals den Astronomen zur Verfügung stehenden Hilfsmittel noch in keiner Weise aus, um die Erforschung dieses Gebildes in Angriff nehmen zu können.

Die klare Erkenntnis, daß es sich hier wirklich um ein ganz neues astronomisches Problem handelte, und die ersten produktiven Ansätze zur Vorbereitung seiner Lösung verdankt die Wissenschaft WILLIAM HERSCHEL, der zu Ende des 18. Jahrhunderts als erster mit Hilfe des von ihm erbauten größten Spiegelteleskops seiner Zeit den bewußten Versuch unternahm, die *Gestalt* des unsere Sonne umgebenden Sternsystems auf Grund von Beobachtungstatsachen zu ermitteln. Hierzu bediente er sich einer Reihe von ihm im Gesichtsfelde seines Fernrohrs an verschiedenen über den Himmel verteilten Stellen ausgeführter Sternabzählungen. Die Anzahlen der in diesen HERSCHELSchen «Eichfeldern» gezählten Sterne (von den hellsten bis herunter zu den mit dem benutzten Fernrohr gerade noch sichtbaren) erwies sich in verschiedenen Himmelsgegenden als ganz verschieden, zeigte aber eine äußerst auffällige stetige Zunahme bei Annäherung an die Milchstraße, also, wenn wir letztere zum Äquator eines sphärischen Koordinatensystems wählen, das wir das «galaktische» nennen, mit abnehmender (positiver oder negativer) *galaktischer Breite*. Hieraus mußte der Schluß gezogen werden, daß die Sternanhäufungen längs dem der Milchstraße entsprechenden größten Kreise (dem galaktischen Äquator) kein rein lokales Phänomen sein konnten, sondern eine die ganze räumliche Anordnung der Sterne beherrschende Struktureigenschaft des Systems darstellen mußten. Dagegen schien die Verteilung in *galaktischer Länge*, also parallel zu der Milchstraße, außer der großen Zweiteilung, die sich vom Sternbilde des Schwans bis zu dem des Zentauren erstreckt, keinerlei bemerkenswerte Schwankungen zu zeigen. Um aus diesen Tatsachen Schlüsse über den Aufbau des Systems ziehen zu können, mußte HERSCHEL zu gewissen Hypothesen greifen, die ihm das mangelnde Wissen um die wahren Entfernungen und Helligkeiten der einzelnen Sterne ersetzen sollten. Die HERSCHELSchen Hypothesen sind die allereinfachsten,

die sich machen lassen, und, wie wir heute wissen, von dem wahren Sachverhalt noch sehr weit entfernt: er nahm an, daß die räumliche Dichte der Sterne, also die Anzahl der in einem Einheitsvolumenelement (das natürlich entsprechend groß gewählt werden mußte) enthaltenen Sterne überall, wo Sterne überhaupt noch vorkommen, immer dieselbe ist, und zweitens, daß alle Sterne dieselbe *Leuchtkraft*, oder *absolute Helligkeit*, besitzen, d.h. dieselbe Lichtmenge in der Zeiteinheit in den Raum strahlen, und uns daher alle gleich hell erscheinen würden, falls sie sich in der gleichen Entfernung von uns befänden. Letztere Hypothese, deren Unrichtigkeit zu HERSCHELS Zeiten wegen des Fehlens genauer photometrischer Messungen von scheinbaren Sternhelligkeiten nicht nachgeprüft werden konnte, spielte jedoch bei seinen Überlegungen nur eine untergeordnete Rolle, da sich seine Abzählungen auf alle Sterne ohne Unterschied der Helligkeit bezogen. Die erste Annahme aber gestattete, unter der Voraussetzung, daß das HERSCHELSche Fernrohr ihm wirklich ein Vordringen bis an die äußersten Grenzen des Sternsystems ermöglichen würde, wenigstens die relativen Entfernungen bis zu dieser Grenze in den verschiedenen Richtungen vom Beobachtungspunkte (der Sonne) aus zu bestimmen, indem letztere proportional zu der kubischen Wurzel aus der in dem jeweils untersuchten kegelförmigen Raumvolumen enthaltenen Sternanzahl gesetzt wurde. So erhielt HERSCHEL auf Grund seiner Sterneichungen das nachfolgende sehr bemerkenswerte Bild (Abb. 1), das durch seine Kühn-

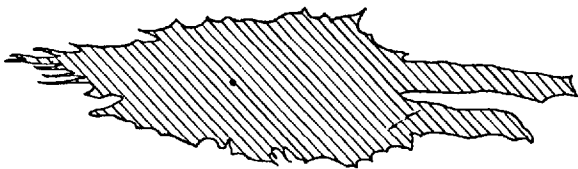


Abb. 1. Das Sternsystem von W. HERSCHEL.

heit auch heute noch unsere staunende Bewunderung erregt, wenn wir es auch nur als eine ganz grobe erste Annäherung an die Wirklichkeit betrachten können. Die Hauptmerkmale des HERSCHELSchen Sternsystems können in folgenden drei Punkten zusammengefaßt werden:

1. Das Sternsystem ist ein ganz flaches Gebilde, das die Milchstraßenebene zur Symmetrieebene hat (Abhängigkeit der Sternanzahlen von der galaktischen Breite).
2. Das Sternsystem besitzt, bis auf unwesentliche Abweichungen, Kreissymmetrie um eine zur Milchstraßenebene senkrechte Achse, in deren unmittelbarer Nähe die Sonne in der Ebene der Milchstraße liegt (Abwesenheit einer Abhängigkeit der Sternanzahlen von der galaktischen Länge).

3. Die räumliche Sterndichte (Anzahl der in der Volumeinheit des Raumes enthaltenen Sterne) ist im ganzen System praktisch dieselbe (Hypothese).

Als einziger Schönheitsfehler, der die wundervolle Symmetrie der ganzen Anordnung stört, bleibt nur die rechts in der Abbildung sichtbare Einbuchtung, welche der großen Spaltung der Milchstraße entspricht.

Das erste der von HERSCHEL erreichten bedeutenden Resultate ist zweifellos richtig und bildet auch heute noch die Grundlage aller unserer Vorstellungen über den Aufbau des Sternsystems. Dagegen sind die Punkte 2 und 3 von der neueren Forschung keineswegs bestätigt worden, wie weiter unten noch gezeigt werden soll. Immerhin ist die Leistung HERSCHELS auf diesem Gebiete als bahnbrechend zu bezeichnen, denn er hat nicht nur praktisch alle bei der Erforschung des Sternsystems anzuwendenden Grundbegriffe, wie den der räumlichen Sterndichte oder den der absoluten Leuchtkraft eines Sterns, eingeführt, sondern auch die statistischen Forschungsmethoden, die in der Behandlung von Sternabzählungen in über den Himmel zerstreuten ausgewählten Bereichen bestehen, entwickelt und darüber hinaus auch die Haupteigentümlichkeit des Systems, seine ganz flache, durch eine Symmetrieebene charakterisierte Gestalt richtig erkannt. Ja er ging in seinem Forschungseifer noch einen Schritt weiter, indem er auch den ersten Versuch machte, die inneren Bewegungen im Sternsystem zu erforschen, wobei er sich zu diesem Zwecke der zu seiner Zeit ganz wenigen bekannten *Eigenbewegungen* der Sterne bediente, d.h. der für jeden Stern, nach Abzug aller seine Lage am Himmel allmählich verändernder, durch die Bewegung des Bezugssystems bedingter Einflüsse noch verbleibenden kleinen Restbeträge, die den Bewegungszustand des betreffenden Sterns in bezug auf die Sonne charakterisieren. Wenn die Zeit hierzu auch noch lange nicht reif war, führte diese Untersuchung HERSCHELS doch zu einer epochemachenden Entdeckung: es erwies sich, daß die Gesamtheit der Sterne die Tendenz verrät, in einer ganz bestimmten Richtung an der Sonne vorbeizuströmen, was natürlich am einfachsten durch eine Bewegung der Sonne selbst in der entgegengesetzten Richtung, und zwar in der Richtung nach einem Punkte im Sternbilde des Herkules (Rektaszension  $270^\circ$ , Deklination  $+30^\circ$ ) erklärt werden kann. Diese «apexiale Bewegung» der Sonne stellt selbstverständlich eine Tatsache von größter praktischer Wichtigkeit dar, weil sie von jeder gemessenen Eigenbewegung eines Sterns abgezogen werden muß, wenn seine wahre Bewegung in bezug auf den *Schwerpunkt* des gesamten Sternsystems, oder bescheidener ausgedrückt, in bezug auf die die Umgebung der Sonne bildende Sterngruppe ermittelt werden soll. Die Bewegung der Sonne aber, als die Bewegung eines einzelnen zufällig herausgegriffenen Sterns des Systems, vermag uns nichts über den (statistisch zu definierenden) Bewegungszustand dieses Systems zu lehren, außer der

bloßen Tatsache, daß sich die anderen Sterne ebenso wie die Sonne in bezug auf ihren gemeinsamen Schwerpunkt wohl auch nicht in Ruhe befinden. Wie dem auch sei, finden wir in den Arbeiten HERSCHELS bereits die beiden großen Anwendungsgebiete der von ihm entwickelten statistischen Forschungsmethode vorgezeichnet, nämlich ihre Anwendung auf die Ermittlung der räumlichen Verteilung der Sterne und auf die Untersuchung ihres statistischen Bewegungszustandes. Die ganze zukünftige Entwicklung der Stellarstatistik ist in diesen Arbeiten bereits im Keime enthalten.

Das nächste Kapitel in der Erforschung des Aufbaus des Sternsystems hat allerdings recht lange auf sich warten lassen: die Ergebnisse HERSCHELS schwebten sozusagen in der Luft, solange weder der absolute Maßstab seines Systems noch die absoluten Werte der den Eigenbewegungen der Sterne entsprechenden Geschwindigkeiten bekannt waren. In ersterer Beziehung stellte die Bestimmung der ersten *Sternentfernungen* durch BESSEL, W. STRUVE u. a. (mit dem Jahre 1838 anfangend) das bahnbrechende Ereignis dar. Wenn sich diese Resultate – die sog. trigonometrischen Sternparallaxen, die aus einer direkten Messung der kleinen durch die Drehung der Erde um die Sonne bedingten jährlichen scheinbaren Lagenänderungen der näheren Sterne in bezug auf sehr viel weitere Sterne erhalten werden – sich zunächst auf eine ganz geringe Zahl von verhältnismäßig sehr nahen Sternen beschränkten, war wenigstens der durchschnittliche Wert der die einzelnen Sterne unseres Sternsystems trennenden Zwischenräume bekanntgeworden, wodurch der Maßstab des Systems festgelegt war. Diese Abstände erwiesen sich, wie ja auch zu erwarten war, als so groß, daß zu ihrer Angabe eine neue Längeneinheit eingeführt werden mußte, nämlich das «Lichtjahr», d. h. die Strecke, welche das Licht mit einer Geschwindigkeit von 300 000 km/sec in einem Jahre ( $3,157 \cdot 10^7$  sec) zurückzulegen vermag. (In der modernen Astronomie ist eine andere, aus rein astronomischen Erwägungen eingeführte Längeneinheit gebräuchlich, das sog. parsec [= 3,26 Lichtjahre], das der Entfernung entspricht, in der die Parallaxe eines Sterns genau den Wert einer Bogensekunde hat. Wir wollen uns aber im weiteren überwiegend des viel anschaulicheren Lichtjahres bedienen.) Der Abstand bis zum nächsten helleren Stern von der Sonne aus erwies sich von der Größenordnung von etwa vier Lichtjahren, steht also zu der in der Himmelsmechanik gebräuchlichen astronomischen Einheit, die bekanntlich gleich der halben großen Achse der Erdbahnelipse ist, im Verhältnis von vier Jahren zu acht Minuten.

Die direkt gemessenen trigonometrischen Sternparallaxen beziehen sich auf Sterne, die höchstens um einige Hundert Lichtjahre von der Sonne entfernt sind, können uns also über die Struktur des sicher viel ausgedehnteren Sternsystems nur sehr wenig lehren. Eine gewisse Kenntnis der *mittleren* relativen Entfernungen

ganzer Sterngruppen konnte aber schon aus dem Studium ihrer Eigenbewegungen, die in immer wachsender Zahl bekannt wurden, mit Hilfe von «Apexbestimmungen» nach den von BRAVAIS, AIRY, KAPTEYN u. a. verfeinerten Methoden gewonnen werden. Wenn z. B. für zwei verschiedene Sterngruppen, etwa die Sterne zweier verschiedener scheinbaren Helligkeitsklassen (die beide über den ganzen Himmel zerstreut sind), die Bestimmung der Sonnenbewegung vorgenommen wird, und in beiden Fällen dieselbe Richtung (derselbe Apex), aber verschiedene, in Bogensekunden pro Jahr ausgedrückte Beträge für die Geschwindigkeit, z. B.  $0''.1$  pro Jahr und  $0''.05$  pro Jahr erhalten werden, dann müssen wir daraus den Schluß ziehen, daß die durchschnittliche Entfernung der Sterne der zweiten Gruppe zweimal größer ist als die durchschnittliche Entfernung der Sterne der ersten Gruppe, da es sich doch in beiden Fällen augenscheinlich um dieselbe Sonnengeschwindigkeit handelt, die aber aus zwei verschiedenen Entfernungen gesehen wird, nämlich den mittleren Entfernungen der beiden betrachteten Sterngruppen. Solche mittlere oder statistische Parallaxen haben bei der Erforschung der Sternwelt eine beträchtliche Rolle gespielt und gute Dienste geleistet.

