universität innsbruck
Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Die Kultur der Gegenwart

ihre Entwicklung und ihre Ziele

Astronomie

Hartmann, J.

1921

Das Sternensystem. Von H. Kobold

urn:nbn:at:at-ubi:2-5970

DAS STERNSYSTEM.

Von

H. Kobold.

I. Entwicklung der Kenntnis von den Entfernungen und Bewegungen der Fixsterne. Während die Astrophysik ihre Hauptaufgabe in der Erforschung der im vorigen Kapitel besprochenen physikalischen Verhältnisse der fernen Weltkörper erblickt, besteht das Ziel der älteren Astronomie, der Astrometrie, in der fortgesetzten Erweiterung unserer Kenntnisse über den Bau des Universums und die Bewegungen, die in ihm herrschen und seine Wandlungen bestimmen. Der exakten Forschung war bis in die jüngste Zeit der Weg zu diesem Ziele verschlossen, es fehlten Hilfsmittel, die den Schwierigkeiten der Aufgabe gewachsen gewesen wären. Aber der vollen Größe dieser Schwierigkeiten ward man sich doch erst bewußt im Laufe der zur Ergründung des Zusammenhanges der Erscheinungen am gestirnten Himmel ausgeführten Forschungen. Die Unveränderlichkeit der scheinbaren Stellung der Sterne, die man in der Bezeichnung Fixsterne zum Ausdruck brachte, rief die Überzeugung von der Ruhe der Erde wach. Bei endlicher Entfernung der Sterne muß jede Ortsänderung des Beobachters eine scheinbare Änderung des Ortes eines Gestirns hervorrufen. Bei den Körpern unseres Sonnensystems genügt schon die auf der Erdoberfläche mögliche Ortsänderung des Beobachters, um eine erkennbare Wirkung im scheinbaren Orte hervorzurufen. Daß aber die Entfernung der Fixsterne viel zu groß sei, um sie durch den Halbmesser der Erdkugel zu messen, lehrte schon Aristarch (150 v. Chr.). Eine der Wirklichkeit auch nur annähernd entsprechende Vorstellung von der wahren Entfernung der Fixsterne konnte man sich trotzdem nicht machen, und so schloß man aus der scheinbaren Ruhe der Sterne auf die Ruhe der Erde im Raume. Als dann die Lehre des Kopernikus der Erde die Unbeweglichkeit absprach und sie in einem ungeheuren Kreise, beständig sich um ihre Achse drehend, um die Sonne sich bewegen ließ, da bildete der Mangel eines Ausdrucks dieser Bewegung im Orte der Fixsterne den gefährlichsten Stein des Anstoßes und rief, als es allen Bemühungen der schon wesentlich verfeinerten Beobachtungskunst zum Trotz nicht gelang, den Nachweis solcher Bewegungen zu erbringen, den nur durch das Fehlen einer annähernd richtigen Vorstellung von der Entfernung der Sterne verständlichen Gedanken des Tychonischen Systems

Ziel der messenden Astronomie.

Schwierigkeit der Entfernungsmessung bei den Fixsternen.

der die ruhende Erde umkreisenden und die Planeten mit sich führenden Sonne hervor. Doch die siegende Kraft der Wahrheit, die dem Gedanken des Kopernikanischen Systems innewohnte, überwand auch diese Schwierigkeiten. Wie man sich, bezwungen durch die logische Klarheit des Aufbaues des Systems und durch die Macht der Tatsachen, daran gewöhnt hatte, unsere Erde der bevorzugten Stellung zu entkleiden und zu einem Gliede von recht untergeordneter Bedeutung in dem großen Ganzen werden zu lassen, so drang auch bald die Überzeugung durch, daß die ungeheure Bahn, die die Erde im Laufe eines Jahres durchmißt, doch nur verschwindend klein sei gegenüber der Entfernung der Sterne, daß die die Bewegung der Erde abspiegelnde scheinbare Bewegung der Sterne zwar vorhanden, aber nur durch die allerfeinsten Messungen nachweisbar sei. So wurde dann für die folgenden Jahrhunderte das Streben, scheinbare Bewegungen der Fixsterne nachzuweisen, eine mächtige Triebfeder zur steten Vervollkommnung der Instrumente und der Beobachtungsmethoden, und auch heute noch wirkt die Schwierigkeit der Aufgabe, wenn es auch seit der Mitte des 19. Jahrhunderts möglich geworden ist, in günstigen Fällen sie zu besiegen, in der gleichen Richtung.

Entwicklung der Genauigkeit der Messung.

Als im Zeitalter des Kopernikus die heutige Astronomie ins Leben gerufen ward, war es Tycho Brahe, dem größten praktischen Astronomen seiner Zeit, höchstens möglich, in einer einzelnen Ortsbestimmung eines Sternes eine Genauigkeit von etwa 3′ zu erzielen, und es mußten ihm daher die im scheinbaren Orte der Sterne durch die Erdbewegung hervorgerufenen Änderungen verborgen bleiben, wenn die Entfernung der Fixsterne wenigstens das Tausendfache des Erdbahnradius betrug. Mit der Einführung des Fernrohres steigerte sich die Genauigkeit der Ortsbestimmungen sehr erheblich, und für Flamsteeds Beobachtungen (1676—1717) hatte die Bogensekunde schon reelle Bedeutung. Die eigentliche Entwicklung der neueren Beobachtungskunst beginnt mit dem Wirken Bradleys (1721—1762). Die von diesem unvergleichlichen Beobachter erreichte, erst im 19. Jahrhundert wieder übertroffene Genauigkeit der Beobachtungen reichte zur Lösung der Aufgabe aber auch noch nicht aus, sie vermochte vielmehr nur die Schwierigkeit der Aufgabe erneut in helles Licht zu setzen dadurch, daß es Bradley zwar im Jahre 1728 gelang, in seinen Beobachtungen des Sternes γ Draconis eine jährliche periodische Anderung nachzuweisen, die in der Tat gedeutet werden konnte als ein Bild der Erdbahn, die aber, wie Bradley selbst erkannte, nicht mit einer meßbaren Entfernung des Sternes in Zusammenhang gesetzt werden konnte, sondern sich als eine Folge der endlichen Geschwindigkeit des Lichtes herausstellte. Bradleys Entdeckung der „Aberration“ führte die beobachtende Astronomie um einen großen, für die Bestimmung der Fixsternentfernungen unerläßlichen Schritt weiter, aber die Wirkung dieser Entfernung ist im günstigsten Falle nur der 25. Teil der von Bradley enthüllten Bewegung, sie besteht nur in einer geringfügigen Änderung der Gestalt der Bahn, die der scheinbare Sternort infolge der Aberration beschreibt. Erst

durch eine weitere erhebliche Steigerung der Genauigkeit der Beobachtungen ist es in neuester Zeit möglich geworden, für besonders geeignete und verhältnismäßig nahe Sterne im scheinbaren Ort wirkliche aus der endlichen Entfernung hervorgehende Abweichungen nachzuweisen.

Fehlerursachen bei den Beobachtungen.

Der beobachtete scheinbare, auf bestimmte feste Richtungen im Raume bezogene Ort eines Gestirnes wird nicht allein durch die zufälligen Beobachtungsfehler entstellt; er wird beeinflußt durch die Fehler in der Annahme der zur Reduktion auf feste Richtungen im Raume nötigen Größen, und es gehen weiter in ihn ein die den augenblicklichen Zustand des Instrumentes und der umgebenden Luft bedingenden Verhältnisse. Die Fortschritte der Technik und die zunehmende Erfahrung führten zwar eine stetige Verkleinerung des reinen Beobachtungsfehlers herbei, sie ermöglichten auch eine vollkommenere Elimination der übrigen die Beobachtungen entstellenden Einflüsse, aber es war doch nicht möglich, diese störenden, zum Teil gar nicht zu umgehenden Einflüsse in demselben Maße herabzusetzen wie den zufälligen Beobachtungsfehler. Unter den Ursachen dieser Fehlerquellen nimmt nun die Wärme einen hervorragenden Platz ein, und es müssen deshalb diese Fehler für die Entfernungsbestimmungen aus einer scheinbaren Ortsänderung, die ebenso wie die Wärme an eine jährliche Periode gebunden ist, eine besonders verderbliche Rolle spielen.

Relative Messung.