Natürlich war eine Normierung der auf diese Weise gewonnenen Entfernungen, d. h. ihre Verwandlung in absolutes Längenmaß (z. B. Lichtjahre) so lange unmöglich, als über den absoluten Wert der Sonnengeschwindigkeit in bezug auf die Sterne keine bestimmten Angaben gemacht werden konnten. Eine radikale Änderung der Lage trat erst gegen Ende des 19. Jahrhunderts ein, als es zum erstenmal gelang, unter Anwendung des DOPPLERSchen Prinzips, aus den beobachteten Linienverschiebungen in den Spektren der helleren Sterne ihre *Radialgeschwindigkeiten*, d. h. die längs dem Visionsradius auf uns zu oder von uns weg gerichtete Komponente ihrer Geschwindigkeiten, und zwar direkt in Kilometern pro Sekunde, zu bestimmen. Aber erst zu Anfang unseres Jahrhunderts war die Anzahl der Sterne, deren Radialgeschwindigkeiten gemessen werden konnten, ausreichend geworden, um sie zu einer «Apexbestimmung» nach einer der bei den Eigenbewegungen benutzten ganz analogen Methode zu verwenden. Da diese Radialgeschwindigkeiten wie gesagt unabhängig von der Entfernung der Sterne direkt in km/sec erhalten werden, ergibt sich aus ihnen auch die Geschwindigkeit der Sonne in bezug auf die Gruppe der benutzten Sterne in km/sec. Der für letztere erhaltene Wert war rund 20 km/sec, wobei die *Richtung* dieser Geschwindigkeit innerhalb der Genauigkeitsgrenzen des Beobachtungsmaterials auffallend gut mit der aus der Untersuchung der Eigenbewegungen bereits bekannten Richtung übereinstimmte. Nun konnten aber bei den Sternen, deren Entfernungen bekannt waren, auch ihre Eigenbewegungen unschwer aus Bogenmaß (Bogensekunden pro Jahr) in lineares Maß verwandelt werden, so daß wir heute für eine gewisse

Anzahl von Sternen alle drei Komponenten ihrer Geschwindigkeit in Kilometern pro Sekunde kennen und daher auch ihre *Raumgeschwindigkeiten* nach absoluter Größe und Richtung angeben können.

So war man bereits vor etwa einem Vierteljahrhundert in den Besitz genäherter Werte für die zum Aufbau einer Sterndynamik notwendigen Daten gelangt: die *mittlere Entfernung* zweier Sterne in der Umgebung der Sonne beträgt etwa vier Lichtjahre, die *mittlere Geschwindigkeit* eines Sterns in bezug auf den Schwerpunkt dieser Gruppe ist etwa gleich 10–20 km/sec, wozu noch die aus dem Studium von Doppelsternsystemen stammende Erkenntnis hinzukommt, daß die *Masse* eines durchschnittlichen Sterns von derselben Größenordnung wie die Masse der Sonne (etwa gleich 1–4 Sonnenmassen) sein dürfte.

Aber schon seit dem letzten Jahrzehnt des verflossenen Jahrhunderts hatte in der Erforschung der Struktur unseres Sternsystems eine frische Strömung eingesetzt, deren Hauptvertreter H. v. SEELIGER (München) und J. C. KAPTEYN (Groningen, Holland) und später K. SCHWARZSCHILD (Göttingen) und C. V. L. CHARLIER (Lund) waren und die sich eine Fortführung und Verfeinerung der seit HERSCHELS Zeiten zu einem beinahe völligen Stillstand gekommenen Forschung auf diesem Gebiete zum Ziele setzte. Wie bei HERSCHEL, bestand das Material, das zu diesen Untersuchungen herangezogen wurde, aus zwei Gruppen von empirischen Daten: Gruppe I: Sternabzählungen in verschiedenen Himmelsgegenden zur Ermittlung der räumlichen Sternverteilung und Gruppe II: Sternengeschwindigkeiten (Eigenbewegungen, Radialgeschwindigkeiten, Raumgeschwindigkeiten), aus denen ein Einblick in den dynamischen Zustand des Systems gewonnen werden sollte. Natürlich war dieses Material in den seit HERSCHEL verflossenen hundert Jahren unvergleichlich reichhaltiger geworden.

Gruppe I. Auf dem Gebiete der Bestimmung der räumlichen Sternverteilung bestand der Fortschritt hauptsächlich darin, daß nunmehr nicht nur die gesamten Sternanzahlen, die im Gesichtsfelde des Fernrohrs oder auf der in immer größerem Ausmaße verwendeten photographischen Platte erscheinen, sondern die Anzahlen der Sterne *jeder einzelnen scheinbaren Helligkeitsklasse* bestimmt werden konnten, was nur dank den Erfolgen der inzwischen entstandenen exakten Sternphotometrie möglich geworden war. Da die Unhaltbarkeit der HERSCHELSchen Annahme von der gleichen Leuchtkraft aller Sterne nunmehr klar zutage trat, bestand also die zu lösende Aufgabe von nun ab in der Bestimmung nicht einer, sondern zweier Funktionen, nämlich erstens der räumlichen Sterndichte  $D(r, \alpha, \delta)$  für jedes durch seine sphärischen Koordinaten  $(\alpha, \delta)$  am Himmel und durch seine Entfernung  $r$  von der Sonne bestimmtes Volumelement, und zweitens einer Funktion, welche die prozentualen Häufigkeiten der Sterne verschiedener absoluter Leuchtkraft

innerhalb eines jeden solchen Volumelements des Raumes angibt. Zur Vereinfachung dieses Problems wurde namentlich in den Anfängen diese Häufigkeitsfunktion der absoluten Helligkeiten, oder, wie man sich kurz auszudrücken pflegt, die *Helligkeitsfunktion*, die an sich ja für jedes Raumelement eine verschiedene sein könnte, als im ganzen Raume konstant angenommen, d. h. in der Form  $\psi(M)$  angesetzt, wo  $M$  zum Unterschiede von  $m$  nicht die scheinbare, sondern die absolute Helligkeit eines Sterns bedeutet, d. h. die scheinbare Helligkeit, die er in der Einheitsentfernung besitzen würde. (Dies ist natürlich eine rein physikalische Eigenschaft eines Sterns und hängt von seiner Entfernung nicht mehr ab.) Daß es sich bei unserem Problem wirklich um die Bestimmung zweier Funktionen handeln muß, ist aus einer Betrachtung des den Berechnungen zugrunde zu legenden Beobachtungsmaterials sofort ersichtlich: dieses besteht aus den für bestimmte ausgewählte Himmelsgebiete (die unter Umständen auch ganze galaktische Zonen oder sogar die ganze Himmelskugel umfassen können) durch Abzählung erhaltenen Anzahlen  $N(m)$  der Sterne, deren scheinbare Helligkeiten in gewissen aufeinanderfolgenden Intervallen dieser Helligkeit, z. B. zwischen den Werten  $m - \frac{1}{2}$  und  $m + \frac{1}{2}$ , eingeschlossen sind, nach dem folgenden Schema:

$m$		$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_4$	.....
$N$		$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_4$	.....

Nun kann aber ein Stern einer bestimmten scheinbaren Helligkeit  $m$  natürlich sowohl ein aus großer Entfernung gesehener sehr heller als auch ein in kleinerer Entfernung stehender Stern geringerer Leuchtkraft sein, so daß sich die Anzahl  $N_m$  aus Sternen aller Leuchtkräfte zusammensetzt, die in den ihnen zukommenden Entfernungen anzubringen sind und mit den ihnen zukommenden Häufigkeiten zur Bildung der Zahl  $N_m$  beitragen: sie hängt somit sowohl von der räumlichen Dichte  $D(r)$  als von der Helligkeitsfunktion  $\psi(M)$  ab. Unsere Aufgabe ist daher, solange wir nur die eine empirisch gegebene Funktion  $N(m)$  verwenden, eine unterbestimmte, und wir bedürfen zur Bestimmung der zwei gesuchten Funktionen noch einer zweiten Reihe experimenteller Tatsachen, die uns eine zweite Gleichung in  $D(r)$  und  $\psi(M)$  liefern muß. Als eine zweite solche experimentelle Reihe können verschiedene der Beobachtung entnommene Daten benutzt werden, z. B. die schon oben erwähnten mittleren Parallaxen  $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots$  der Sterne der scheinbaren Helligkeiten  $m_1, m_2, m_3, \dots$  oder die für dieselben Sterngruppen bestimmten mittleren jährlichen Eigenbewegungen  $\bar{\mu}_1, \bar{\mu}_2, \bar{\mu}_3, \dots$ . Die Lösung dieser an sich schon ziemlich verwickelten Aufgabe, auf die hier nicht näher eingegangen werden kann, wird nun aber in der Praxis durch zwei hinzukommende Umstände noch ganz erheblich erschwert:

1. Die Annahme, daß die Helligkeitsfunktion  $\psi(M)$  im ganzen Raume, also in allen von der Sonne aus ge-

zogenen Richtungen und in allen Entfernungen von derselben, annähernd denselben Charakter zeigt, entspricht keineswegs der Wirklichkeit, und zwar aus folgendem Grunde: Wie die sich seit dem 19. Jahrhundert stürmisch entwickelnde neue Wissenschaft der Astrophysik gezeigt hat, zerfallen die Sterne in eine gewisse Anzahl von Typen, die durch ihre sich stark voneinander unterscheidenden *Spektren* gekennzeichnet sind. Da der Charakter des Spektrums eng mit der auf der Oberfläche des Sterns herrschenden Temperatur zusammenhängt und durch letztere zu einem gewissen Grade auch die absolute Leuchtkraft des Sterns bestimmt wird, ändert sich diese systematisch mit der Sternklasse. Die Helligkeitsfunktion hängt daher von dem an der gerade betrachteten Stelle herrschenden Gemisch von Sternen verschiedener Spektralklassen ab, das, wie heute bekannt ist, keineswegs überall im Raume dasselbe ist.

2. Noch viel bedenklicher ist die namentlich bei den ersten Untersuchungen meistens gemachte Voraussetzung der *vollständigen Durchsichtigkeit des Weltraumes*. Diese Voraussetzung hat nämlich eine ganz bestimmte Beziehung zwischen der scheinbaren Helligkeit, der Leuchtkraft (absoluten Helligkeit) und der Entfernung eines Sterns zur Folge, die weiter nichts ist als ein Ausdruck für das invers-quadratische Gesetz der Abnahme der scheinbaren Helligkeit einer Lichtquelle mit wachsender Entfernung von ihr. Da die astronomischen «Helligkeiten» in «Größenklassen» in einer logarithmischen Skala ausgedrückt werden, lautet dieses Gesetz<sup>1</sup>:

$$m = M + 5 \lg r. \quad (1)$$

Wenn nun auf dem Wege des Lichtes eines Sterns zur Sonne gewisse Licht absorbierende Wolken liegen, oder im ganzen betrachteten Raume ein Licht absorbierendes Medium ausgebreitet ist, dann kann die Relation (1) natürlich nicht mehr richtig sein, denn der Stern der absoluten Helligkeit  $M$  wird uns durch diese Trübung geschwächt erscheinen, also nicht die durch (1) gegebene scheinbare Helligkeit  $m$ , sondern eine etwas geringere, und daher durch eine etwas größere «Größenklasse»  $m' > m$  ausdrückbare Helligkeit erhalten. Die Relation (1) muß daher durch eine andere Relation:

$$m = M + 5 \lg r + A(r) \quad (2)$$

ersetzt werden, wo  $A(r)$  eine neue, zunächst ganz unbekannte, aber sicher von der Entfernung  $r$  und vermutlich auch von der Richtung ( $\alpha, \delta$ ) im Raume abhängige *Absorptionsfunktion* bezeichnet. Unsere Aufgabe besteht also in Wirklichkeit in der Bestimmung

von *drei* unabhängigen Funktionen, nämlich der *räumlichen Sterndichte*  $D(r)$ , der jeweils zu gebrauchenden *Helligkeitsfunktion*  $\psi(M)$  und der den Lichtverlust im «interstellaren» Raume angegebenden *Absorptionsfunktion*  $A(r)$ , welche letztere natürlich auch von den Farben, also von den Spektren der Sterne abhängen kann, da die Raumabsorption sehr wohl auch stark selektiven Charakter haben könnte.