Wirksame Hilfe brachte in dieser Beziehung erst ein schon von Galilei verfolgter Gedanke, der auf die Bestimmung der Differenz der Wirkung der Entfernung bei zwei am Himmel nahe beieinander stehenden Sternen hinausläuft. Aus dieser Differenz fallen ja alle vom Zustande des Instrumentes, von den Beobachtungsbedingungen und von der Kenntnis der Reduktionselemente abhängigen Fehler heraus, sie hängt im wesentlichen nur ab vom reinen Beobachtungsfehler, und die Sicherheit ihrer Bestimmung wächst demnach in direktem Verhältnisse mit der Vervollkommnung der Meßinstrumente. Angewandt auf zwei Sterne, deren einer in endlicher Entfernung steht und die Bewegung der Erde widerspiegelt, während der andere in so sehr viel größerer Entfernung sich befindet, daß eine Bewegung des Beobachters um eine dem Durchmesser der Erdbahn gleiche Entfernung eine meßbare Ortsänderung des Sternes nicht bewirkt, mußte diese Methode zum Ziele führen, sobald die Genauigkeit der mikrometrischen Messung eine genügende war. Dies war allerdings zu Galileis Zeit noch nicht der Fall. Als aber gegen Ende des 18. Jahrhunderts der Galileische Gedanke wieder aufgenommen wurde, erwies er sich bald als fruchtbar. Galilei fand mit dem neuen Hilfsmittel, dem Fernrohr, daß viele der hellen Sterne schwache Begleiter hatten. Er dachte nun, daß diese so verschieden hellen Sterne vermutlich in sehr verschiedener Entfernung stehen würden und deshalb eine relative Bewegung infolge der Bewegung der Erde zeigen müßten. Die späteren Beobachtungen deckten in der Tat solche relativen Bewegungen bei vielen dieser Sternpaare auf, diese Bewegungen hatten aber nicht die charakteristischen Eigenschaften, die sie als Spiegelbild der Erdbewegung

kennzeichneten, sie waren vielmehr eine Folge einer physischen Verbindung zwischen den beiden Komponenten des Sternpaares. Diese zweite wichtige Entdeckung, die das Streben, die Aufgabe zu lösen, zeitigte, erbrachte den vollgültigen Beweis, daß der eingeschlagene Weg zur Aufdeckung geringer relativer Bewegungen durchaus geeignet sei und daß es nur notwendig sei, zwei Sterne miteinander zu vergleichen, die nicht physisch verbunden sind. Die Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins eines physischen Zusammenhanges nimmt nun aber sehr schnell ab mit wachsendem gegenseitigem Abstand der Sterne. Wählt man also für den auf Entfernung zu untersuchenden Stern als Vergleichsstern einen oder, um die Sicherheit des Resultates noch mehr zu erhöhen, mehrere schwache Sterne in etwas größerem, aber immer noch mikrometrisch mit ausreichender Sicherheit meßbarem Abstande, so wird sich die verschiedene Entfernung in Änderungen dieser Abstände verraten, die einer jährlichen Periode unterworfen sind. Dieses ist der Weg, der zur Bestimmung der Entfernung der Fixsterne seit Anfang des 19. Jahrhunderts eingeschlagen wird und auf dem wir zu unserer jetzigen Kenntnis über die räumliche Ausdehnung der Fixsternwelt gelangt sind.

Eigenbewegung der Fixsterne.

Im Lichte dieser den tatsächlichen Verhältnissen entsprechenden Vorstellung von der Entfernung der Sterne gewinnt nun die Bezeichnung derselben als Fixsterne einen ganz wesentlich geänderten Inhalt. Eine der Größe nach der Bewegung der Erde in ihrer Bahn gleiche fortschreitende Ortsänderung eines Sternes im Raume würde sich für uns im günstigsten Falle, wenn sie senkrecht zur Visierrichtung erfolgt, im scheinbaren Orte des Sternes ebenso zu erkennen geben wie die jährliche Bewegung der Erde, d. h. sie wäre nur auf mikrometrischem Wege mit den allerfeinsten Hilfsmitteln nachweisbar. Sollte sie dem freien Auge erkennbar werden, so müssen wir die Zeitdifferenz der miteinander verglichenen Positionen des Sternes entsprechend vergrößern. Dies ward durch die Beobachtung bald bestätigt. Halley fand 1718, daß die von ihm beobachteten Sternpositionen von den etwa 2000 Jahre zurückliegenden, von Hipparch beobachteten und von Ptolemäus uns überlieferten nach Berücksichtigung der gesetzmäßigen Änderungen der Fundamentalebenen in vielen Fällen sich um Beträge unterschieden, die auch dem freien Auge nicht entgehen konnten. Die größten Ortsänderungen fand er bei Arcturus (α Bootis), dessen Ortsänderung in 2000 Jahren $1^1/_4$ Grad, also $2^1/_2$ Monddurchmesser, beträgt. Sirius und Procyon änderten in derselben Zeit ihren Ort um etwa $1^1/_2$ Monddurchmesser. Halley konnte seine Untersuchungen nur auf die hellen Sterne ausdehnen und wegen der Unsicherheit der Grundlagen nur ungewöhnlich große Bewegungen nachweisen. In den seitdem verflossenen zwei Jahrhunderten ist es aber gelungen, unsere Kenntnis dieser Ortsänderungen der Sterne, die wir Eigenbewegung nennen, außerordentlich zu vervollständigen, da die größere Genauigkeit der Beobachtungen die Kürze der Zwischenzeit ausglich. Wir kennen jetzt die Eigenbewegung für mehrere tausend Sterne. Die Beobachtungen ergeben uns diese Bewegungen ausgedrückt in Bogen-

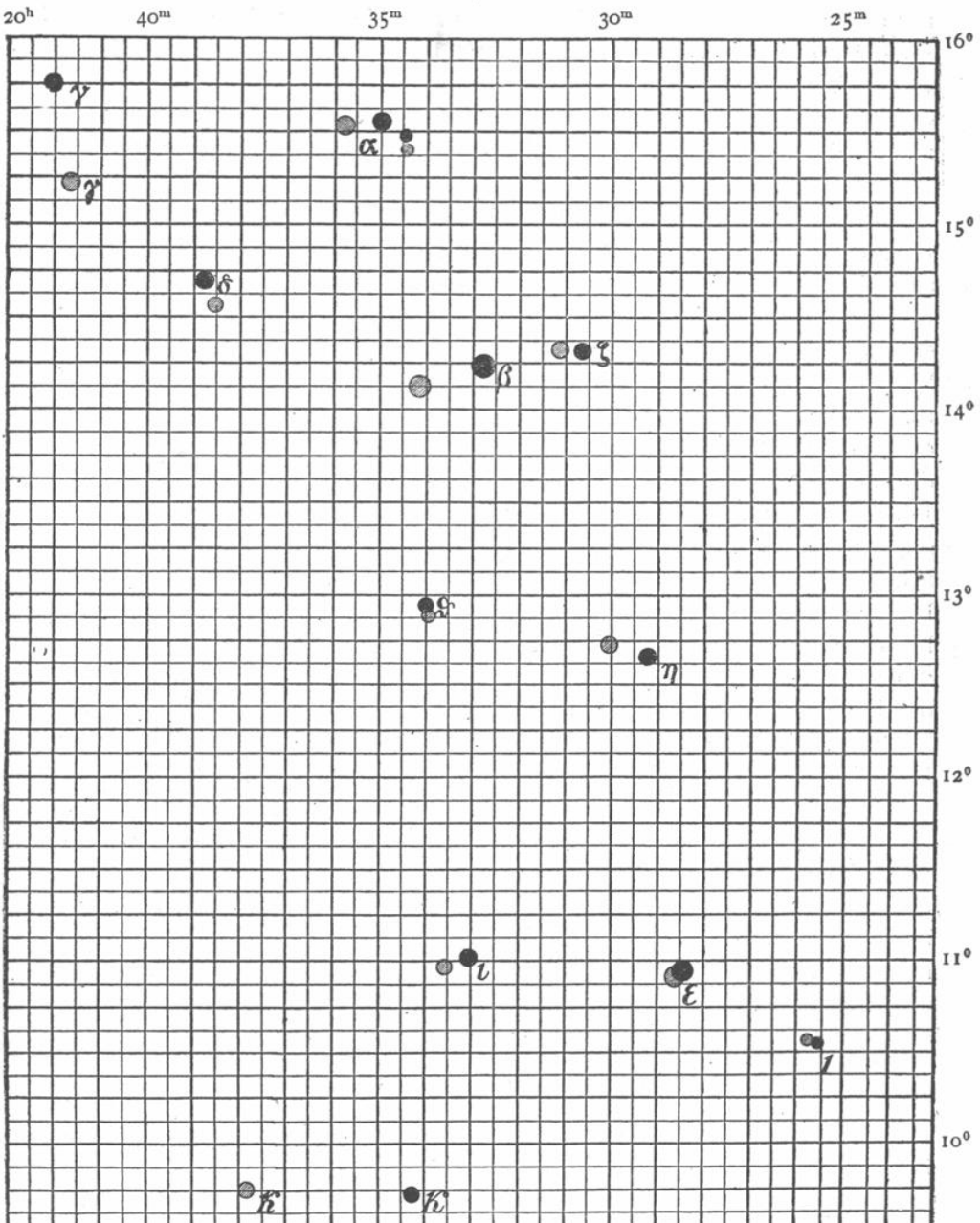

Fig. 35. Sternbild Delphin. Schwarz: Stellung der Sterne um 1900, schraffiert: Stellung der Sterne nach 10000 Jahren.

maß, da es ja Richtungsänderungen sind. Für Sterne bekannter Entfernung kennen wir aber dann auch den linearen Betrag dieser Bewegung, soweit sie senkrecht zur Visierrichtung erfolgt. Die Spektralanalyse hat gegen Ende des vorigen Jahrhunderts eine wichtige Ergänzung dieser Kenntnis dadurch bewirkt, daß sie uns lehrte, auch die Bewegungen der Himmelskörper in der Richtung der Verbindungslinie unseres Auges mit denselben, des Visions-

radius, zu messen. Diese zweite Komponente der Bewegung im Raume, die Radialbewegung, kennen wir zur Zeit für etwa 2000 Sterne, und unsere Kenntnis erweitert sich in dieser Richtung in schneller Folge. Für diejenigen Sterne, für die wir sowohl die Entfernung als auch die beiden Komponenten der Bewegung kennen, können wir schließlich die wirkliche totale Bewegung im Raume berechnen.

Radialbewegungen.