Um die im ersten der obenerwähnten Umstände liegende Schwierigkeit zu umgehen, kann man sich des naheliegenden Verfahrens bedienen, die Untersuchungen für die Sterne verschiedener Spektralklassen getrennt durchzuführen, was heute denn auch nach Möglichkeit geschieht und in Zukunft allgemein üblich werden sollte. Der große Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, daß man sich hierdurch von den lokalen Schwankungen des Mischungsverhältnisses der Spektralklassen vollständig freimacht. Die Helligkeitsfunktion wird dadurch einfach zu der Streuungsfunktion der Leuchtkräfte der Sterne einer bestimmten physikalisch charakterisierten Oberflächenbeschaffenheit um einen diese Klasse kennzeichnenden Mittelwert und kann nun mit viel größerer Zuverlässigkeit als im Raume unveränderlich angenommen und durch ein einfaches Fehlergesetz mit genau angebbarem Mittelwerte und verhältnismäßig kleiner Streuung ausgedrückt werden. Die Schwierigkeit, welche aber der allgemeinen Anwendung dieses Verfahrens heute noch entgegensteht, ist unsere zunächst noch sehr unzulängliche Kenntnis der Spektren der schwachen und schwächsten Sterne: letztere hört schon bei der 14. Größenklasse auf, während genaue Helligkeitsbestimmungen ohne Trennung nach Spektralklassen schon bis zu Sternen schwächer als 20. Größe ausgeführt werden können, und es gerade die allerschwächsten Sterne sind, deren räumliche Verteilung erst einige der charakteristischsten Züge der Struktur unseres Sternsystems zu enthüllen verspricht.

Die unter Punkt 2 erwähnte Schwierigkeit ist unvergleichlich schwerer zu überwinden als die an erster Stelle genannte, und man kann wohl sagen, daß die Wissenschaft bis heute die Methoden, die eventuell einmal zu ihrer Beseitigung führen könnten, noch nicht entwickelt hat. Daß die mitten in den sternreichsten Gegenden der Milchstraße plötzlich auftretenden engbegrenzten «Lücken», wie z. B. der berühmte in der südlichen Halbkugel gelegene «Kohlensack», ihren Ursprung der absorbierenden Wirkung vorgelagerter kosmischer Staub- und Gasmassen verdanken und nicht wirkliche, das ganze Milchstraßensystem durchsetzende röhrenförmige Sternleeren darstellen, wird wohl niemand im Ernst bestreiten wollen. Ja sogar die große Zweiteilung der Milchstraße, die sich vom Sternbilde des Schwans bis etwa zum Centaur erstreckt, scheint zum allergrößten Teil ebenfalls durch eine absorbierende Wolke verursacht zu sein, was durch die große Ähnlichkeit der beiden Zweige in bezug auf die spektrale Zusammensetzung und die Verteilung der schein-

<sup>1</sup> In der Praxis wird statt des auf diese Weise definierten  $M$  meistens ein  $M' = M + 5$  benutzt durch eine Verschiebung des Nullpunktes um 5 Größenklassen. Die Vorzeichen erklären sich aus dem Umstande, daß die Größenklassen  $m$  und  $M$  bei *abnehmender* Helligkeit immer *größere* Werte erhalten: ein Stern zweiter Größe ist 2,5mal *weniger* hell als ein Stern erster Größe usw.

baren Helligkeiten ihrer Sterne wahrscheinlich gemacht wird. Aber auch in vielen Sternfeldern, in denen keine auffälligen «Lücken» zu sehen sind, ist die beobachtete scheinbare Helligkeit der Sterne in einer meistens nicht genauer angebbaren Weise durch Absorption verfälscht, wodurch der objektive Wert der bisher ermittelten räumlichen Sternverteilungen, auch bei Einführung mehr oder weniger plausibler Annahmen über den Einfluß der Raumabsorption, beträchtlich herabgesetzt wird. Wir werden auf diesen sehr wichtigen Punkt später noch zurückkommen müssen.

Alle diese Schwierigkeiten sind den Astronomen nur ganz allmählich bewußt geworden, und es ist daher begreiflich, daß die ersten Forscher auf diesem Gebiete, wie H. v. SEELIGER, J. C. KAPTEYN und ihre Schüler, zu objektiv brauchbaren Ergebnissen kommen zu können glaubten, indem sie bei der Ermittlung der räumlichen Verteilung der Sterne in möglichst vielen von der Sonne ausgehenden Richtungen sich einer ein für allemal abgeleiteten Helligkeitsfunktion für alle Sterne ohne Unterschied der Spektralklassen bedienten und den Einfluß der Raumabsorption in erster Näherung gänzlich vernachlässigten. Auch glaubten sie alle Unterschiede in der Sternverteilung um die angenommene Symmetrieachse des Systems zunächst unbeachtet lassen zu können, indem sie die aus der Beobachtung stammenden Sternzahlen über alle galaktischen Längen mittelten. Trotzdem werden wir die von ihnen erreichten Ergebnisse kurz streifen müssen, da sie als Ausgangspunkt für die modernen Vorstellungen vom Aufbau des Sternsystems gedient haben. Zuvor muß aber über gewisse Ergebnisse berichtet werden, die derselbe große Forscher KAPTEYN und, in Fortsetzung seiner Arbeiten, A. S. EDDINGTON und K. SCHWARZSCHILD aus einem eingehenden Studium des zu ihrer Zeit bereits verfügbaren ziemlich umfangreichen Materials an *Eigenbewegungen* und *Radialgeschwindigkeiten* von Sternen abzuleiten in der Lage waren.

Gruppe II. Wie schon oben erwähnt, war es den Astronomen lange Zeit nicht möglich gewesen, aus diesen Daten mehr als die Richtung der Sonnengeschwindigkeit in bezug auf die Sterne und einen genäherten Wert des absoluten Betrages dieser Geschwindigkeit in km/sec abzuleiten. Das hierbei angewandte statistische Verfahren gründete sich auf die Annahme, daß die nach Abzug dieser den wahrnehmbaren Bewegungen aller Sterne gemeinsamen «parallaktischen» Komponente verbleibenden «pekuliaren» Geschwindigkeiten der individuellen Sterne *regellos*, d. h. nach den Gesetzen des Zufalls, verteilt sind, eine Annahme, die, solange das Beobachtungsmaterial noch spärlich war, natürlich nicht nachgeprüft werden konnte. Mit der um die Jahrhundertwende erfolgten sehr beträchtlichen Bereicherung dieses Materials sowohl in bezug auf Eigenbewegungen als auch an Radialgeschwindigkeiten war aber eine solche Nachprüfung durchaus möglich geworden und führte zuerst KAPTEYN zu dem

epochemachenden Ergebnis, daß die «Restgeschwindigkeiten» der Sterne keineswegs regellos verteilt sind, sondern eine höchst bemerkenswerte *systematische* Eigenschaft verraten: die Sterne zeigen nämlich in allen Raumgebieten die ausgesprochene Tendenz, sich überwiegend parallel zu einer gewissen Geraden – und zwar in beiden Richtungen mit etwa derselben Häufigkeit – zu bewegen. Mit anderen Worten bestehen unter den Sternen zwei sich gegeneinander bewegendes *Sternströme*, so daß jeder Stern außer der von der Bewegung der Sonne herrührenden Geschwindigkeitskomponente noch eine zweite systematische Geschwindigkeitskomponente aufweist, die durch seine Zugehörigkeit zu dem einen oder anderen Sternstrom bedingt ist, und erst für die nach Abzug dieser beiden Komponenten verbleibenden Restgeschwindigkeiten, darf eine regellose Verteilung nach Richtung und Größe angenommen werden. Durch diese Erkenntnis wurde zum erstenmal der Boden der wirklichen systematischen Bewegungen innerhalb des Sternsystems betreten, und es lag nahe, zu ihrer Beschreibung den aus der kinetischen Gastheorie entlehnten Begriff des «Geschwindigkeitskörpers» zu übernehmen, d. h. des räumlichen Gebildes, welches erhalten wird, wenn wir in einem «Geschwindigkeitsraume» die Geschwindigkeit eines jeden Sterns durch einen Punkt darstellen, dessen rechtwinklige Koordinaten durch die drei längs den Achsen genommenen Komponenten dieser Geschwindigkeit gegeben werden. Im Falle einer regellosen Geschwindigkeitsverteilung (nach Größe und Richtung) wie wir sie z. B. bei einem ruhenden Gase vor uns haben, wird dieser Geschwindigkeitskörper durch das wohlbekannte MAXWELLSche Verteilungsgesetz dargestellt, welches die Häufigkeit des Vorkommens einer Geschwindigkeit mit im Intervall  $u$  bis  $u + du$ ,  $v$  bis  $v + dv$ ,  $w$  bis  $w + dw$  eingeschlossenen Komponenten angibt, und zwar in der Form:

$$\frac{h^3}{\sqrt{\pi^3}} e^{-h^2 (u^2 + v^2 + w^2)} du dv dw. \quad (3)$$

Hier ist  $h$  das sog. Präzisionsmaß der Verteilung, das in einfacher Weise mit der *mittleren* Geschwindigkeit der Sterne (oder Molekeln) zusammenhängt und ein Maß für die *Streuung* der individuellen Werte um letztere darstellt. Die genaue mathematische Behandlung der KAPTEYNSchen Vorstellung von den zwei sich im Raume begegnenden Sternströmen verdanken wir A. S. EDDINGTON, der den sich aus den Beobachtungen ergebenden Geschwindigkeitskörper der Sterne unseres Systems, oder wenigstens unserer Umgebung, durch die Überlagerung zweier gegeneinander verschobener MAXWELLScher Geschwindigkeitskörper gleichen Präzisionsmaßes, aber mit etwas verschiedenen Gesamtanzahlen von Sternen darzustellen versuchte. Die Häufigkeit der Geschwindigkeiten mit den Komponenten  $u, v, w$  (wie wir kurz sagen können), wird dann durch ein Gesetz der Form:

$$\left\{ N_1 \frac{h^3}{\sqrt{\pi^3}} e^{-h^2 [(u-U)^2 + v^2 + w^2]} + \right. \\ \left. + N_2 \frac{h^3}{\sqrt{\pi^3}} e^{-h^2 [(u+U)^2 + v^2 + w^2]} \right\} du dv dw \quad (4)$$

gegeben, wo  $N_1$  und  $N_2$  die dem ersten bzw. dem zweiten Sternstrom in der Volumeinheit des Raumes zukommende Sternanzahl bedeutet. (Die Richtung der Strömung ist hier zur  $U$ -Achse im Geschwindigkeitsraume genommen und die gegenseitige Geschwindigkeit beider Sternströme gleich  $2U$  gesetzt.) Nun erscheint dieser zusammengesetzte Geschwindigkeitskörper noch durch die Bewegung unserer Sonne, auf die alle Geschwindigkeitsbestimmungen der Sterne ja zunächst bezogen werden, gegen den «Nullpunkt des Geschwindigkeitsraumes» verschoben, und es erweist sich als möglich, auf Grund von Abzählungen der beobachteten Eigenbewegungen der Sterne in verschiedenen Himmelsgegenden alle in das Gesetz (4) eingehenden Konstanten, also  $h, N_1, N_2$ , die gegenseitige Geschwindigkeit der beiden Sternströme und ihre Richtung sowie schließlich auch die durch die Sonnenbewegung verursachte Verschiebung des ganzen Geschwindigkeitskörpers numerisch zu bestimmen. Natürlich müssen die zunächst in Bogenmaß erhaltenen Geschwindigkeiten nachträglich unter Zuhilfenahme der aus Radialgeschwindigkeiten bekannten Sonnengeschwindigkeit normiert werden. Es ist nun höchst beachtenswert, daß die die Mittelpunkte der beiden MAXWELLSchen Verteilungen verbindende Gerade, d. h. die Richtung, längs der die Sternströmung erfolgt, in allen Gebieten des Raumes dieselbe ist und in der Ebene der Milchstraße liegt. Die Sternströmung ist somit ein Phänomen, das sich in derselben Grundebene der Milchstraße abspielt, die auch die Symmetrieverhältnisse der räumlichen Sternverteilung beherrscht. (Die Sonnenbewegung bildet dagegen mit dieser Ebene einen Winkel von etwa  $20^\circ$ .) Die allgemeine Strömungsrichtung der Sterne, die man zum Unterschiede von der Apexrichtung der Sonnenbewegung die *Vertexrichtung* genannt hat, spielt in der Dynamik des Sternsystems offenbar eine fundamentale Rolle. Ihre Lage wird durch zwei diametral gegenüberliegende Punkte der Himmelssphäre gekennzeichnet, die als Vertices bezeichnet werden und deren galaktische Koordinaten durch  $\beta = 0^\circ$ ,  $\lambda = 347^\circ$  und  $167^\circ$  gegeben sind<sup>1</sup>.

Das Bestehen einer Vorzugsrichtung für die Sternengeschwindigkeiten, die sich KAPTEYN durch zwei sich begegnende Sternströme zu erklären suchte, ist indessen noch einer anderen Deutung fähig, die auf K. SCHWARZSCHILD zurückgeht und auch heute bei stellardynamischen Betrachtungen eine hervorragende Rolle spielt. Der tatsächlich beobachtete langgestreckte

Geschwindigkeitskörper kann nämlich mit praktisch gleicher Genauigkeit auch durch ein einziges Verteilungsgesetz angenähert werden, wenn man eine gewisse Verallgemeinerung des MAXWELLSchen Ansatzes (3) ins Auge faßt. Nach dem Vorschlage SCHWARZSCHILDS soll das Verteilungsgesetz der Sternengeschwindigkeiten nicht durch ein sphärisch symmetrisches Gesetz wie (3), sondern durch ein Gesetz der Form

$$\frac{h k g}{\sqrt{\pi^3}} e^{-(h^2 u^2 + k^2 v^2 + g^2 w^2)} du dv dw \quad (5)$$

dargestellt werden, in dem die *Flächen gleicher Häufigkeit der Geschwindigkeitspunkte* nicht mehr Kugeln, sondern *Ellipsoide* sind. Wählen wir, wie bereits früher die Vertexrichtung (Stromrichtung der Sterne) zur  $U$ -Achse, so sind die einem konstanten Werte des Exponenten in Formel (5) entsprechenden Flächen langgestreckte Ellipsoide, die in erster Annäherung als Rotationsellipsoide um die  $U$ -Achse betrachtet werden dürfen ( $k = g > h$ ). Eine Bearbeitung des vorliegenden Beobachtungsmaterials an Eigenbewegungen von Sternen nach dieser «Ellipsoidenhypothese» von SCHWARZSCHILD ergab ein zu dem von EDDINGTON auf Grund der KAPTEYNSchen «Zweistromhypothese» erhaltenen ganz analoges Resultat: die große Achse des Ellipsoids fiel in die Milchstraßenebene und stimmte sehr genau mit der Vertexrichtung überein, und die Darstellung der Anfangsdaten war in beiden Fällen gleich befriedigend. Das Achsenverhältnis für das Geschwindigkeitsellipsoid ergab sich genähert zu 0,6. (Verhältnis einer der beiden gleichen kleinen Halbachsen zu der mit der Vertexrichtung zusammenfallenden Achse, das hier die gegenseitige Geschwindigkeit der beiden Sternströme, die EDDINGTON zu etwa 30 km/sec gefunden hatte, vertritt.) Die SCHWARZSCHILDsche Ellipsoidentheorie ist später durch C. V. L. CHARLIER und seine Mitarbeiter in Lund durch Einführung dreiachsiger Geschwindigkeitsellipsoide anstelle von Rotationsellipsoiden und Anwendung auf die Sterne der einzelnen Spektralklassen unter Verwendung auch ihrer Radialgeschwindigkeiten vervollkommen worden.

Dies war die Lage unseres Problems zu Anfang des 20. Jahrhunderts, als die mühsame von KAPTEYN international organisierte Materialsammlungstätigkeit allmählich ihrer Vollendung entgegenging und somit zu einer definitiven Bearbeitung drängte. Eine solche ist auch von KAPTEYN selbst in einer im Jahre 1922 im *Astrophysical Journal* erschienenen berühmten Abhandlung gegeben worden, nach der sich der Aufbau des Sternsystems in den folgenden, am besten an Hand der aus der Originalabhandlung entnommenen Figur (Abb. 2), zu erläuternden Zügen darstellt.

Die Gesamtform des Sternsystems erweist sich als die einer ganz flachen, in der Ebene der Milchstraße liegenden Scheibe. Die Flächen gleicher räumlicher Sterndichte haben die Gestalt von sehr stark abgeplatteten konzentrischen Rotationsellipsoiden um eine im

<sup>1</sup> Die galaktischen Längen  $\lambda$  werden vom Punkte des galaktischen Äquators gezählt, in dem letzterer den Himmelsäquator beim Übergange aus der südlichen in die nördliche Halbkugel schneidet, und zwar im selben Sinne – entgegen dem Uhrzeigersinne – wie die Rektaszensionen und die Längen.

Mittelpunkte des Systems senkrecht zur Milchstraßen-ebene stehende Achse, wobei das Achsenverhältnis aller dieser Ellipsoide annähernd gleich 1:5 ist. Die räumlichen Sterndichten innerhalb der einzelnen ellipsoidischen Schalen, wie sie sich, bei Vernachlässigung der Lichtabsorption im Raume, durch Anwendung der durch KAPTEYN und SCHWARZSCHILD entwickelten Rechenverfahren aus den Abzählungsergebnissen berechnen lassen, sind am Rande der Figur angegeben.

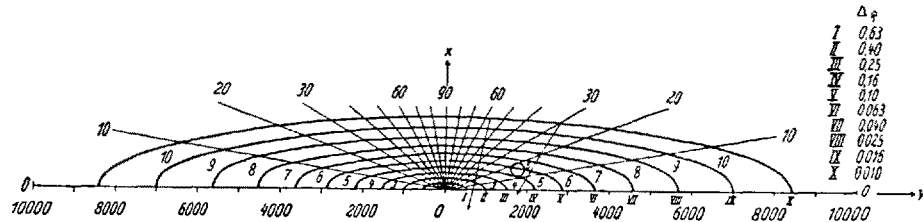


Abb. 2. Das Sternsystem von J. C. KAPTEYN<sup>1</sup>.

Sie ist für die mittleren Teile des Systems, in deren Nähe die Sonne gelegen sein soll, etwa gleich 0,035 Sternen pro Kubikparsec (0,001 Sterne pro Kubiklichtjahr), was einer räumlichen Dichte der gravitierenden Materie von etwa  $6 \cdot 10^{-22}$  g pro  $\text{cm}^3$  entspricht. Diese räumliche Dichte nimmt mit zunehmender Entfernung vom Mittelpunkte des Systems ständig ab und erreicht bereits in der 10. Schale, also in einer Entfernung von rund 7–8000 parsec (25000 Lichtjahre) in der Milchstraßenebene nur noch  $\frac{1}{100}$  ihres größten Wertes. Diese Entfernung können wir daher praktisch als die äußere Grenze des natürlich nicht scharf begrenzten Gebildes betrachten.

Um nun auch die Haupteigentümlichkeit in der Verteilung der Sternengeschwindigkeiten, nämlich das Bestehen einer bevorzugten Doppelrichtung für die Bewegung der Sterne zu erklären, machte KAPTEYN die weitere Annahme, daß sich sein Sternsystem als Ganzes nicht in einem statischen, sondern in einem dynamischen Gleichgewichtszustand befindet, indem es um seine Symmetrieachse eine *Rotationsbewegung* ausführt. Ein solcher Bewegungszustand wird ja auch durch die stark abgeplattete Form des Gebildes nahegelegt. An jeder Stelle, die nicht gerade auf der Rotationsachse liegt, muß aber dann tatsächlich eine systematische Sternbewegung, nämlich der Rotationsstrom der Sterne auftreten, und KAPTEYN brauchte nur noch die Annahme zu machen, daß diese Rotation in *beiden* Richtungen um die Achse erfolgt, was dynamisch selbstverständlich zulässig ist, um eine ungezwungene Erklärung der beiden von ihm entdeckten sich begegnenden Sternströme zu erhalten. Allerdings muß die Lage des Beobachtungspunktes, also der Sonne, etwas exzentrisch gewählt werden, damit sie überhaupt in ein Strömungsgebiet kommt, was gegen die Annahme, daß sie sich praktisch im Mittelpunkte des Systems be-

findet, verstößt; doch konnte KAPTEYN an Hand seines Modells zeigen, daß schon eine unbedeutende Ver-rückung der Sonne aus der Rotationsachse in der Ebene der Milchstraße, etwa um 650 parsec (rund 2000 Lichtjahre), die das Ergebnis der Sternabzählungen noch nicht wesentlich verändern würde, ausreichend wäre, um sie in ein Gebiet zu versetzen, wo die gegenseitige Geschwindigkeit der beiden Rotationsströme bereits den empirisch belegten Betrag von et-

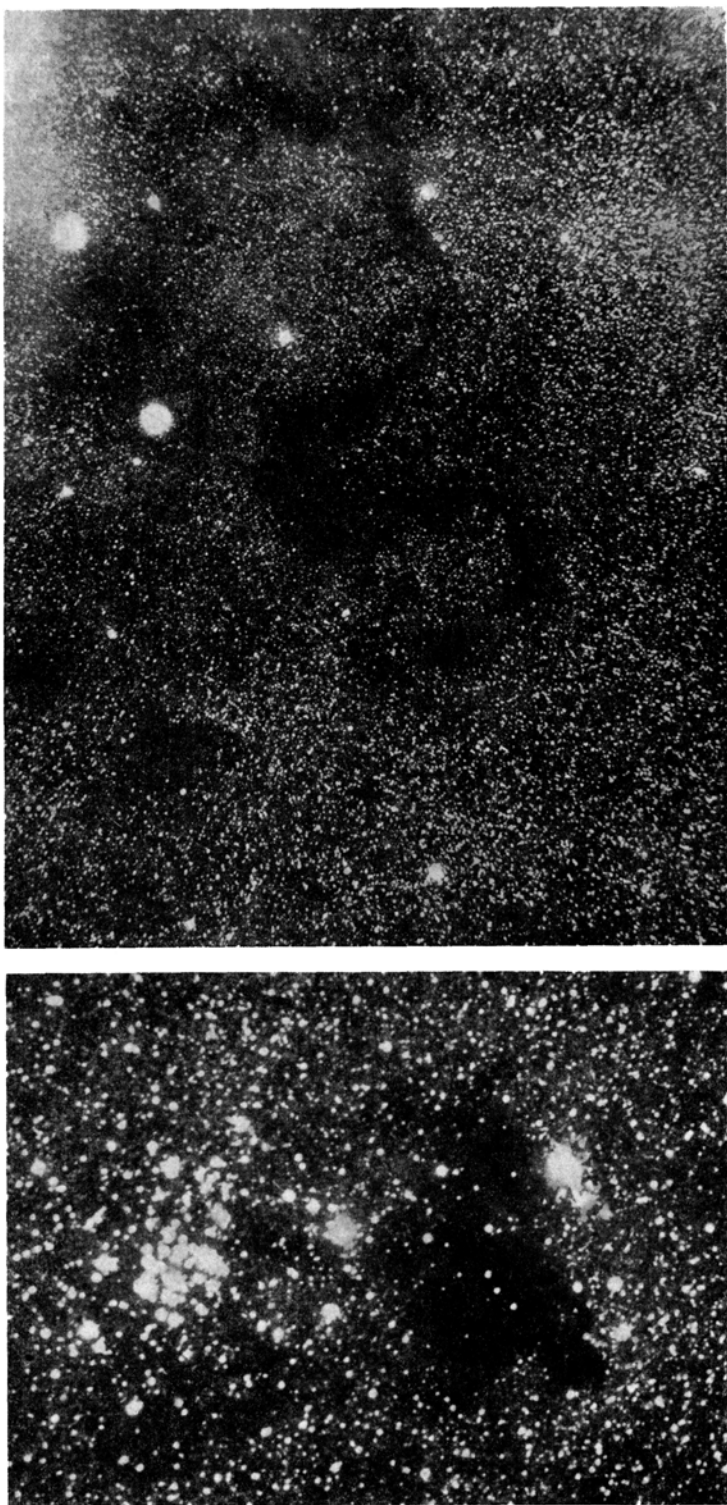
was über 30 km/sec erreichen würde. Das von KAPTEYN entworfene Bild des Sternsystems stellt einen sehr interessanten Versuch dar, die Haupteigenschaften dieses Systems sogar bis in die Einzelheiten seines Aufbaus hinein zu deuten. Er ist aber vorläufig der letzte Ver-

such dieser Art geblieben, weil uns die fortschreitende Untersuchung der Verhältnisse leider zu der Überzeugung gebracht hat, daß uns die räumliche Verteilung der gravitierenden Massen im Sternsystem, die KAPTEYN ermittelt zu haben glaubte, in Wirklichkeit noch ganz unbekannt ist, wozu noch hinzukommt, daß die von uns soweit studierte Geschwindigkeitsverteilung der Sterne nur für die in verhältnismäßig kleiner Entfernung von der Sonne gelegenen Sterne gilt, während die ferner liegenden astronomischen Objekte einen ganz anderen Bewegungszustand verraten. Dem KAPTEYNschen Sternsystem war daher nur eine sehr kurze Lebensdauer beschieden, und man kann sogar sagen, daß schon bei seiner Aufstellung die Forschung über die Ergebnisse, die ihm zugrunde lagen, hinausgegangen und zu äußerst wichtigen neuen Erkenntnissen gelangt war, die uns zu völlig veränderten Vorstellungen vom Aufbau des Milchstraßensystems führten.