Im Verlauf hinreichend langer Zeiträume müssen die seitlichen Bewegungen den Anblick des gestirnten Himmels merklich verändern. Fig. 35 stellt das Sternbild des Delphins dar, wie es uns jetzt erscheint, und in anderer Darstellung dasselbe Sternbild, wie es sich nach 10000 Jahren den Blicken der Erdenbewohner darbieten wird, und die Vergleichung bringt die Wirkung der Eigenbewegung in diesem Falle deutlich zur Anschauung. Während es für das freie Auge eines Zeitraums von Tausenden von Jahren bedarf, um die Wirkung der Eigenbewegungen merklich zu machen, gestattet die photographische Platte eine Einengung des Zwischenraumes auf wenige Jahre. Um bei einer Vergleichung zweier Aufnahmen derselben Himmelsgegend die bewegten Sterne zu erkennen, bedient man sich am besten des Stereokomparators. Man berichtigt die Lage der beiden Platten so, daß die Bilder der schwachen Sterne des Hintergrundes sich decken, dann fallen die bewegten Sterne sofort dadurch ins Auge, daß sie scheinbar in einer anderen Ebene liegen als der allgemeine Hintergrund, und durch Ausmessung der beiden Platten erhält man dann die Bewegungen gegen die Sterne des Hintergrundes. Auf diesem Wege haben besonders Wolf in Heidelberg und Innes in Johannesburg in jüngster Zeit ein großes Material von Bewegungen gesammelt.

Eine der größten uns bekannten Eigenbewegungen kommt einem schwachen, im Sternbilde Pictor der südlichen Halbkugel stehenden und zu den uns nächsten gehörenden Sterne zu. Seine Entfernung beträgt 660000 Erdbahnhalbmesser, seine jährliche Eigenbewegung 8″.72 oder linear 27.9 Erdbahnhalbmesser, entsprechend einer Bewegung senkrecht zum Visionsradius von 132 km in der Sekunde. Für die Bewegung in der Richtung des Visionsradius fand Curtis den Wert + 242 km in der Sekunde, sodaß der Abstand des Sternes von der Sonne in einem Jahre um 51.2 Erdbahnradien wachsen würde. Vermöge dieser Bewegung wird der Stern nach Verlauf von 12900 Jahren eine doppelt so große Entfernung haben als jetzt, seine Helligkeit wird auf den vierten Teil gesunken sein.

II. Sternkataloge. Die Aufdeckung von Gesetzmäßigkeiten in diesen Änderungen des Ortes und der Entfernung der Fixsterne müßte eine wichtige Handhabe darbieten zur Erforschung des Sternsystems. Auf die Herbeischaffung dieser Grundlagen hat man — wenn auch aus anderen Gründen — schon in den frühesten Zeiten großes Gewicht gelegt und begonnen, Verzeichnisse der Örter der Sterne am Himmel, Sternkataloge, anzufertigen. Über die älteren Verzeichnisse dieser Art ist schon an einer früheren Stelle

Anlegung von Sternverzeichnissen.

(S. 147) gesprochen worden. Erst die Einführung des Fernrohres in die praktische Astronomie gab aber den Beobachtungen diejenige Genauigkeit, die sie für den hier verfolgten Zweck tauglich machte, und so kann denn der auf Flamsteeds im letzten Viertel des 17. Jahrhunderts in Greenwich erhaltenen Beobachtungen beruhende Katalog als der Ausgangspunkt der langen Reihe der Verzeichnisse betrachtet werden, in denen die moderne Astronomie die Grundlagen der genauen Kenntnis des Fixsternhimmels in stetiger Arbeit sammelt. Auf der Sternwarte zu Greenwich, der bei ihrer Gründung die genaue Beobachtung der Fixsternörter zur Sicherung der Schiffahrt als Hauptaufgabe gestellt war, wurden dann in der Mitte des 18. Jahrhunderts durch Bradley und seine Gehilfen auch die Beobachtungen angestellt, die durch Bessels sorgfältige Bearbeitung in den „Fundamenta Astronomiae" (1818) für die praktische Astronomie unserer Zeit von grundlegender Bedeutung geworden sind.

Die Aufgabe der Katalogisierung der Sterne trennt man in der Praxis in zwei Teile. Man bestimmt einerseits die Positionen einer größeren Anzahl möglichst gleichmäßig über den ganzen Himmel verteilter Sterne, der „Fundamentalsterne", so genau wie irgend möglich durch unabhängige Beobachtungen und benutzt dann für den zweiten Teil der Aufgabe diese Fundamentalsterne, um die große Masse der übrigen Sterne durch Anschließen an dieselben festzulegen. Die Bestimmung der Fixsternörter erfolgt jetzt ausschließlich im System der Rektaszension und Deklination, während früher, noch bis zu Tychos Zeit, das System der Länge und Breite in Gebrauch war. **Fundamentalsterne.**

Die Bestimmung der Rektaszension erfolgt durch die Beobachtung der Uhrzeit der Durchgänge der Gestirne durch den Meridian, die der Deklination durch Messung ihrer Zenitdistanzen im Augenblick der Kulmination. Die Rektaszension ist die Differenz der Kulminationszeiten des Gestirnes und des Frühlingspunktes, des Anfangspunktes der Zählung der Rektaszensionen.

Ist die Polhöhe des Beobachtungsortes bekannt (vgl. darüber das Kapitel Astronomische Ortsbestimmung), so erfordert die absolute Bestimmung der Deklination der Fundamentalsterne nur noch die Befreiung der beobachteten Meridianzenitdistanzen vom Einflusse der Strahlenbrechung in der Erdatmosphäre, der Refraktion, und vom Einflusse der dem Instrumente anhaftenden Fehler. Die physikalische Theorie der Refraktion ergibt sich aus den Brechungsgesetzen des Lichtes und aus auf Beobachtungen gestützten Annahmen über die Konstitution der Erdatmosphäre. Die Refraktion, die die Zenitdistanzen aller Gestirne zu klein erscheinen läßt, ist abhängig von der Zenitdistanz des Gestirnes und außerdem von der Temperatur, dem Druck und der Feuchtigkeit der das Instrument umgebenden Luft. Die Konstante des Hauptgliedes der Refraktion, die sogenannte Refraktionskonstante, ist aus den beobachteten Zenitdistanzen selbst durch Kombination der bei oberer und der bei unterer Kulmination beobachteten Werte zu bestimmen. Die erste unter Zugrundelegung einer ausreichenden Theorie ausgeführte **Absolute Deklination.** **Refraktion.**

Bestimmung dieser Konstante verdanken wir Bessel. Die Feststellung ihres wahren Wertes wird wesentlich erschwert durch die Schwierigkeiten, die sich der Ermittlung der wahren Temperatur der Luft in der Umgebung des Instrumentes entgegenstellen, und die neueren Versuche, zu einem der Wahrheit noch näher kommenden Werte der Konstanten zu gelangen, zielen vor allem darauf hinaus, diese Fehlerquelle unschädlich zu machen. Die den mittleren Werten von Temperatur und Luftdruck entsprechende Refraktion, die „mittlere Refraktion", hat folgende Beträge:

Zenitdistanz	Refraktion
90°	34′ 54″
85°	9 46
80°	5 16.2
70°	2 37.3
45°	0 57.7
0°	0.0.

Schwierigkeiten für die Bestimmung der Konstante der Refraktion ergeben sich auch aus der durch die Dispersion der Luft hervorgerufenen Abhängigkeit des Brechungsexponenten der Luft, und damit der Refraktion, von der Wellenlänge der Lichtstrahlen. Die Farbe der Sterne und die Extinktion der Atmosphäre auf die in großer Zenitdistanz in ein Spektrum ausgezogenen Bilder der Sterne sind für die Refraktion von erheblichem, noch nicht hinreichend festgestelltem Einflusse. Anomale Verhältnisse in der Schichtung der Luft rufen auch anomale Refraktionen hervor, die sich der Berechnung entziehen. Die Temperaturdifferenz der äußeren Luft und der Luft im Beobachtungssaale sowie die durch die äußere Form des Beobachtungssaales, durch Ausstrahlung der Wände oder anderer Wärmequellen hervorgerufene unregelmäßige Schichtung der Luft im Beobachtungssaale geben am leichtesten Anlaß zu Refraktionsstörungen, und ihre Vermeidung oder möglichste Einschränkung ist ein wesentliches Erfordernis für die Erzielung guter Beobachtungen der Zenitdistanzen.

Von den dem Instrumente anhaftenden Fehlern, der Biegung, den Teilfehlern des Kreises, wird im vorletzten Abschnitt gesprochen werden.

Absolute Rektaszensionen.

Die Bestimmung absoluter Rektaszensionen erfordert die Kombination von Meridiandurchgangszeiten der Sterne und der Sonne. Für jeden Punkt der Ekliptik ergibt sich aus dem rechtwinkligen sphärischen Dreiecke, das durch seinen Deklinationskreis und durch die größten Kreise der Ekliptik und des Äquators gebildet wird, zu seiner Deklination unmittelbar seine Rektaszension, sobald wir den Winkel zwischen Ekliptik und Äquator, die Schiefe der Ekliptik, als bekannt voraussetzen. Die Schiefe wird ebenfalls am Meridiankreise bestimmt aus Beobachtungen der in der Ekliptik sich bewegenden Sonne zur Zeit der Solstitien, d. h. in der größten nördlichen und südlichen Deklination. Beobachten wir also beim Meridiandurchgange der Sonne ihre Deklination in derselben Weise wie die der Sterne, so finden wir durch Rechnung unter Berücksichtigung der 1″ nicht übersteigenden, gleichfalls bekannten Breite der Sonne direkt ihre Rektaszension. Die Be-

stimmung wird um so sicherer, je schneller die Deklination der Sonne sich ändert. Wir werden solche Beobachtungen also mit Vorteil nur ausführen, wenn die Sonne in der Nähe der Äquinoktialpunkte steht, d. h. um den 21. März und 22. September. Zu diesen Zeiten angestellte Deklinationsbeobachtungen der Sonne geben in Verbindung mit den gleichzeitigen Differenzen der Durchgangszeiten, d. h. der Rektaszensionen, der Sonne und eines Sternes die Rektaszension dieses Sternes. Der Fehler in der ermittelten Rektaszension des Sternes setzt sich zusammen aus dem Fehler der beobachteten Deklination der Sonne und demjenigen der Differenz der Durchgangszeiten, und da diese letztere mit Hilfe der Uhr bestimmt wird, so ist in erster Linie eine gute und vor allem eine von einer täglichen Periode im Uhrgange freie Uhr notwendig, und man wird sich zweckmäßig auf nicht zu weit von der Sonne entfernte helle Sterne beschränken, die auch bei Tage beobachtet werden können. Bessel wandte bei der Bearbeitung der Bradleyschen Beobachtungen dieses Verfahren der Bestimmung absoluter Rektaszensionen auf 14 Sterne an. Maskelyne, Bradleys Nachfolger in Greenwich, benutzte ein System von 36 Fundamentalsternen, das bis über die Mitte des 19. Jahrhunderts hinaus allgemein angewandt wurde.

Fundamentalsysteme.

Allmählich gewann aber eine andere, auf einer Zerlegung in zwei Teile beruhende Behandlung der Aufgabe die Oberhand. Man gleicht zunächst das System der Fundamentalsterne in sich aus durch Beobachtung der Rektaszensionsdifferenzen der Sterne und bestimmt dann durch Sonnenbeobachtungen die noch erforderliche Korrektion des Nullpunktes des Systems. Dabei kann der erste Teil der Aufgabe, der an die Ausrüstung geringere Forderungen stellt, an einer größeren Zahl von Sternwarten durchgeführt werden, während der zweite Teil, der besondere Vorrichtungen für die Sonnenbeobachtungen und besonders solche zur Kontrolle der Änderungen des Instrumentes erfordert, den entsprechend ausgerüsteten Sternwarten überlassen wird. Die weitere rechnerische Bearbeitung der so gewonnenen Koordinaten der Fundamentalsterne, die in der Zusammenfassung, der Untersuchung auf systematische Unterschiede und der Ausgleichung besteht, führt dann zu einem sogenannten Fundamentalsystem, wie sie durch Auwers, Newcomb und Boss aufgestellt worden sind. Von diesen Systemen umfaßt das Auwerssche 925, das Bosssche 1059 Sterne, während das Newcombsche eine wesentlich größere Zahl, 1596, mitnimmt, unter denen aber sehr viele sind, deren Örter zur Zeit noch nicht so weit gesichert sind, daß sie als Fundamentalsterne benutzt werden könnten. Die Hauptmasse der Sterne ist in allen drei Fundamentalkatalogen identisch.

Für die Ortsbestimmung und Katalogisierung der großen Menge der übrigen Sterne, soweit dieselben in den in ihren Dimensionen an ziemlich enge Grenzen gebundenen Meridianinstrumenten noch sicher beobachtbar sind, gelten nun diese Fundamentalsterne als Fixpunkte, deren Koordinaten innerhalb der Grenzen der ihnen innewohnenden Genauigkeit und der Beobachtungsfehler dargestellt werden müssen und so zur Kenntnis der Koordi-

naten der mit ihnen verglichenen Sterne führen. Von der Mitte des 18. bis zum Ende des 19. Jahrhunderts liegen etwa 350 solcher Sternkataloge vor. Die Akademie der Wissenschaften in Berlin hat es unternommen, alle diese Kataloge zu sichten, zu vergleichen und zu einem sie alle umfassenden Kataloge, der „Geschichte des Fixsternhimmels", zu verarbeiten, der mehr als 1 Million sich auf mehr als 250 000 Objekte verteilende Positionen enthalten wird.

Präzession und Nutation.

Die Beobachtungen bestimmen unmittelbar den Ort der Gestirne in bezug auf die augenblickliche Lage des Äquators und der Ekliptik. Beide Ebenen sind langsamen Bewegungen unterworfen, durch die sich die Lage der Achsen des Koordinatensystems ändert. Diese Bewegungen der Präzession der Nachtgleichen und der Nutation der Erdachse sind schon an einer früheren Stelle (S. 109) eingehend besprochen worden. Man würde sie theoretisch vollständig berechnen können, wenn man die Kenntnis der Massenverteilung im Erdinnern voraussetzen dürfte, muß aber, da jene Voraussetzung nicht erfüllt ist, das Hauptglied aus den Beobachtungen selbst bestimmen. Hieraus folgt, daß grundlegende Untersuchungen über die Eigenbewegungen der Fixsterne stets unzertrennlich mit einer Bestimmung der Präzession verbunden sind. Die um 1900 durch die Präzession bewirkte jährliche rückläufige Bewegung des Frühlingspunktes in der Ekliptik beträgt etwa 50″.2, und die Schiefe der Ekliptik nimmt im Jahrhundert um etwa 47″ ab. Die Nutation bewirkt eine Bewegung des Poles in einer Ellipse mit den Achsen 9″.4 und 6″.9 sowie andere kleinere Schwankungen.

Zu diesen durch die Gestalt des Erdkörpers bedingten Bewegungen der Rotationsachse kommt schließlich noch die Seite 170 besprochene Polhöhenschwankung hinzu.

Durch Berechnung der aus diesen Bewegungen hervorgehenden Änderung der Lage der Koordinatenachsen gegen die für den Anfang des betreffenden Jahres geltende Lage, wozu die astronomischen Jahrbücher die erforderlichen Hilfsmittel geben, und durch Berücksichtigung dieses Unterschiedes werden die beobachteten Örter der Sterne reduziert auf die für den Jahresanfang geltende Lage der Fundamentalebene und des Frühlingspunktes.

Neben den Änderungen der Lage der Fundamentalebene ist nun weiter noch die Bewegung des Koordinatenanfanges, der für jede einzelne Beobachtung im Auge des Beobachters anzunehmen ist, in Rechnung zu stellen. Dem Koordinatenanfangspunkte wohnen drei Bewegungen inne: die Rotation der Erde, die Bahnbewegung der Erde und die fortschreitende Bewegung des ganzen Sonnensystems. Der Winkel zwischen der aus dem Mittelpunkte der Bewegung gesehenen Richtung nach dem Gestirn und der scheinbaren Richtung heißt die Parallaxe (S. 202—208), und die drei Bewegungen rufen der Reihe nach die tägliche, die jährliche und die säkulare Parallaxe hervor, von denen für den scheinbaren Ort der Fixsterne nur die jährliche Parallaxe in Frage kommt, während die tägliche verschwindend klein ist und die säkulare eine konstante Änderung des Stern-

Parallaxe.

ortes erzeugt. Die jährliche Parallaxe spielt für die Entfernungsbestimmung der Sterne, die säkulare für die Bestimmung der Bewegung des Sonnensystems eine wesentliche Rolle; beide müssen in Verbindung mit diesen Problemen eingehender behandelt werden.

Außer der in der Parallaxe zum Ausdruck kommenden geometrischen Wirkung hat die Bewegung des Koordinatenanfangspunktes noch eine dynamische Wirkung. Wegen der endlichen Geschwindigkeit des Lichtes erscheint jedes Gestirn statt in der Richtung der das Auge mit ihm verbindenden Geraden in der Richtung der Diagonale eines Parallelogramms, das aus dem Wege, den das von dem Gestirne ausgehende Licht in der Zeiteinheit durchläuft, und dem Wege des Auges konstruiert wird. Das Gestirn erscheint dadurch in der Richtung der Bewegung des Beobachters um einen Winkel verschoben, der seinen Maximalwert annimmt, wenn die beiden Bewegungen in zueinander senkrechten Richtungen erfolgen. Diese Erscheinung wird als Aberration bezeichnet, und die drei oben genannten Bewegungen des Beobachters erzeugen eine tägliche, eine jährliche und eine säkulare Aberration, von denen die beiden ersten sich mit der Bewegung des Beobachters periodisch ändern, während die dritte konstant ist. Der Maximalbetrag der täglichen Aberration ist 0″.3, der der jährlichen 20″.5. Die jährliche Aberration würde einen im Pole der Ekliptik stehenden Stern stets um 20″.5 in der Richtung der Bewegung der Erde verschieben, der Stern würde nahezu einen Kreis mit 20″.5 als Halbmesser um seinen mittleren Ort beschreiben; dies war die von Bradley im Jahre 1728 entdeckte Erscheinung. Für alle übrigen Sterne geht der Aberrationskreis in eine Ellipse, für Sterne in der Ekliptik in eine gerade Linie über. Aberration.

Die Astronomischen Jahrbücher geben für jeden Tag des Jahres Hilfsgrößen an, mit denen man die dem Orte des Sternes entsprechenden Beträge der Präzession seit Anfang des Jahres, der Nutation und der Aberration berechnet. Durch Subtraktion dieser Beträge von den beobachteten scheinbaren Koordinaten der Sterne erhält man die gesuchten auf ein ruhendes System bezogenen mittleren Sternörter. Sollen die in einem längeren Zeitraum bestimmten Sternörter zu einem Kataloge vereinigt werden, so sind sämtliche Sternörter noch auf einen einzigen Jahresanfang zu übertragen durch Anbringung der Wirkung der Präzession.

III. Bestimmung der Fixsternentfernungen. Als Maß der Entfernung der Fixsterne dient die jährliche Parallaxe, der Winkel, unter welchem, vom Sterne aus gesehen, der Radius der Erdbahn, senkrecht gesehen, erscheint. Aus der Größe der Parallaxe folgt in dem rechtwinkligen Dreieck Sonne—Stern—Erde die Entfernung Sonne—Stern aus der bekannten Entfernung Sonne—Erde. Die Parallaxe, also die meßbare Entfernung eines Sterns, äußert sich darin, daß sein scheinbarer Ort an der Sphäre wegen der Bewegung der Erde um die Sonne im Laufe eines Jahres eine Ellipse durchläuft. Die Dimensionen der Ellipse hängen nur ab von der Entfernung des Parallaxenbestimmung.