Die den KAPTEYNSchen Berechnungen zugrunde liegenden Annahmen von der vollständigen Durchsichtigkeit des interstellaren Raumes und von der genähert zentralen Lage der Sonne in bezug auf das Sternsystem haben sich nämlich beide als völlig unzutreffend erwiesen. Daß es an verschiedenen Stellen des Himmels dunkle, das Licht absorbierende Wolken gibt, die aus kosmischem Staube oder Gas bestehen, und daß durch ihre Absorption das wahre Bild der Sternverteilung stellenweise vollständig verfälscht wird, war, wie bereits oben erwähnt, schon längst bekannt. Zwei typische Wolken dieser Art sehen wir auf den photographischen Aufnahmen von reichen Sternfeldern auf Seite 480, die E. BARNARD schon vor vielen Jahren aufgenommen hat (Abb. 3). Die dunklen, beinahe sternleeren Gebiete können augenscheinlich keine zufälligen Lücken in der Sternverteilung darstellen, sondern werden durch die Absorptionswirkung eines vorgelagerten dunklen kosmischen Nebels hervorgerufen, der nur dadurch für uns sichtbar geworden ist, weil er sich auf

<sup>1</sup> E. v. D. PAHLEN, Lehrbuch der Stellarstatistik, S. 800, Abb. 120.

das sehr reiche im Hintergrunde liegende Sternfeld projiziert. Nun hat es sich aber allmählich herausgestellt, daß solche absorbierende Nebel in Wirklichkeit viel häufiger vorkommen als man anfangs vermutet hatte, ja daß der ganze uns umgebende Raum, wenigstens in der unmittelbaren Nähe der Milchstraßenebene, von lichtabsorbierenden Wolken durchsetzt ist, was man zum Beispiel an der rötlichen Verfärbung der Sterne in vielen Himmelsgegenden und an verschiedenen anderen Anzeichen erkennen kann. Unglücklicherweise bilden diese «dunklen Nebel» keineswegs eine gleichmäßige Schicht, deren Absorptionswirkung etwa durch die Einführung eines im Raume konstanten Absorptionskoeffizienten ersetzt werden könnte, sondern stellen, genau so wie die Sterne in der Milchstraße, ein lose zusammenhängendes System von unregelmäßigen, wolkenartigen Gebilden dar. Es ist daher bei der Untersuchung eines in der Nähe der Milchstraße gelegenen Sternfeldes niemals möglich, von vornherein die in ihm wirklich auftretenden Sterndichten und Sternleeren von den durch kosmische Lichtabsorption hervorgerufenen Sternlücken zu trennen, und es ist begreiflich, daß unter diesen Umständen die auf Grund von Sternabzählungen abgeleiteten Ergebnisse über die wahre räumliche Sternverteilung in vielen Fällen rein illusorisch werden müssen. Dies ist auch der Hauptgrund dafür, daß wir heute, trotz des riesigen Arbeitsaufwandes und der ungeheuren aufgewandten Rechenarbeit, immer noch nichts Bestimmtes über die Verteilung der Sterne in der weiteren Umgebung der Sonne wissen und nicht einmal sagen können, ob der von allen frühen Forschern, unter ihnen auch von KAPTEYN, gefundene allseitige stetige Abfall der räumlichen Sterndichte mit wachsender Entfernung von der Sonne eine reale Erscheinung ist oder nur durch die Wirkung von absorbierenden Wolken vorgetäuscht wird. Bei Berücksichtigung letzterer, so gut dies heute schon geht, sind verschiedene moderne Forscher zu dem Ergebnis gelangt, daß ein Abfall der räumlichen Sterndichte in gewissen Richtungen bis zu der Entfernung der schwächsten von unseren Abzählungen erfaßten Sterne ganz bestimmt nicht festzustellen ist, und andererseits dürften viele mächtige Sternwolken, aus denen die eigentliche Milchstraße zu bestehen scheint, sicher weit außerhalb der durch KAPTEYN für das Sternsystem gesteckten Grenzen liegen, so daß letzteres demnach eher als eine lokale Sternansammlung – das von manchen Astronomen angenom-

Abb. 3. Zwei «dunkle» Nebel<sup>1</sup>.

mene, jedoch noch nicht sicher verbürgte «Lokale Sternsystem» – zu betrachten wäre.

Unter diesen Umständen drohte die ganze Untersuchung des Aufbaus des Sternsystems in eine Sackgasse zu geraten, und ein wesentlicher Fortschritt

<sup>1</sup> E. BARNARD in: Handbuch der Astrophysik, Bd. V, 2, S. 787, Abb. 4, und S. 788, Abb. 5.

Abb. 4<sup>1</sup>. Ein typischer Kugelhaufen (Herkuleshaufen).

wäre auch in der Tat auf lange Zeit unmöglich geworden, wenn nicht von seiten der Astrophysik eine ebenso unerwartete als willkommene Hilfe in Gestalt einer ganz neuen Methode zur Bestimmung der Entfernungen außerordentlich ferner Objekte gekommen wäre. Diese Methode stellt aus dem Grunde ein ganz besonders wertvolles Hilfsmittel dar, weil gerade die von ihr erfaßten Objekte, nämlich die sog. *kugelförmigen Sternhaufen* (Abb. 4) eine Verteilung am Himmel zeigen, die der Annahme der Kreissymmetrie um die Sonne am krassesten widerspricht, und die Ermittlung ihrer wahren räumlichen Verteilung daher für die Erkenntnis der wirklichen Gestalt des Systems besonders aufschlußreich zu sein verspricht.

Die von H. SHAPLEY am Mount-Wilson-Observatorium entwickelte Methode der Bestimmungsbestimmung von kugelförmigen Sternhaufen ist die berühmte «Cepheidenmethode» und beruht auf der Erkenntnis, daß ein Stern ja ein physikalisches Gebilde ist, das allerdings in verschiedenen Gestalten auftreten kann – Sterne verschiedener Spektralklasse und Leuchtkraft, veränderliche Sterne usw. –, daß aber alle diese Typen

an allen Stellen des Raumes vermutlich dieselben Eigenschaften besitzen müssen, die wir an den Sternen unserer Umgebung, die uns am zugänglichsten sind und deren Entfernungen uns mehr oder weniger bekannt sind, ausführlich studieren können, um die gewonnenen Kenntnisse dann auch auf die entferntesten Vertreter dieser Typen zu übertragen. In diesem Falle handelte es sich um *veränderliche Sterne* einer bestimmten Klasse, zu denen auch der Stern  $\delta$  Cephei gehört, und die aus diesem Grunde «Cepheiden» genannt werden. Das Licht dieser Sterne erleidet mit außerordentlicher Regelmäßigkeit sich wiederholende Intensitätsschwankungen, die nur auf physikalischem Wege, etwa durch eine streng periodische Pulsation des ganzen Sternkörpers (also nicht etwa durch Verfinsterung durch einen dunklen Begleiter) erklärt werden können. Solche Veränderliche, vor allem ihre die kürzeste Lichtschwankungsperiode aufweisende Unterklasse, deren Lichtwechsel in etwas weniger als einem Tage erfolgt, kommen ziemlich oft unter den Sternen der Kugelhaufen vor, weshalb diese Klasse die Bezeichnung «Haufenveränderliche» (cluster variables) erhalten hat. Nun befinden sich einzelne Vertreter dieses Typus in unserem Sternsystem, im Raume weit zerstreut, also in sehr verschiedenen Entfernungen von uns, die dazu noch meistens weit außerhalb der Reichweite unserer trigonometrischen Messungsmethoden liegen, so daß

wir über ihre wahre Leuchtkraft oder absolute Helligkeit zunächst nichts aussagen können. Ein glücklicher Zufall wollte es aber, daß zu Anfang dieses Jahrhunderts eine Reihe solcher Sterne in zwei von uns sicher sehr weit entfernten Gebilden, den in der südlichen Halbkugel gelegenen sog. «Magellanschen Wolken», entdeckt wurde. Da alle diese Sterne augenscheinlich in nahezu gleichen Entfernungen von uns stehen, erscheint ihr Licht auch in gleichem Maße geschwächt, und die zwischen ihnen feststellbaren Unterschiede ihrer scheinbaren Helligkeiten entsprechen daher wirklichen Unterschieden ihrer Leuchtkräfte. Nun zeigte sich aber, daß zwischen letzteren und den Längen der entsprechenden Lichtwechselperioden eine sehr enge Korrelation besteht in dem Sinne, daß die mittlere absolute Helligkeit eines Sterns des Cepheidentypus (das arithmetische Mittel aus seiner maximalen und seiner minimalen Helligkeit) um so größer ist, je langsamer seine Lichtschwankung erfolgt. Diese Beziehung gibt uns ein neues, mächtiges Mittel in die Hand, um die Entfernungen (zunächst die *relativen*) der Kugelhaufen, in denen gleichfalls Veränderliche des Cepheidentypus festgestellt werden konnten, zu bestimmen. Wenn nämlich ihr Licht auf seinem Wege zu uns

<sup>1</sup> E. STRÖMGREN und B. STRÖMGREN, Lehrbuch der Astronomie. J. Springer, Verlag, Berlin 1933.

keine merkliche Absorption erleidet (und die meisten Kugelhaufen liegen in beträchtlichen galaktischen Breiten, befinden sich also vermutlich schon außerhalb der vorwiegend in der Milchstraßenebene liegenden Schicht von absorbierenden Gas- und Staubwolken), dann stehen die Entfernungen zweier Kugelhaufen, in denen die Helligkeiten von Cepheiden *gleicher Periode* sich wie 1:4 verhalten, augenscheinlich im Verhältnis 1:2 zueinander. Durch diese wunderbare Methode, die die Entfernungsmessung auf die Messung von Zeiten und Helligkeiten zurückführt, können also die gegenseitigen räumlichen Lagen aller Kugelhaufen, in denen Veränderliche bekannt sind, ermittelt werden. Um nun diese relativen Entfernungen in absolute (etwa in Lichtjahren ausgedrückte) Entfernungen zu verwandeln, muß der Nullpunkt der Kurve durch Angabe der wirklichen absoluten Helligkeiten einiger Cepheiden bekannter Perioden fixiert werden, und dies stellt gerade den heikelsten Punkt der «Cepheidenmethode» dar. SHAPLEY hat zu diesem Zwecke die im Sternsystem zerstreut liegenden einzelnen Cepheiden herangezogen, deren Entfernungen er auf Grund ihrer bekannten Eigenbewegungen (in denen sich ja auch die Sonnenbewegung von 20 km/sec statistisch widerspiegelt) abschätzte, und ist auf diese Weise zu einer Normierung seiner Periodenhelligkeitskurve gelangt, jedoch ist ein kleiner Fehler im Nullpunkte, der alle Entfernungen um 6 bis 10% verändern könnte, noch nicht als ausgeschlossen zu betrachten.

Da nun bei weitem nicht alle Kugelhaufen veränderliche Sterne enthalten, ist diese Methode auf die meisten Haufen nicht anwendbar, doch lassen sich mit ihrer Hilfe, unter Benutzung der ihr zugänglichen Haufen, weitere Kriterien aufstellen, wie z. B. die mittlere absolute Helligkeit der zehn oder zwanzig allerhellsten (nichtveränderlichen) Sterne eines Haufens, der mittlere lineare Durchmesser eines Haufens oder auch die mittlere integrierte absolute Leuchtkraft aller Sterne eines Haufens, die wenigstens die genäherten Entfernungen auch der von Veränderlichen entblößten Kugelhaufen abzuschätzen gestatten. Auf diese Weise ist es SHAPLEY gelungen, das vollständige Bild der räumlichen Verteilung der 96 uns bekannten Kugelhaufen unseres Systems zu ermitteln und dabei einen tiefen Einblick in die physikalische Natur dieser seltenen, höchst merkwürdigen Gebilde zu gewinnen. Da sich alle Entfernungen von Kugelhaufen als auffallend groß ergaben – schon die allernächsten liegen in Entfernungen von über 3000 Lichtjahren (1000 parsec) – ist es klar, daß ein typischer Kugelhaufen eine sehr ausgedehnte und mächtige Sternansammlung darstellen muß. Ihre Durchmesser betragen über hundert Lichtjahre, die Anzahlen ihrer Sterne, die in ihren Mitten etwa 500mal dichter stehen als die Sterne in der Umgebung der Sonne, gehen in die Hunderttausende, und da wir wegen ihrer großen Entfernungen nur die Sterne sehen, die mehrere hundertmal lichtstärker, und daher

auch beträchtlich massiver als unsere Sonne sind (während die sicher vorhandenen schwächeren Sterne von Sonnendimensionen uns noch gänzlich verborgen bleiben), kann die Masse eines typischen Kugelhaufens getrost auf über eine Million Sonnenmassen veranschlagt werden. Wir sehen aus alledem, daß es sich bei den Kugelhaufen um sehr bedeutungsvolle Bestandteile unseres Sternsystems handeln muß, und daß ihre räumliche Verteilung daher wohl geeignet erscheinen kann, uns eine Vorstellung von der Ausdehnung und dem Aufbau dieses Sternsystems zu vermitteln.