Sternes, ihre Gestalt nur von der Stellung des Sternes in bezug auf die Ekliptik. Die Richtung der großen Achse der Ellipse fällt in den zu dem Sterne gehörenden Parallelkreis zur Ekliptik. Die kleine Achse verschwindet für Sterne in der Ekliptik, sie wächst mit dem Abstande der Sterne von der Ekliptik und wird am Pole der Ekliptik der großen Achse gleich.

Absolute Messungen.

Die Versuche, diese periodischen Änderungen der Koordinaten bei bestimmten Sternen durch die absoluten Ortsbestimmungen nachzuweisen und aus ihnen die „absolute" Parallaxe des betreffenden Sternes zu bestimmen, haben nur in wenigen Fällen zu verbürgten Werten geführt. Sie gelangen bei den uns besonders nahen Sternen α Centauri und Sirius, ferner beim Polarstern und anderen Sternen in der Nähe der Pole des Äquators, die einerseits durch die Größe der parallaktischen Ellipse, andererseits durch ihre langsame scheinbare Bewegung, die die Möglichkeit häufiger Einstellungen während des Durchganges durch das Gesichtsfeld des Fernrohres bietet, besonders geeignet sind. In der Anwendung auf nicht durch besonders günstige Stellung ausgezeichnete Sterne haben die in Pulkowa ausgeführten Beobachtungen der Fundamentalsterne zu Werten der Parallaxe mehrerer dieser Sterne geführt, die, wenn auch ihrem Betrage nach im einzelnen nicht hinreichend gesichert, doch wegen ihres Charakters als absolute Parallaxen einen beachtenswerten Beitrag bilden.

Die Reichweite dieser absoluten Methoden ist bislang sehr beschränkt geblieben, und die Aussicht, sie erweitert zu sehen, ist sehr gering. Unsere

Relative Bestimmung.

Kenntnisse der Fixsternentfernungen beruhen fast ausschließlich auf den Bestimmungen relativer Entfernungen durch Vergleichung benachbarter Sterne, deren parallaktische Ellipsen zwar gleich orientiert und von gleicher Gestalt sind, in den Dimensionen aber im umgekehrten Verhältnis der Entfernungen der Sterne stehen. Die Vergleichung der beiden Sterne führt wegen der gleichen Lage der großen Achse der beiden Ellipsen zur Kenntnis des Größenunterschiedes dieser Achsen, also zur Kenntnis des Unterschiedes der Parallaxen. Die Vergleichung der beiden Sterne erfolgt durch mikrometrische Messung, sie wurde erst möglich im zweiten Viertel des vorigen Jahrhunderts besonders durch die auf Fraunhofers Wirken zurückzuführenden Vervollkommnungen der mechanischen und optischen Hilfsmittel.

Durch Vergleichungen des Doppelsterns 61 Cygni mit zwei schwachen Nachbarsternen mit Hilfe des Fraunhoferschen Heliometers führte Bessel im Jahre 1837 in Königsberg die erste von Erfolg gekrönte Parallaxenbestimmung aus. Der von Bessel erhaltene Wert 0″.34 ist durch vielfache spätere Prüfungen sehr nahe bestätigt worden, und das zu dieser ersten er-

Heliometer.

folgreichen Beobachtung benutzte Instrument hat sich auch weiterhin als das vollkommenste Hilfsmittel für die vorliegende Aufgabe erwiesen. Das Messungsprinzip besteht beim Heliometer darin, daß man das Objektiv des Fernrohres in zwei, in der Richtung der Schnittlinie verschiebbare Hälften zerschneidet, sodaß es von jedem Sterne zwei Bilder erzeugt. Stehen die

beiden Objektivhälften einander genau gegenüber, so koinzidieren die beiden Bilder; sie bewegen sich auseinander, wenn man die Hälften gegeneinander verschiebt. Bewirkt man ein Zusammenfallen des von der einen Objektivhälfte erzeugten Bildes des einen Sternes mit dem von der anderen Objektivhälfte erzeugten Bilde eines zweiten Sternes, so mißt die Entfernung der Hälften, die mit äußerster Genauigkeit bestimmbar gemacht ist, den Winkel zwischen den beiden Sternen. Man erzielt die größte Genauigkeit, wenn man den zu beobachtenden Stern mit zwei nahen schwachen Sternen vergleicht, die in entgegengesetzter Richtung stehen, sodaß die drei Sterne nahe eine gerade Linie, möglichst in der Richtung der großen Achse der parallaktischen Ellipse des Sternes, bilden. Die Bedingung, daß der Abstand der beiden schwachen Sterne, wenn ihre Entfernung wirklich unmeßbar groß ist, bei allen Messungen denselben Wert behalten muß, bildet dann eine sehr wirksame Kontrolle der Beobachtungen und führt die Abstandsmessungen im wesentlichen auf eine Interpolation zurück. Auf diesem Wege sind in neuerer Zeit mit den neueren und größeren Repsoldschen Heliometern am Kap der Guten Hoffnung, in Newhaven und in Leipzig eine Reihe von Parallaxenbestimmungen mit vollem Erfolge ausgeführt worden.

Weniger glücklich war man in dem Versuche, die mikrometrische Vergleichung im Gesichtsfelde gewöhnlicher Refraktoren, bei der man sich durch eine äußerst sorgfältig gearbeitete feine Schraube bewegter Fäden bedient, so weit zu vervollkommnen, daß sie eine der Lösung der Aufgabe gewachsene Genauigkeit erlangte. Der von äußeren, sich der sicheren Kontrolle entziehenden Umständen abhängige Zustand des Instrumentes und besonders die mit der Lage des Instrumentes sich ändernde Wirkung der Schwere auf die einzelnen Teile des Instrumentes bieten zur Zeit noch sehr gefährliche, leicht zu systematischen Entstellungen Anlaß gebende Fehlerquellen. Fadenmikrometer.

Auch die Hoffnung, von der photographischen Platte weitreichende Hilfe zu erlangen, schien lange illusorisch. Große, mit aller erdenklichen Sorgfalt durchgeführte Beobachtungsreihen konnten nachher vor der Kritik nicht bestehen, und ihre Resultate mußten als wertlos betrachtet werden. Gelang es auch in einzelnen Fällen der Schwierigkeiten scheinbar Herr zu werden und dem Resultate hinreichenden Anspruch auf Vertrauen zu verleihen, so war die Arbeit kaum weniger mühsam als die der direkten Messung. Unterschiede in der Farbe und in der Helligkeit spielen beim photographischen Prozeß eine größere Rolle als bei der direkten Beobachtung, und die Fehler in der Nachführung des Instrumentes während der Belichtung der Platte machen sich bei verschieden hellen Sternen in verschiedenem Maße geltend und erzeugen so systematische Fehler. Daß diese Schwierigkeiten aber zu überwinden sind, geht aus den in neuerer Zeit ausgeführten und als durchaus gelungen zu betrachtenden photographischen Parallaxenbestimmungen hervor. Besonders hervorzuheben sind die mit Photographie.

dem großen Yerkes-Refraktor, bei dem allerdings der große Skalenwert als besonders günstiges Moment ins Gewicht fällt, ausgeführten Reihen.

Bestimmung in Mengen.

Von großer Bedeutung ist die photographische Methode dadurch geworden, daß sie es uns ermöglicht, auf einfachem Wege größere Gebiete des Himmels auf Sterne mit merklicher Parallaxe zu untersuchen. Erzeugen wir auf ein und derselben Platte Bilder der gleichen Stelle des Himmels, die drei Zeiten der Maximalwirkung der Parallaxe, zweier in der einen und der dazwischenliegenden in der entgegengesetzten Richtung, entsprechen, so gibt uns die Ausmessung der Platte die Parallaxe der einzelnen Sterne bezogen auf die mittlere Parallaxe aller Sterne der Platte unter Elimination der der Zeit proportional fortschreitenden Änderungen der Platte. Diese von Kapteyn vorgeschlagene Methode, die in absehbarer Zeit eine Durchforschung des Himmels in bezug auf uns verhältnismäßig nahe, unserer Kenntnis aber noch verborgen gebliebene Sterne ermöglichen und uns außerdem über die mittleren Entfernungen der Sterne Aufschluß geben würde, ist durch mehrfache Versuche schon erprobt.

Bevor noch diese mikrometrischen Methoden zur Durchbildung gelangt waren und als noch ausschließlich die Meridianinstrumente zur Lösung der Aufgabe zur Verfügung standen, wurde schon versucht, relative Parallaxen durch Rektaszensionsdifferenzen zu bestimmen. Bei Sternen, deren Länge um 180^0 verschieden ist, wirkt die Parallaxe in entgegengesetztem Sinne; wenn sie die Länge des einen verkleinert, vergrößert sie die Länge des anderen und umgekehrt. Demnach ist die Differenz der scheinbaren Länge oder auch Rektaszension beider abhängig von der Summe ihrer Parallaxen. Auf diesem schon von Römer 1701 versuchten Wege leitete Bessel aus Bradleys Beobachtungen ganz befriedigende Resultate ab. Struve zeigte dann, daß man die bei einem zwölfstündigen Intervall sehr leicht verderblichen Fehler der Aufstellung und des Ganges der Uhr im wesentlichen eliminieren kann durch die Verbindung der Zeiten des Durchganges durch die obere oder untere Kulmination bei zwei um 12^h voneinander abstehenden Zirkumpolarsternen. In der Praxis sind diese beiden an sich sehr aussichtsreichen Methoden nur einer sehr beschränkten Anwendung fähig wegen der Forderungen, die sie an die gegenseitige Stellung der Sterne stellen. Geht man aber nicht auf die Bestimmung der Summe zweier Parallaxen aus, sondern begnügt man sich mit der Bestimmung der Differenz der Parallaxen, so tritt an die Stelle einer Verschiedenheit um zwölf Stunden die der nahen Gleichheit der Rektaszensionen der Sterne, und auch in dieser Form hat Bessel die Methode schon angewandt. Die vollkommeneren Hilfsmittel der neueren Zeit ließen diesen letzteren Weg auch neben den mikrometrischen Methoden aussichtsreich erscheinen. Mit der photographischen hat diese Methode den Vorzug gemein, daß die Beobachtungen gleichzeitig eine größere Zahl von Objekten umfassen können. Nachdem die Methode sich bei mehreren größeren Beobachtungsreihen bewährt hatte, ist sie jetzt unter Führung der Astronomischen Gesellschaft

Rektaszensionsdifferenzen.

für eine sich auf alle helleren Sterne bis zur siebenten Größe erstreckende parallaktische Durchmusterung des Himmels, an der eine größere Zahl von Sternwarten sich beteiligen müßte, in Vorschlag gebracht. Mit der Bearbeitung der Zone $+ 15^0$ bis $+ 20^0$ ist die Münchener Sternwarte vorangegangen.

Der Übergang von der relativen Parallaxe, wie wir sie als Resultat bei allen zuletzt behandelten Methoden erhalten, zum absoluten Werte der Parallaxe verlangt noch eine Schätzung der Entfernung der Vergleichsterne, die wir nur auf Grundlage allgemeiner Betrachtungen über die Anordnung der Sterne verschiedener Helligkeit erlangen können.

Mittelbare Bestimmung.

In manchen Fällen, in denen die unmittelbare Messung aussichtslos ist oder versagt, führen andere Wege dennoch zum Ziele. Bei Doppelsternen haben wir in dem dritten Keplerschen Gesetze eine Beziehung zwischen der Umlaufszeit, der Masse des Systems und dem linearen Abstande der Komponenten. Mit einer plausiblen Annahme über die Masse auf Grund unserer sonstigen Kenntnis dieser Verhältnisse gibt uns also die bekannte Umlaufszeit die lineare Entfernung der Komponenten, und verbinden wir damit die gemessene Entfernung in Bogenmaß, so erfahren wir die Entfernung des Systems von uns in linearem Maße. Dieser Weg führte Bessel zu einer nahe richtigen Schätzung der Parallaxe von 61 Cygni, noch bevor er sie durch direkte Beobachtungen kannte. Auch Messungen der Bewegung der Komponenten eines Doppelsterns im Visionsradius führen zum Ziele. Sie lehren uns die lineare Geschwindigkeit der Bahnbewegung kennen. Die aus den Messungen des Abstandes und der Richtung der Verbindungslinie der beiden Sterne berechnete elliptische Bahn des Systems bestimmt ihrerseits den Winkelwert der Umlaufsgeschwindigkeit, und aus der Verbindung beider Werte erhalten wir wieder die Entfernung des Systems von uns. Ein weiteres Hilfsmittel zur Entfernungsbestimmung haben wir in der Vergleichung der scheinbaren und der absoluten Helligkeit der Sterne. Die Verschiedenheit des Glutzustandes der Sterne kommt in ihrem Spektrum zum Ausdruck. Es ist Kohlschütter gelungen, durch vergleichendes Studium eines großen am Mt. Wilson-Observatorium gesammelten Plattenmaterials die Kriterien im Verhalten bestimmter Linien in den Spektren aufzufinden, die über den Glutzustand Aufschluß geben und einen Schluß auf die absolute Helligkeit und damit auf die Entfernung gestatten. Die Erforschung des Baus des Fixsternsystems und der Bewegungsverhältnisse in demselben hat weiter noch eine Reihe von Gesichtspunkten ergeben, nach denen wir die räumliche Anordnung großer Sterngruppen einigermaßen beurteilen, ihre Entfernung vom Sonnensystem abschätzen können. Darüber wird später eingehender zu sprechen sein.

Ergebnisse.

Bestimmungen der Entfernung durch die Messung der Parallaxe sind zur Zeit für etwa 500 Sterne ausgeführt. Für einen erheblichen Teil dieser untersuchten Sterne darf man das Resultat aber nicht als hinreichend gesichert betrachten, und für mindestens $^1/_3$ der Sterne ist der der Bestimmung

noch innewohnende rechnungsmäßige wahrscheinliche Fehler ebenso groß oder sogar größer als das Resultat selbst. Für viele der untersuchten Sterne ist die Parallaxe so klein, daß es mit den gegenwärtigen Hilfsmitteln gar nicht möglich ist, den wahrscheinlichen Fehler unter den Betrag der Parallaxe selbst herabzudrücken, und da die untere Grenze der mit den besten Hilfsmitteln erreichbaren Genauigkeit etwa 0″.01 beträgt, so können wir für diese Sterne also nur aussagen, daß ihre Parallaxe kleiner als 0″.01 ist. Nur ein positiver Wert der Parallaxe hätte Berechtigung; wenn also die Beobachtung auf einen negativen Wert der relativen Parallaxe führt, so hätten wir das Resultat so zu deuten, daß der Stern, dessen Entfernung bestimmt werden sollte, weiter entfernt sei als die schwachen Sterne, mit denen er verglichen ist. Im einzelnen Falle hat ein solches Resultat keinen Wert, es sind aber diese negativen Werte von Bedeutung für die Bestimmung der mittleren Entfernung der Sterne.

Das zur Zeit zur Verfügung stehende Material ist nicht derart, daß man auf dasselbe allein allgemeingültige Schlüsse über die Sternverteilung gründen dürfte. Die der Untersuchung unterworfenen Sterne sind nicht willkürlich, sondern zu einem großen Teile nach Gesichtspunkten ausgewählt, die von vornherein eine größere Parallaxe wahrscheinlich machen mußten. Als Kriterium besonderer Nähe dienten dabei teils große scheinbare Helligkeit, teils starke Eigenbewegung.

In der folgenden Tabelle ist für die 21 hellsten Sterne des Himmels der aus Heliometermessungen am Kap der Guten Hoffnung und in Newhaven gefundene Wert der Parallaxe angegeben.

Parallaxen der Sterne erster Größe.

α Eridani, Achernar . . .	0″.043	β Crucis	0″.000
α Tauri, Aldebaran	0.109	α Virginis, Spica	—0.019
α Aurigae, Capella	0.079	β Centauri	0.030
β Orionis, Rigel	0.000	α Bootis, Arcturus	0.066
α Orionis, Beteigeuze . . .	0.024	α Centauri	0.752
α Argus, Canopus	0.000	α Scorpii, Antares	0.021
α Canis maj., Sirius	0.370	α Lyrae, Wega	0.082
α Canis min., Procyon . . .	0.334	α Aquilae, Atair	0.232
β Geminorum, Pollux . . .	0.056	α Cygni, Deneb	—0.012
α Leonis, Regulus	0.024	α Piscis austr., Fomalhaut .	0.130
α Crucis	0.050		

Nur ein kleiner Teil des Raumes, den wir als in den Bereich unserer jetzigen Messungsgenauigkeit fallend annehmen dürfen, hat bisher vollständig erforscht werden können. Beschränken wir uns auf eine der Parallaxe 0″.2 entsprechende Entfernung, also auf ein wenig mehr als eine Million Erdbahnradien, so haben wir ein Gebiet, von dem wir uns als ziemlich vollständig unterrichtet betrachten dürfen. Dieses Gebiet enthält die in der folgenden Zusammenstellung aufgeführten Sterne.

Sterne in der Nähe der Sonne.

Name	Ort für 1900.0	Größe	Parallaxe	Entfernung: Sternweiten	Entfernung: Lichtjahre	Eigenbew. Bog.	Eigenbew. km	Radialgeschw. km	Absolute Helligk.	Spektrum: Pickering	Spektrum: Vogel
α Centauri	$14^h 32^m.8$ $-60°25'$	0.1	0″.752	1.3	4.3	3″.7	23	−22	51	G u. K 5	IIa
Proxima Centauri	14 22.8 −62 15	11.0	0.78	1.3	4.2	3.8	23		1/490		
Barnards Velox	17 52.9 + 4 25	9.4	0.62	1.6	5.3	10.3	79	−106	1/70	Mb	
Lal. 21185	10 57.9 +36 38	7.6	0.392	2.5	8.3	4.7	57	−87	1/5	Ma	IIIa
Sirius	6 40.7 −16 34	−1.6	0.370	2.7	8.8	1.3	17	−7	1000	A	Ia
Procyon	7 34.1 + 5 29	0.5	0.334	3.0	9.8	1.2	17	−4	177	F 5	IIa
G. Z. 5^h243	5 7.7 −44 59	8.3	0.312	3.2	10.4	8.7	132	+242	1/5	G—K	IIa
τ Ceti	1 39.4 −16 28	3.6	0.310	3.2	10.5	1.9	29	−16	12	K	IIa—IIIa
ε Eridani	3 28.2 − 9 48	3.8	0.307	3.3	10.6	1.0	15	+16	10	K	IIa—IIIa
Gr. 34	0 12.5 +43 27	8.2	0.306	3.3	10.6	2.9	45		1/5	Ma	IIIa
61 Cygni	21 2.4 +38 15	5.1	0.291	3.4	11.2	5.2	85	−63	3	K 5	IIIa
Pos.med.2164	18 41.8 +59 29	8.8	0.290	3.4	11.2	2.3	38		1/10	K	IIa—IIIa
Lac. 9352	22 59.4 −36 26	7.4	0.283	3.5	11.5	6.9	116	+12	2/5	K	IIa—IIIa
ε Indi	21 55.7 −57 12	4.7	0.273	3.7	11.9	4.7	82	−39	6	K 5	IIIa
Lal. 21258	11 0.5 +44 2	8.9	0.26	3.8	12.5	4.5	82	+65	1/10	Ma	IIIa
AGHels 13170	22 24.4 +57 12	9.2	0.251	4.0	13.0	0.7	13		1/10		
σ Draconis	19 32.5 +69 30	4.8	0.243	4.1	13.4	1.8	35	+26	6	G 5	IIIa
α Aquilae	19 45.9 + 8 36	0.9	0.232	4.3	14.0	0.6	12	−33	254	A 5	Ia
AOe 17415	17 37.0 +68 26	9.3	0.21	4.8	15.5	1.3	29		1/10	F	Ia—IIa
W 16^h 906	16 50.1 − 8 9	8.8	0.210	4.8	15 5	1.3	29		1/5	K	IIa—IIIa
Sonne									34	G	IIa