Nun stellt sich aber heraus, daß diese Verteilung mit der von KAPTEYN aus den Sternabzählungen in unserer Umgebung erhaltenen nur sehr wenig Ähnlichkeit hat. Zwar bleibt auch für sie die durch die Sternwolken definierte Grundebene der Milchstraße als Symmetrieebene bestehen, was unzweideutig auf ihre enge Verbundenheit mit unserem Sternsystem hinweist, doch liegen die Kugelhaufen mit nur ganz vereinzelter Ausnahmen alle auf einer Seite des Himmels, etwa symmetrisch um einen Punkt verteilt, der in der Milchstraße in der Richtung des Sternbildes des Schützen in galaktischer Breite  $0^0$  und galaktischer Länge  $326^0$  liegt und dessen Entfernung von uns auf 30000–50000 Lichtjahre (10000–16000 parsec) geschätzt wird. Daß dieser Himmelsrichtung eine sehr große Bedeutung im Aufbau unseres Sternsystems zukommt, ist für die Astronomen eigentlich keine so große Überraschung gewesen: daß in dieser Richtung «etwas ganz Außergewöhnliches los sein müsse» hatten sie nämlich schon lange vermutet. Denn dieser Punkt der Sphäre ist keineswegs nur der Symmetriepunkt für die scheinbare Verteilung der Kugelhaufen, sondern auch noch Häufungspunkt für eine Reihe anderer Objekte, die sich alle durch ihre große Masse, also auch ihre entsprechende Bedeutung für die Mechanik des Sternsystems auszeichnen, als da sind: die planetarischen Gasnebel, in denen man heute explodierte Sterne vermutet, die außerordentlich hellen und heißen sog. Wolf-Rayet-Sterne, in deren Spektren die Linien der Serien des ionisierten Heliums erscheinen und die vermutlich Oberflächentemperaturen von über 30000° C besitzen (Oberflächentemperatur der Sonne etwa 6000° C), sehr große Gas- und Staubwolken und schließlich die allergrößten sog. Sternwolken oder riesigen losen Sternansammlungen, aus denen der größte Teil der Milchstraße zu bestehen scheint, die aber an dieser Stelle ihres Verlaufs besonders ausgedehnt und sternreich zu sein scheinen (Sagittariuswolke, Scutumwolke). Es ist daher durch die Ergebnisse SHAPLEYS über die räumliche Verteilung der Kugelhaufen außerordentlich wahrscheinlich gemacht worden, daß wir in dem erwähnten fernen Punkte tatsächlich den Mittelpunkt unseres gesamten Sternsystems, den *galaktischen Mittelpunkt*, vor uns haben, und diese Vermutung wird, wie wir später sehen werden, durch das wenige, was uns heute bereits über die Bewegungsverhältnisse im

Sternsystem bekannt ist, noch bestärkt. Wenn diese Vermutung aber zutrifft, dann befinden wir uns mit unserer ganzen von KAPTEYN studierten Sterngruppe, die nicht einmal bis zur Hälfte des uns vom Mittelpunkt des Systems trennenden Abstandes reicht, keineswegs in einer »zentralen« Lage, sondern vielmehr beinahe am Rande unseres Sternsystems, wie dies aus der untenstehenden Figur (Abb. 5) erhellt, die einen durch den galaktischen Mittelpunkt und die Sonne gehenden, zur Milchstraßenebene senkrechten Schnitt durch dieses System darstellt.

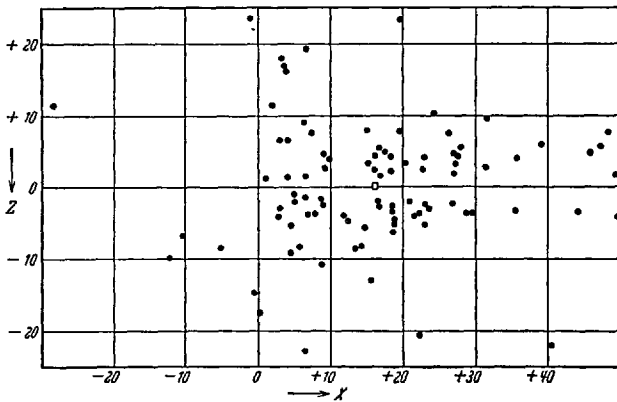


Abb. 5. Schnitt durch das galaktische System senkrecht zur Milchstraßenebene<sup>1</sup>. Die Punkte stellen die senkrechten Projektionen der einzelnen Kugelhaufen auf die Bildebene dar.

Hier befindet sich die Sonne im Anfang des Koordinatensystems (links in mittlerer Höhe), also am Rande des von den durch Punkte bezeichneten Kugelhaufen gebildeten, schwach abgeplatteten losen Haufens, dessen Mittelpunkt durch das kleine, offene Viereck markiert ist. Diese radikal neue Konzeption hat, wie bereits erwähnt, seitens gewisser uns in jüngerer Zeit bekanntgewordener Tatsachen über den Bewegungszustand der uns umgebenden Sterne eine unerwartete Bestätigung erfahren. Wenn schon KAPTEYN zeigen konnte, daß die Restgeschwindigkeiten dieser Sterne in bezug auf ihren gemeinsamen Schwerpunkt nicht, wie anfangs angenommen worden war, regellos verteilt sind, sondern durch einen in einer bestimmten Richtung langgezogenen Geschwindigkeitskörper dargestellt werden können, so hatte man bis dahin doch immer stillschweigend angenommen, daß dieser Geschwindigkeitskörper im ganzen untersuchten Raume überall derselbe ist und auch dieselbe Lage in bezug auf seinen Nullpunkt hat. Ein eingehenderes Studium des inzwischen stark angewachsenen Beobachtungsmaterials zeigte nun aber, daß gerade diese letzte Annahme nicht aufrechterhalten werden kann, sondern daß überall noch eine kleine systematische Restgeschwindigkeit übrigbleibt, welche darauf hinweist, daß die *mittlere* Geschwindigkeit der Sterne in verschiedenen Raumgebieten auch nach Abzug der bekannten Sonnenge-

schwindigkeit keineswegs gleich Null ist, wie das bei einem symmetrischen Geschwindigkeitskörper ja zu erwarten wäre. Das merkwürdigste aber ist, daß diese kleine mittlere Restgeschwindigkeit für verschiedene längs der Milchstraße liegende Himmelsgebiete einen auffallend regelmäßigen Gang mit der galaktischen Länge zeigt, indem sie z. B. für die Radialgeschwindigkeiten  $\bar{v}_r$  durch eine einfache trigonometrische Funktion der Form

$$\bar{v}_r = (A\bar{r}) \sin 2(\lambda - \lambda_0) \quad (6)$$

dargestellt werden kann. Hier bedeutet  $\bar{v}_r$  den für einen in der Milchstraße gelegenen nicht zu ausgedehnten Sternbereich bei der galaktischen Länge  $\lambda$  gebildeten Mittelwert aller von der Komponente der Sonnenbewegung befreiten Radialgeschwindigkeiten der in ihm enthaltenen Sterne, während  $(A\bar{r})$  und  $\lambda_0$  zwei Konstanten sind. Die uns hier interessierende kleine Restgeschwindigkeit  $\bar{v}_r$  zeigt also einen systematischen Gang um die Milchstraße herum, der in einer *Doppelwelle* besteht mit der Amplitude  $(A\bar{r})$ , die mit positivem oder negativem Vorzeichen in den vier galaktischen Längen

$$\lambda - \lambda_0 = \begin{vmatrix} 45^\circ, & 135^\circ, & 225^\circ & \text{und} & 315^\circ \end{vmatrix}$$

erreicht wird, während in den vier dazwischenliegenden Punkten viermal der Wert Null auftritt. Die Amplitude  $(A\bar{r})$  und die Länge  $\lambda_0$ , bei der ein Wert  $\bar{v}_r = 0$  erscheint, lassen sich empirisch auf Grund des Beobachtungsmaterials bestimmen. Erstere ist von Sterngruppe zu Sterngruppe verschieden und nimmt um so größere Werte an, je größer die mittlere Entfernung der benutzten Sterne ist. Zum Beispiel ergibt eine Bearbeitung der Sterne mit der sog. c-Charakteristik, die zu den absolut hellsten Sternen des Himmels gehören und uns daher einen tieferen Einblick in den Weltraum gewähren als die meisten anderen Sterne, für die Amplitude der Doppelwelle den Wert

$$(A\bar{r}) = 25 \text{ km/sec,}$$

während eine Bearbeitung nach demselben Verfahren der viel schwächer leuchtenden und daher durchschnittlich näheren Sterne des spektralen A-Typus nur einen Wert

$$(A\bar{r}) = 8 \text{ km/sec}$$

liefert. Wegen dieser Abhängigkeit der Amplitude von der Entfernung pflegt man sie in der oben angegebenen Form eines Produktes der mittleren Entfernung  $\bar{r}$  mit einer für alle Sterne gleichen Konstante  $A$  zu schreiben, welche augenscheinlich den Wert der Amplitude bezeichnet, den man bei Benutzung der Radialgeschwindigkeiten von Sternen erhalten würde, die sich im Durchschnitt in der Einheitsentfernung von 1 parsec (3,26 Lichtjahre) befinden. Im Gegensatz zu der Amplitude zeigt die zweite der in Formel (6) eingehenden Konstanten eine auffallend geringe Abhängigkeit von

<sup>1</sup> H. SHAPLEY in: Handbuch der Astrophysik, Bd. V, 2, S. 757, Abb. 20.

der zu ihrer Bestimmung benutzten Sterngruppe und erhält beinahe in allen Fällen einen in der Nähe von

$$\lambda_0 = 326^\circ$$

gelegenen Wert. Dies ist aber gerade die galaktische Länge, in der sich, wie wir oben gesehen haben, das Zentrum des galaktischen Systems befindet! Die Untersuchung der mittleren Eigenbewegungen der Sterne, die man einer ganz ähnlichen Behandlung unterwerfen kann, indem man sie in zwei Komponenten, eine parallele und eine senkrechte zur Milchstraßenebene, zerlegt und dann den Gang der Mittelwerte dieser Komponenten längs der Milchstraße studiert, führt zu ähnlichen Ergebnissen wie die aus den Radialgeschwindigkeiten erhaltenen. Während die mittlere senkrechte Komponente meistens gleich Null herauskommt, was auf eine symmetrische Verteilung der Sternengeschwindigkeiten in bezug auf die Milchstraßenebene hinweist, zeigt die zur Milchstraße parallele Komponente, wie bei den Radialgeschwindigkeiten eine Doppelwelle, die aber gegen die zuerst erhaltene um  $45^\circ$  verschoben ist und über die sich noch eine konstante (von der galaktischen Länge unabhängige) Verschiebung überlagert. Der Ausdruck für diese Komponente,  $\mu_{par}$  ergibt sich daher in der Form:

$$\bar{\mu}_{par} = (A\bar{r}) \cos 2(\lambda - \lambda_0) + (B\bar{r}). \quad (7)$$

Eine sehr plausible Erklärung dieser auf den ersten Blick recht verwickelten Verhältnisse hat der holländische Astronom J. H. OORT<sup>1</sup> bereits im Jahre 1927 vorgeschlagen. Sie besteht in der Annahme, daß sich das ganze galaktische Sternsystem um eine durch den fernen Mittelpunkt gehende zur Ebene der Milchstraße senkrechte Achse dreht, jedoch nicht wie ein fester Körper, dessen Winkelgeschwindigkeit überall konstant ist, dessen lineare Rotationsgeschwindigkeit daher mit wachsendem Abstände von der Rotationsachse ständig zunimmt, sondern eher wie unser Planetensystem, in dem sowohl die Winkelgeschwindigkeit als die lineare Geschwindigkeit mit zunehmendem Abstand von der Sonne immer kleiner werden. Um einen Einblick in diese Verhältnisse, deren ausführliche Schilderung hier zu weit führen würde, zu gewinnen, genügt ein Blick auf die nebenstehende Abb. 6, in der das galaktische Zentrum bei G liegt und die in verschiedenen Entfernungen von ihm (auf konzentrischen Kreisen um G) herrschenden Rotationsgeschwindigkeiten durch eine Reihe von nach außen immer kleiner werdenden Pfeilen dargestellt sind. Betrachtet man nun den kleinen, um die gegenwärtige Lage S der Sonne gelegten Kreis und die auf ihm liegenden Sterne, die sich alle in gleicher Entfernung von letzterer befinden, und bildet die geometrische Differenz ihrer und der an der Stelle der Sonne herrschenden Rotationsgeschwindigkeit, so sieht man sofort, daß die Projektionen dieser Differenz auf den von der Sonne aus ge-

zogenen Radius und senkrecht zu ihm differentielle Geschwindigkeiten ergeben werden, die sich längs dem kleinen Kreise gerade in der durch die Formeln (6) und (7) ausgedrückten Weise ändern werden. Es darf jedoch nicht unerwähnt bleiben, daß ein ganz ähnliches Verhalten der mittleren Radial- und Tangentialgeschwindigkeiten auch dann noch zu beobachten wäre, wenn die Bahnen um das galaktische Zentrum

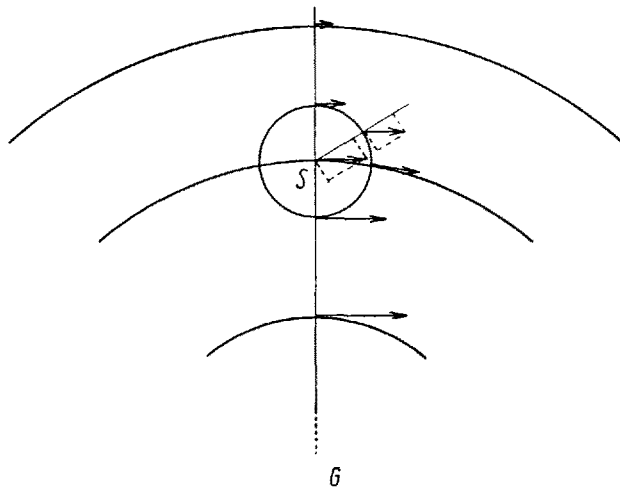


Abb. 6.  
Differentieller Rotationseffekt bei den Radialgeschwindigkeiten.

nicht, wie hier angenommen, genaue Kreise, sondern etwas exzentrische Ellipsen wären. Die beiden Effekte sind durch die Änderung der Rotationsgeschwindigkeit mit der Entfernung vom Mittelpunkt G des Sternsystems bedingt und werden daher als *differentielle* Rotationseffekte bezeichnet, während die beiden Konstanten A und B die OORTSchen Konstanten der differentiellen galaktischen Rotation genannt werden.

Wie groß ist nun aber der absolute Wert der Rotationsgeschwindigkeit an der Stelle, an der sich heute unsere Sonne befindet? Die Sterne unserer Umgebung können uns darüber natürlich keine Auskunft geben, da sie ja, falls die der Rotationstheorie zugrunde liegende Vorstellung zutrifft, an dieser Bewegung beteiligt sind. Die mit Hilfe der »gewöhnlichen« Sterne abgeleitete »Apexbewegung« der Sonne ist nur als die Bewegung eines einzelnen zufällig herausgegriffenen Sterns (der Sonne) in bezug auf die Sterne seiner *aller-nächsten* Umgebung zu verstehen, und kann daher höchstens als ein Beispiel für die in dieser Gruppe noch stattfindenden inneren Bewegungen bewertet werden. Daß die Gesamtgeschwindigkeit dieser Gruppe wahrscheinlich viel beträchtlicher ist, wird durch zwei in neuerer Zeit erreichte Beobachtungsergebnisse nahegelegt.

1. Benutzt man zur Bestimmung der Sonnengeschwindigkeit nicht die Sterne, sondern diejenigen Kugelhaufen, deren Radialgeschwindigkeiten auf spektroskopischem Wege ermittelt werden konnten (bei den riesigen Entfernungen der Kugelhaufen konnten in ihnen noch keine Eigenbewegungen wahrgenommen

<sup>1</sup> Bull. Astr. Obs. Netherlands., 3, No. 120; 4, No. 132, 133.

werden), so erhält man für die Bewegung der Sonne in bezug auf diese um den galaktischen Mittelpunkt gruppierten sehr fernen Gebilde eine Geschwindigkeit ganz anderer Größenordnung: nämlich von etwa 200–300 km/sec, die auch eine merklich andere Richtung hat, da sie nicht nach dem Sternbilde des Herkules, sondern nach dem des Schwans hinweist – nämlich nach einem Punkte der Milchstraße in der galaktischen Länge  $\lambda = 56^\circ$ . Diese Geschwindigkeit steht also bemerkenswerterweise praktisch senkrecht auf der die Sonne mit dem galaktischen Zentrum verbindenden Geraden, und wir können sie denn auch in erster Näherung als die Rotationsgeschwindigkeit des Sternsystems an der Stelle der Sonne betrachten, da sie, bei ihrer Größe, durch den kleinen hinzukommenden Betrag der «individuellen» Sonnengeschwindigkeit von 20 km/sec weder in bezug auf Größe noch auf Richtung wesentlich verändert wird. In diesem Ergebnis haben wir eine schöne Bestätigung der Grundannahme vor uns, daß sich unsere ganze Sterngruppe in irgendeiner Art Rotationsbewegung um das galaktische Zentrum befindet, und zwar mit einer Geschwindigkeit, die die Geschwindigkeiten der inneren Bewegungen der Sterne dieser Gruppe ganz beträchtlich (um etwa das Zehnfache) übersteigt. Allerdings kann heute noch nicht behauptet werden, daß uns der genaue Wert dieser Geschwindigkeit schon bekannt wäre. Seine Bestimmung wird durch die für solche Zwecke denkbar ungünstige Verteilung der Kugelhaufen, die, wie wir gesehen haben, beinahe alle auf einer Seite der Himmelskugel liegen, und ferner durch die noch sehr geringe Zahl der uns bekannten Radialgeschwindigkeiten dieser Haufen sehr erschwert. Die neuesten Bestimmungen auf Grund der Radialgeschwindigkeiten von etwa 50 Kugelhaufen scheinen einen etwas kleineren Wert von rund 170 km/sec als den aus älteren Bestimmungen erhaltenen zu ergeben.

2. Zu einem prinzipiell gleichlautenden Ergebnis führen auch die Beobachtungen an den im Sternsystem vereinzelt auftretenden Sternen besonders großer Geschwindigkeit (etwa über 60 km/sec in bezug auf die Sonne), die man aus diesem Grunde als «Schnellläufer» zu bezeichnen pflegt. Die Zielpunkte der Geschwindigkeiten dieser Sterne sind nämlich keineswegs gleichmäßig über die Kugel verteilt, sondern ausnahmslos in derjenigen Hälfte der Himmelssphäre enthalten, die in Abb. 6 links von einer durch die Gerade GS senkrecht zur Bildebene gelegten Ebene liegt, d.h. auf der der Richtung der Rotationsbewegung abgekehrten Seite. Hier wird uns die zunächst hypothetisch geforderte Bewegung unserer ganzen Sterngruppe gewissermaßen handgreiflich sichtbar: die Schnellläufer sind augenscheinlich Sterne, die die schnelle Bewegung unserer um den galaktischen Mittelpunkt mit großer Geschwindigkeit rasenden Gruppe nicht oder nicht in vollem Maße mitmachen und daher hinter ihr «zurückbleiben». Die «Schnellläufer» erweisen sich somit in

Wirklichkeit als «Langsamläufer», die an der Fahrt unserer Sterngruppe um den Mittelpunkt des Milchstraßensystems nicht teilnehmen, sondern viel kleinere Geschwindigkeiten in bezug auf den allgemeinen Schwerpunkt des Milchstraßensystems haben und daher vermutlich um den galaktischen Mittelpunkt viel gestrecktere Bahnen beschreiben.

Wenn wir nun auf Grund aller oben geschilderten neuen Erkenntnisse ein Bild des wahren Aufbaus des Sternsystems zeichnen wollten, so würde das durch die räumliche Verteilung der Kugelhaufen gegebene Gerüst natürlich den Rahmen abgeben müssen. Doch würden wir sofort merken, daß dieser Rahmen zum größten Teil noch ganz unausgefüllt bleiben würde. Allerdings können wir unbedenklich in der Mitte des Bildes, in etwa 40000 Lichtjahren Entfernung von uns, das galaktische Zentrum aufstellen, das eine ungeheure Zusammenballung von mächtigen Sternwolken, leuchtenden und dunklen Nebeln und besonders massiven Sternen darstellt, um das sich die großen kugelförmigen Sternhaufen gewissermaßen als Untersysteme symmetrisch in bezug auf die Milchstraßenebene lagern, in Entfernungen, die bis zu 150000–200000 Lichtjahren (40000–60000 parsec) reichen. Womit sollen wir aber die ungeheuren diese Untersysteme voneinander trennenden Räume und vor allem die zwischen uns und dem Mittelpunkte des Systems gähnende Leere ausfüllen? Unsere eigene Sternfamilie, die von SEELIGER, KAPTEYN und ihren Zeitgenossen noch schlechthin für *das* Sternsystem gehalten wurde, stellt bestenfalls eine ganz lose örtliche Sternverdichtung dar, die sich höchstens bis zur halben Entfernung der Sonne vom Mittelpunkte des Systems erstreckt. Was dahinter liegt, bis die großen, diesen Mittelpunkt umgebenden Sternwolken erreicht sind, oder gar was *jenseits* dieses Mittelpunktes sich noch befinden mag, entzieht sich noch meistens völlig unserer Kenntnis. Glücklicherweise braucht dieser Raum heute nicht mehr als ganz weißer Fleck auf unserer Weltkarte zu bleiben: wir kennen nämlich außer den Kugelhaufen noch andere, losere und weniger massive Sternansammlungen, die alle in unmittelbarer Nähe der Milchstraßenebene liegen und als offene oder galaktische Sternhaufen bezeichnet werden. (Die Plejaden, die Hyaden, Praesepe usw.) Diese Gebilde enthalten praktisch niemals veränderliche Sterne, so daß die Cepheidenmethode zur Bestimmung ihrer Entfernungen nicht angewandt werden kann. Da wir aber in ihnen wegen ihrer im Vergleich zu den Kugelhaufen beträchtlich kleineren Entfernungen auch die Spektraltypen zahlreicher Sterne bestimmen können, sind wir in der Lage, durch den Vergleich ihrer genähert bekannten absoluten Helligkeiten mit ihren scheinbaren Helligkeiten in den verschiedenen offenen Haufen uns ein provisorisches Urteil über die Entfernungen letzterer zu bilden und somit auch ihre räumliche Verteilung in ihren wesentlichen Zügen zu ermitteln. Allerdings sind diese Ent-

fernungen beträchtlich weniger zuverlässig als diejenigen der Kugelhaufen, vor allem weil sie durch die Lichtabsorption der gerade in der Milchstraßenebene besonders zahlreich auftretenden kosmischen Staub- und Gaswolken in schwer zu berücksichtigender Weise verfälscht werden. Die offenen Haufen scheinen nun ziemlich gleichmäßig im Raume gestreut zu sein und füllen die Lücke zwischen unserer lokalen Sternverdichtung und dem galaktischen Mittelpunkt einigermaßen aus, ohne zunächst irgendwelche charakteristische strukturelle Eigenschaften des Systems zu ver-

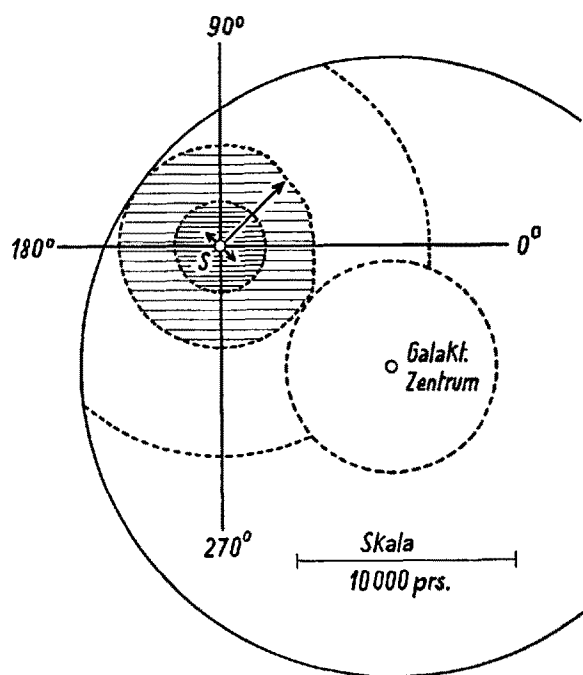


Abb. 7.

Schematische Skizze des galaktischen Systems nach R. J. TRÜMLER<sup>1</sup>.

Verteilung der bekannten offenen Sternhaufen, projiziert auf die Milchstraßenebene. Innerhalb des dunkel schraffierten Kreises sind diese Sternhaufen beinahe gleichmäßig verteilt; im leichter schraffierten Ringgebiete nimmt ihre räumliche Dichte rapid ab. Der große punktierte Kreis um die Sonne bezeichnet die Grenzferne von 10000 parsec, bis zu der die Suche nach noch unbekannten offenen Sternhaufen fortgesetzt werden könnte. Der voll ausgezogene Kreis bezeichnet die Grenze des galaktischen Systems. Der große Pfeil stellt die Geschwindigkeit der Sonne in bezug auf das als ruhend betrachtete galaktische Zentrum dar, der kleine Doppelpfeil: die in bezug auf den Schwerpunkt der die Sonne umgebenden Sterngruppe beobachtete «Sternströmung».

offener Sternhaufen bekannt ist. Das hier skizzierte, eingeständenermaßen höchst provisorische Bild des Milchstraßensystems, mit dem wir uns heute noch begnügen müssen, wird durch die nebenstehende, einer Arbeit von R. J. TRÜMLER, dem Erforscher des Systems der offenen Haufen, entnommene Zeichnung (Abb. 7) gegeben, die in der Legende genau beschrieben ist.