Neben der Parallaxe ist in der Zusammenstellung die aus ihr berechnete lineare Entfernung in „Sternweiten" ausgedrückt angegeben. Eine Sternweite, eine Entfernung, in der die Parallaxe eines Sternes gleich einer Bogensekunde sein würde, ist 206 265 mal so groß wie die mittlere Entfernung der Erde von der Sonne, beträgt also etwa 31 Billionen km. In diesem ungeheuer großen Maßstabe ausgedrückt, würde die Grenze, über die hinaus Entfernungsmessungen mit unseren jetzigen Instrumenten als nicht mehr ausführbar zu betrachten sind, bei 100 liegen. Diese Entfernung entspräche dem $20^1/_2$ millionenfachen des Abstandes der Erde von der Sonne. Als ein zweites einigermaßen ein Verständnis für die ungeheuren Entfernungen der Fixsterne vermittelndes Maß benutzt man die Zeit, die das Licht gebraucht, um von dem betreffenden Sterne in unser Auge zu gelangen, die „Lichtzeit". Würde unsere Sonne plötzlich erlöschen, so würde sie einem Beobachter auf dem uns nächsten Fixsterne doch noch über vier Jahre lang in unverminderter Helligkeit zu leuchten scheinen; einer Sternweite entspricht eine Lichtzeit von 3.26 Jahren.

Die Anzahl der Sterne in dem abgegrenzten Raume ist einschließlich unserer Sonne 21. Wir dürfen es nicht als gewiß hinstellen, daß unsere Zählung alle Sterne in dem Raume umfaßt, wenn wir es auch als wahrscheinlich annehmen können. Übersehen könnten jedenfalls nur sehr schwache Sterne sein, die uns auch die ihnen innewohnende, voraussichtlich große Bewegung noch nicht verraten hätte. Der zweite und dritte Stern der Liste sind Beispiele solcher Fälle. Beide sind erst in den letzten Jahren aufgefun-

den und sind ausgezeichnet, der eine durch seine offenbare Zusammengehörigkeit mit dem aus zwei hellen Sternen bestehenden Systeme α Centauri, der andere als der nach unserer jetzigen Kenntnis stärkst bewegte Stern am Himmel. Wären die Sterne im Raume gleichförmig um die Sonne als Mittelpunkt verteilt, so müßten auf einer um die Sonne mit dem mittleren Abstand je zweier Sterne beschriebenen Kugeloberfläche 16 Sterne liegen. Das Mittel der Entfernungen der ersten 16 Sterne der Liste ist aber 2.95 Sternweiten. Auf jeden Stern fiele also ein kugelförmiger Raum, dessen Radius etwa 1.5 Sternweiten wäre, und in dem mit einem Radius von fünf Sternweiten um die Sonne beschriebenen Raume hätten wir hiernach 37 Sterne zu erwarten. Davon wären uns also jetzt erst etwas mehr als die Hälfte bekannt.

Die weiteren Angaben der Tabelle begründen noch folgende Feststellungen. Die Sterne sind angeordnet nach wachsender Entfernung von der Sonne. Nach Kolumne 7 nimmt mit zunehmender Entfernung die scheinbare Eigenbewegung im allgemeinen ab, während die lineare Bewegung senkrecht zum Visionsradius sich nicht wesentlich ändert. Teilen wir die Zahlen der Tabelle in drei Gruppen, so erhalten wir die Mittelwerte:

Mittlere Parallaxe	Mittlere Eigenbewegung	
0″.72	5″.8	42 km
0.33	3.1	45
0.25	2.9	52

Es bildet aber die Größe der Eigenbewegung kein zuverlässiges Merkmal der Entfernung, denn einer der am stärksten bewegten Sterne des nördlichen Himmels, der Stern Nr. 1830 des Groombridgeschen Sternkatalogs, hat nur eine Parallaxe von 0″.10 bei einer jährlichen Eigenbewegung von 7″.04. In der zehnten Kolumne sind die absoluten Helligkeiten angegeben unter der Annahme der Helligkeit 1000 für den absolut hellsten Stern unserer Nachbarschaft, Sirius. Unserer Sonne kommt in diesem Maße die Helligkeit 34 zu. Unter gleichen Verhältnissen wäre Sirius also 29 mal so hell wie die Sonne. Dagegen würden erst 2400 Körper von der Größe und Leuchtkraft des Barnardschen schnellbewegten Sternes zusammen so hell leuchten wie die Sonne, und der kleine entfernte Begleiter von α Centauri hätte nur den 16000. Teil der Leuchtkraft der Sonne. Es folgt weiter aus den Zahlen, daß die absolute Leuchtkraft der Sterne innerhalb sehr weiter Grenzen schwankt und daß in der Nachbarschaft der Sonne und, da wir für unsere Sonne keinerlei bevorzugte Stellung annehmen dürfen, wohl überall im Raume Sterne der verschiedensten absoluten Helligkeiten nebeneinander vorkommen. Trotz dieser großen Verschiedenheit in der äußeren Erscheinungsform der Sterne unserer Nachbarschaft geht doch aus der Zusammenstellung des Spektralcharakters derselben deutlich ihre Zusammengehörigkeit hervor. Während von der Gesamtheit der helleren Sterne etwa 60 v. H. der I. Klasse und 40 v. H. den Klassen II und III angehören, haben wir hier von 18 (mit Einschluß der Sonne) untersuchten Sternen nur 2 der I. Klasse, dagegen 16 oder 89 v. H. zur II. oder III. Klasse gehörige Sterne.

Über das Verhältnis der Helligkeit zur Bewegung gibt die Tabelle gleichfalls lehrreichen Aufschluß. Für die 9 Sterne, deren absolute Helligkeit größer als 1 ist, finden wir als Betrag der linearen seitlichen Eigenbewegung 35 km, während für die 11 Sterne mit absoluter Helligkeit unter 1 ein Betrag von 58 km folgt, und bei den Radialbewegungen ergibt sich für 6 Sterne mit absoluter Helligkeit über 6 der Wert 15 km, bei 8 Sternen mit absoluter Helligkeit unter 6 aber 80 km. Die Sterne größerer Leuchtkraft haben also eine geringere Geschwindigkeit, und diese Wahrnehmung hat sich nun auch für die Gesamtheit der Sterne als maßgebend erwiesen. Aus dem jetzt vorliegenden großen Material an Radialbewegungen schließen Adams und Strömberg auf eine Zunahme der Radialgeschwindigkeit bei den Sternen des II. und III. Typus um 1.5 km für jede Einheit der absoluten Helligkeit, während eine Abhängigkeit von der Entfernung nicht zum Ausdruck kommt.

Entfernungsgesetz.

Da ohne Zweifel ein inniger Zusammenhang zwischen der Entfernung einerseits und der scheinbaren Helligkeit und der Eigenbewegung andererseits bestehen muß, können wir, solange uns der Ausdruck dieses Gesetzes noch nicht bekannt ist, auf empirischem Wege die Verbindung zwischen den drei Größen kennen zu lernen suchen. Aber zu brauchbaren Resultaten konnte dieser Weg erst führen, als man imstande war, den direkt gemessenen Entfernungen, deren Kenntnis nur bis zu einer verhältnismäßig sehr nahen Grenze erreichbar ist, weitere auf indirektem Wege erschlossene hinzuzufügen. Sie ergeben sich aus der Seite 520 erwähnten Säkularparallaxe, dem Winkel, unter dem die Bewegung des Sonnensystems im Raume von den Sternen einer bestimmten Gruppe aus senkrecht gesehen im Mittel erscheint. Kapteyn gewann diesem Material eine Formel ab, die die Parallaxe darstellt als Produkt dreier Faktoren: der mittleren Parallaxe der Sterne 5. Größe von einer jährlichen Eigenbewegung von 0″.01, einer zweiten von der beobachteten scheinbaren Eigenbewegung und einer dritten von der scheinbaren Helligkeit abhängigen Größe. Diese Formel hat dann später durch Schwarzschild eine theoretische Begründung und Rechtfertigung aus den Grundgesetzen der statistischen Astronomie erhalten und ist durch eine neue Ausgleichung des bis 1915 vorliegenden Materials durch Van Rhijn im wesentlichen bestätigt gefunden, so daß das durch die Formel nach Einführung der neuen Werte der Konstanten gewonnene Urteil über die mittleren Entfernungen von Sterngruppen bestimmter Helligkeit und bestimmter Größe der Eigenbewegung einiges Vertrauen verdienen dürfte.