Bei dem festgestellten Versagen unserer Hilfsmittel und Methoden, uns einen tieferen Einblick in die Struktur unseres Milchstraßensystems zu verschaffen, ist es nur natürlich, einen Blick über die Grenzen dieses Systems hinaus zu werfen und zuzusehen, ob uns im Weltraum nicht noch andere Systeme sichtbar sind, deren aus großer Entfernung gewonnener Anblick uns vielleicht einen nützlichen Fingerzeig zur Lösung unseres Problems geben könnte. Nun sind solche «fremde Milchstraßensysteme», wie wir heute wissen und wie schon längst vermutet wurde, in der Tat vorhanden, und die bei ihnen auftretenden Formen können in zwei große Klassen eingeteilt werden: das mehr oder weniger exzentrische Ellipsoid und die Spirale. Es ist daher außerordentlich plausibel, auch bei unserem Milchstraßensystem eine von diesen Formen zu vermuten, wegen seiner ausgesprochen flockigen, aus einzelnen Sternwolken bestehenden Struktur, am ehesten wohl die letztere. Es hat denn auch nicht an Versuchen gefehlt, die am Himmel sichtbare Verteilung der großen Milchstraßenwolken in diesem Sinne zu deuten. Abgesehen von dem gänzlich phantastischen Entwurf von PROCTOR um die Mitte des 19. Jahrhunderts, hat EASTON wohl als erster in einer im Jahre 1913 im *Astrophysical Journal* erschienenen Abhandlung den Versuch gemacht, den Anblick der Milchstraße durch Anordnung der sie bildenden Wolken längs einem Spiralaste zu erklären, wobei er den «Kern» dieses Spiralnebels in das Sternbild des Schwans verlegen zu können glaubte, was sich mit unserer seither gewonnenen Kenntnis von dem in der Richtung des Schützen liegenden galaktischen Zentrum keinesfalls vereinigen läßt. Trotzdem dieser und verschiedene andere Versuche gegenwärtig als verfehlt abzulehnen sind, wird sich heute schwerlich ein Astronom finden, der nicht im stillen den Glauben hegte, daß unser Milchstraßensystem eine irgendwie geartete spiralförmige Struktur besitzt. Und die Ergebnisse der allerneuesten Forschung scheinen diese Vermutung durchaus zu stützen: Wie aus den von W. BAADÉ am großen Mount-Wilson-Reflektor von 100 Zoll ( $2\frac{1}{2}$  m) Öffnung ausgeführten, noch nicht abgeschlossenen Untersuchungen hervorzugehen scheint, läßt sich unser galaktisches System als ein Spiralnebel des besonderen Typus, den man als «Balkenspiralen» zu bezeichnen pflegt, auffassen, dessen Eigentümlichkeit darin besteht, daß die Spiralarme in ihm nicht unmittelbar aus dem Kerne, sondern aus den beiden Enden eines den Kern durchsetzenden, mehr oder weniger geraden «Balkens» hervorwach-

<sup>1</sup> R. J. TRÜMLER, *Astroph. J.*, 91, 197, Fig. 3 (1940).

sen<sup>1</sup>, Doch wäre es heute noch verfrüht, diesem Gedanken in einem der allgemeinen Orientierung gewidmeten Aufsätze weiter nachzugehen.

Wo bleibt aber bei dieser Betrachtungsweise das Phänomen der Sternströmung? Seine Unterbringung in einer spiralförmig gestalteten Sternwelt ist keine ganz leichte Aufgabe. Als vor etwa einem Vierteljahrhundert die mathematische Theorie eines aus Sternen bestehenden «Gases» von J. H. JEANS und V. C. L. CHARLIER begründet wurde, und sich sofort herausstellte, daß der wesentlichste Unterschied eines solchen «Stern gases» von einem gewöhnlichen Gase darin besteht, daß man beim ersteren, wegen der sehr großen Abstände der Sterne voneinander und ihrer verhältnismäßig kleinen gegenseitigen Geschwindigkeiten, den Einfluß der in der Gastheorie so überaus wichtigen «Zusammenstöße» ganz vernachlässigen kann, dafür aber die von der Gesamtheit aller Sterne auf jeden einzelnen ausgeübten Gravitationskräfte unbedingt berücksichtigen muß, konnten eine Reihe wichtiger Theoreme über die in einem stationären Zustande befindlichen Sternsysteme abgeleitet werden. Es ergab sich unter anderem, daß in einem solchen System, das sowohl eine kugelförmige als auch eine um eine Achse symmetrische Gestalt haben kann, die Geschwindigkeitsverteilung an jeder Stelle sehr wohl die Form eines gestreckten, eine Vorzugsrichtung besitzenden Geschwindigkeitskörpers besitzen kann, so daß auch ein mit dem ganzen System mitbewegter Beobachter in den von ihm wahrgenommenen Sternengeschwindigkeiten eine doppelseitige Strömung längs einer «Vertexrichtung» festzustellen in der Lage wäre. Wenn aber das Sternsystem wirklich ein Spiralnebel sein sollte, dann ist es weder im strengen Sinne achsensymmetrisch noch kann es sich in einem stationären Zustande befinden. Vielmehr scheinen die Untersuchungen von S. CHANDRASEKHAR<sup>2</sup> zu zeigen, daß in diesem Falle die Geschwindigkeitsverteilung eine sphärische sein muß, wie sie z. B. durch ein MAXWELLSches Verteilungsgesetz der Form (3) gegeben wird. Dann kann aber der an irgendeiner Stelle des Systems «mitreisende» Beobachter keine Sternströmung feststellen, da ja nun keine Bewegungsrichtung der Sterne vor einer anderen ausgezeichnet erscheint. Um das zweifellos vorhandene Phänomen der Sternströmung auch in diesen Vorstellungskreis einzubauen, muß daher auf die KAPTEYNSche «Zweistromhypothese» zurückgegriffen werden. Setzt man zum Beispiel mit CHANDRASEKHAR voraus, daß sich die Sternverdichtungen, die wir als Milchstraßenwolken beobachten, längs den Ästen von Spiralen bewegen, und zwar sowohl nach innen (nach dem Kerne zu) als auch nach außen, so wird ein an irgendeiner Stelle eines Astes befindlicher Beobachter, ganz gleich in welcher Richtung er sich mit seiner Sonne bewegt, natürlich immer die beiden entgegengesetzten Sternströmungen fest-

stellen können. Eine Bewegung längs einem Spiralaste ist dynamisch natürlich in beiden Richtungen möglich, ob aber das gleichzeitige Auftreten beider Bewegungen als wahrscheinlich bezeichnet werden kann, ist eine ganz andere Frage.

Aus den obenstehenden Betrachtungen ersehen wir, daß unser Bild der Struktur des Milchstraßensystems heute noch ein sehr unvollständiges und lückenhaftes ist. Ja man kann sogar sagen, daß die Erforschung dieser Struktur immer noch in ihren Anfängen steckt und eines der großen, noch ungelösten Probleme der modernen Astronomie bildet. Es ist auch durchaus möglich, daß dieses Problem in Wirklichkeit noch komplizierter ist, als wir lange geglaubt haben, denn die neueste Forschung legt den Gedanken nahe, daß unser Milchstraßensystem gar kein so abgeschlossenes und isoliertes Gebilde ist, wie es auf den ersten Blick zu sein scheint, sondern einer ganzen Gruppe von «Galaxien» angehört, die mit ihm zusammen einen kleinen Haufen von Milchstraßen bilden. Die beiden Magellanschen Wolken, die großen Spiralnebel in der Adromeda und im Dreieck, sowie mindestens zehn weitere kleinere Objekte sind heute als Mitglieder dieser «lokalen Gruppe» zusammenhängender Milchstraßen, deren Durchmesser somit viele Millionen von Lichtjahren betragen muß, mit Sicherheit erkannt worden. Aber damit sind wir bereits an die Grenze des hier zur Behandlung stehenden Problems gelangt und betreten das zunächst noch kaum erforschte uferlose Gebiet der *Metagalaxie*.

#### Summary

The very first attempt to explore the structure of our Galaxy undertaken by Sir WILLIAM HERSCHEL brought out its most prominent feature, namely its extremely flattened shape and the existence of a plane of symmetry coinciding with the plane of the Milky Way. After an interruption of about 100 years HERSCHEL's work was again taken up, with enormously increased observational material, by SEELIGER, KAPTEYN, SCHWARZSCHILD, and others. The main difficulty in the determination of the spacial distribution of the stars lies in the fact of the existence of interstellar absorbing material, which renders the inverse-square law of decrease of the apparent intensity of a light-source inapplicable in all obscured regions. The model obtained by KAPTEYN for the structure of the Galactic System on the assumption of practically complete transparency of interstellar space cannot therefore any longer be considered as an adequate representation of the actual form of this system. The study of the dynamical conditions prevailing in the Galaxy, likewise started by HERSCHEL by the discovery of the sun's motion towards an apex, situated in the constellation of Hercules, was continued by the above-named astronomers and led in the first years of the present century to the discovery by KAPTEYN of a preferential direction for stellar motions, now called the direction of the vertices, and interpreted by KAPTEYN and EDDINGTON as the direction of relative motion of two star-streams, permeating each other in the space occupied by the stars of our immediate surrounding. An alternative explanation of the phenomenon of "star

<sup>1</sup> E. V. D. PAHLEN, *Exper.* 1, 39 (1945), Abb. 2, Fig. SBe.

<sup>2</sup> S. CHANDRASEKHAR, *Astrophys. J.* 92, 441 (1940).

streaming" was given by SCHWARZSCHILD who proposed to substitute to the Maxwellian distribution of the stars' velocities, adopted by EDDINGTON for the two hypothetical streams, a single law of distribution corresponding to a slightly altered Maxwellian law in which the spherical surfaces of equal frequency are replaced by spheroids. The rotation-axis of this spheroid, obtained by SCHWARZSCHILD and others from an analysis of proper motions and radial velocities, was found to be its longest axis, and its direction to coincide very closely with the vertices deduced by EDDINGTON from his "two-stream" theory. The next important step in the study of the structure of the Galactic System was achieved by SHAPLEY who applied his method of determining the distances of very distant star-clusters by the study of the Cepheid variables contained in them, to the system of the 96 globular clusters, forming in a sense the skeleton of our stellar system. SHAPLEY was able to show that the position of our sun in this extended Galactic System was by no means central as had hitherto generally been supposed, but completely ex-centric, the sun being separated from the "Galactic Centre", situated in the direction of the constellation of Sagittarius, by a distance of over 10,000 parsec (30,000 light-years). The existence of a very distant Galactic Centre was further confirmed by the systematic variation of the mean radial velocities and proper motions of the stars along the Galactic Equator, studied by OORT and explained by him as the result of a general rotation of the whole stellar system round an axis passing through the Galactic Centre, but with velocities decreasing with the distance of the stars from this rotation-axis. Two more peculiarities of the dynamical state of the Galaxy, discovered in the course of the present century, tend to confirm the "Galactic Rotation Theory" proposed and developed by OORT and LINDBLAD. These are: (1) the very great velocity of the sun with respect to the globular clusters whose radial velocities have been determined (about 300 km/sec in a direction roughly perpendicular to the direction of the Galactic Centre), and (2) the complete asymmetry in the distribution of the directions

of motion of the stars whose space velocities with respect to the sun exceed 60 km/sec. All these stars of greatest observed speed move in the opposite direction to that of the sun's motion and are therefore evidently field-stars which do not participate in the rapid motion of the sun and the major part of the stars forming its immediate surrounding, but are left behind by this quickly moving group in the course of its rotational motion around the Galactic Axis. In trying to give a general picture of the structure of our Galaxy we see that the frame of this picture must necessarily be given by the spacial distribution of the globular star-clusters, but that vast regions within this general frame must as yet remain a blank. The distribution of the open or "galactic" clusters studied by R. J. TRÜMPER permits us to a certain extent to bridge the gap separating the sun from the Galactic Centre, but all objects situated beyond this centre remain to the present day completely inaccessible to the optical means at our disposal. It is natural under these circumstances to turn to the numerous extragalactic nebulae which have lately unquestionably been proved to be external star systems not dissimilar on the whole to our own, and among which the spiral form seems to play a very conspicuous part. There has accordingly been no lack of attempts to interpret the spacial distribution of the great star-clouds forming the Milky Way proper as the whorls of a spiral arm originating in the Galactic Centre, and the latest as yet only partly published results of W. BAADÉ, obtained with the 100-inch reflector of the Mount Wilson observatory seem to indicate, that our stellar system may very well be conceived as a spiral nebula of the particular type known as "barred" spirals, though we cannot as yet be quite sure of the validity of this conclusion. The question of the structure of our Galaxy is moreover complicated by the fact that it apparently is not a completely isolated formation as had till recently been supposed, but forms a part of a local cluster of at least ten galaxies, to which the two Magellanic Clouds and the great spiral nebulae *M 31 Andromedae* and *M 33 Trianguli* likewise belong.

## Brèves communications - Kurze Mitteilungen Brevi comunicazioni - Brief reports

Les auteurs sont seuls responsables des opinions exprimées dans ces communications. - Für die kurzen Mitteilungen ist ausschließlich der Autor verantwortlich. - Per le brevi comunicazioni è responsabile solo l'autore. - The editors do not hold themselves responsible for the opinions expressed by their correspondents.

### Synthesis of Symmetrically Labeled Acetic Acid from BaCO<sub>3</sub>

Acetic acid in which a labeling carbon isotope is distributed uniformly between the methyl and carboxyl groups is a useful compound as a tracer in metabolic experiments and in the synthesis of other metabolites. This report presents a simple method of synthesis on a small scale and in high yield. Since C<sup>13</sup> and C<sup>14</sup> are usually obtained as BaCO<sub>3</sub>, the latter was taken as the starting material, and the synthesis consisted essentially of three

steps: (1) reduction of BaCO<sub>3</sub> to BaC<sub>2</sub>; (2) conversion of BaC<sub>2</sub> to acetylene; and (3) treatment of acetylene with KOH to form potassium acetate. Overall yields ranged from 60 to 80% when working on a 1-millimole scale.

**Formation of BaC<sub>2</sub>.** The reduction of BaCO<sub>3</sub> to BaC<sub>2</sub> by heating with Mg in an atmosphere of H<sub>2</sub> was first reported by MAQUENNE<sup>1</sup> in 1893, and has recently been used by CRAMER and KISTIAKOWSKY<sup>2</sup> for the synthesis

<sup>1</sup> L. MAQUENNE, *Ann. Chim. phys.* 28, 261 (1893).

<sup>2</sup> R. D. CRAMER and G. B. KISTIAKOWSKY, *J. biol. Chem.* 137, 549 (1941).