IV. Ältere Vorstellungen vom Fixsternsystem.

Lange bevor noch die Wissenschaft sich die Werkzeuge geschaffen hatte, die an der Hand sicher erkannter und durch mathematisch streng begründete Gesetze verbundener Tatsachen die Erforschung der Gestalt und Ordnung des Weltgebäudes in erfolgversprechende Bahnen lenkten, suchten kühne Geister sich eine alles, was dem Auge sich am gestirnten Himmel darbietet, um-

fassende Vorstellung zu bilden. Mit zwingender Notwendigkeit gehen alle diese Versuche von der fernsten Vergangenheit bis in unsere Tage aus von der wunderbaren, durch einen übermächtigen Eindruck den Beschauer mit einer Ahnung der großen in ihr verborgenen Geheimnisse erfüllenden Erscheinung der Milchstraße. Unser ganzes Erdenleben ist so eng verbunden mit dem Laufe der Sonne am Himmelsgewölbe, der Ekliptik, und alle dem Auge überhaupt zugänglichen gesetzmäßigen Vorgänge am Himmel erscheinen uns so eng verknüpft mit der Ekliptik, daß das offenbare Fehlen jeder Beziehung zwischen der Milchstraße und der Ekliptik ohne weiteres die Überzeugung wachruft, daß uns in der Milchstraße ein bestimmendes Glied einer höheren Ordnung vor Augen tritt. Wie ein glänzendes Band von wechselnder Breite und Helligkeit, in fast der Hälfte ihres Laufes in zwei parallel nebeneinander herlaufende Zweige geteilt, an manchen Stellen stark verästelt, an anderen aus einer Zahl kompakter glänzender Flecken bestehend, zieht sie sich, nahe einem größten Kreise sich anschmiegend, um den Himmel herum, den beiden Himmelspolen bis auf weniger als 30^0 nahekommend. Erst der jüngsten Vergangenheit war es möglich, in die Geheimnisse des komplizierten Baues dieses Ringes etwas weiter einzudringen, sein Wesen und Bruchstücke von Gesetzmäßigkeiten, die in ihm walten, aufzudecken.

Die Milchstraße.

Bis zum Ende des 18. Jahrhunderts blieb das Wesen der Milchstraße ein der spekulativen Forschung anheimgegebenes Problem. Die Wahrheit in genialer Weise vorausschauend, erklärte schon der Atomistiker Demokritos (460—370 v. Chr.) sie als ein aus einer unermeßlich großen Zahl kleinster Sterne zusammengesetztes Gebilde. Doch dieser richtigen Vorstellung wurden andere phantastische entgegengestellt, so die des Metrodoros, eines Schülers des Demokrit, der in dem glänzenden Streifen am Himmel die nachgelassene Spur einer früheren Sonnenbahn erblickte, oder später, im Anfang des 5. Jahrhunderts, die des Neuplatonikers Macrobius, nach der sie die Zusammenschweißungsstelle der beiden Himmelssphären sein sollte. Das Fernrohr in Galileis Hand löste in Wirklichkeit den Schimmer auf in Sternenwolken, ruhend auf einem weißlichen Hintergrunde. Mit der wachsenden raumdurchdringenden Kraft der Fernrohre schritt die Auflösbarkeit immer weiter und weiter, ward schließlich fast überall eine vollkommene, nur hier und da blieben Nebelspuren zurück. Die photographischen Daueraufnahmen machten dann aber das Bild wieder mannigfaltiger durch Aufdecken wunderbarer Einzelheiten, wie Höhlen und Risse, weit verbreiteter oder an anderen Stellen streifenartiger, verschlungener, von Stern zu Stern ziehender Nebelmassen. Als ein weiterer Fingerzeig auf die Bedeutung und die bevorzugte Stellung der Milchstraße bietet sich dem Auge unmittelbar die Anordnung der glänzenderen Sterne in bezug auf die Milchstraße dar. In unverkennbarer Weise schmiegen diese Sterne sich dem Zuge der Milchstraße an. Schon Kant nahm die später durch genauere Zählungen erwiesene Tatsache der Zunahme des Sternenreichtums des Himmels mit der Annäherung

Bedeutung der Milchstraße.

an die Milchstraße wahr. So drängte sich denn bald die Überzeugung auf, daß der Milchstraße eine besondere Rolle zufalle, die ihr im Fixsternsystem eine Bedeutung beilege, wie sie in den kleinen Verhältnissen unseres Sonnensystems die Ekliptik spielt. Damit war die Vorstellung eines höheren Systems gegeben, dem unser Sonnensystem als eines der ungezählten untergeordneten Glieder angehört. Weiter führte nun aber das einfache Schauen nicht, und es blieb zunächst der Phantasie überlassen, sich auf Analogieschlüsse stützend, auf dieser Grundlage weiter zu bauen. Aufbau des Sternsystems.

Das mangelnde Verständnis für die wahren Entfernungen der Sterne ließ anfangs noch Vorstellungen entstehen, die von der Wirklichkeit weit ablagen. Kepler stellte die Sonne nahe in den Mittelpunkt einer Hohlkugel, deren nur dünne Wandung von den Fixsternen gebildet wird. Die Entfernung der Fixsterne voneinander muß erheblich kleiner sein als der Radius der Hohlkugel, der Abstand der Sterne von uns. Denn Saturn, der äußerste der Kepler bekannten Planeten, steht 2000 Sonnenradien vom Sonnenmittelpunkte ab, die Harmonie der Welten verlangt dann, daß die Grenze des Raumes 2000 mal 2000, also 4 Millionen Sonnenradien vom Sonnenmittelpunkte liege. Von der Gesamtmasse des ganzen Sternsystems ist ein Drittel in der Sonne, ein Drittel in den Planeten und das letzte Drittel in den Sternen konzentriert. Kepler.

Vor der durch das Newtonsche Gravitationsgesetz vermittelten Erkenntnis der Wirkung der Massenverteilung konnten diese Ideen nicht lange standhalten. Schon Huygens stellte die Fixsterne in jeder Hinsicht auf die gleiche Stufe wie die Sonne. Er versuchte auch auf photometrischem Wege eine Schätzung der Entfernung zweier solcher Sonnen und setzte hiernach den Sirius in einen Abstand von 28000 Erdbahnradien, was freilich auch erst etwa $^1/_{20}$ der tatsächlichen Entfernung ist. Huygens.

Unseren heutigen Ansichten recht nahe kam schon die Kantsche Vorstellung vom Universum, die er in seiner „Allgemeinen Naturgeschichte und Theorie des Himmels“ (1755) entwickelte. Kant spricht klar und deutlich die Unendlichkeit des Raumes aus, indem er die Entfernung der Milchstraße unendlich klein im Vergleich zu den Dimensionen des Universums nennt. Er legt den Fixsternen dieselbe Bedeutung wie Huygens bei und nimmt das Walten des Gravitationsgesetzes für den ganzen Weltenraum als selbstverständlich an. Die sichtbaren Sterne mitsamt der Milchstraße denkt er sich in ein System vereinigt, dessen Grundebene die Ebene der Milchstraße ist. Im Mittelpunkte der Milchstraße liegt der Schwerpunkt unseres Sternsystems, und in demselben nimmt er eine den ungeheueren Dimensionen des Systems entsprechende Masse an. Er vermutet diese Masse im Sirius, der in der Verlängerung einer vom breitesten, glänzendsten und also nächsten Teile der Milchstraße, im Schwan, auf die Sonne zu gezogenen Linie steht. Um diesen Zentralkörper und mehr oder weniger in der Fundamentalebene führen die Sonnensysteme, deren Zentralkörper die einzelnen Fixsterne bilden, ihre Bewegungen aus. Alle Sonnen sind gegen diese Ebene Kant.

zusammengedrängt, wodurch eben der Anblick der Milchstraße entsteht. Gestützt auf die meist elliptische Form der ihm bekannten Nebelflecken, hält er endlich diese für dem unsrigen analog gebildete Sternsysteme und reiht so im unendlichen Raume Milchstraßensystem an Milchstraßensystem, wieder unterworfen dem Gravitationsgesetze, das sie vermutlich wieder zu einem System höherer Ordnung verbindet. Im unendlichen Raume findet so die Vorstellung von niederen zu höheren Systemen aufsteigend niemals Schranken.

Lambert. Die Hauptideen dieses Kantschen Entwurfes kehren wieder in dem Lambertschen Weltenbilde, das dieser unabhängig von Kant in seinem Buche „Kosmologische Briefe über die Einrichtung des Weltbaues" (1761) entwirft. Lambert ist aber der erste, der die kurz zuvor entdeckten Bewegungen der Fixsterne als einen bestimmenden Faktor in seine Vorstellung einführt. Dort, wo die Milchstraße uns am glänzendsten erscheint, erweckt sie unmittelbar den Eindruck, als wäre sie durch eine Aneinanderreihung glänzender Lichtballen gebildet. Daraus gewinnt Lambert die Vorstellung, das ganze im Milchstraßengebilde vereinigte Sternenheer zerfalle in eine große Zahl von Sternhaufen, die jeder ein Fixsternsystem für sich bilden. Er nennt sie Systeme 3. Ordnung. Unsere Sonne bildet mit den uns sichtbaren isolierten Sternen gleichfalls ein solches System 3. Ordnung. Sie selbst, wie alle anderen einzelnen Sterne, ist der Zentralkörper eines Systems der 2. Ordnung, eines Planetensystems, und jeder Planet bildet mit seinen Monden ein System 1. Ordnung. Wie die Systeme der 1. und 2. Ordnung müssen auch die Systeme der 3. Ordnung einen Zentralkörper von überwiegender Masse haben, der die Bewegungen reguliert und Zusammenstöße der einzelnen Glieder des Systems verhindert, denn Lamberts Philosophie verlangt eine unbegrenzte Lebensmöglichkeit auf allen Himmelskörpern. Eine leuchtende Zentralsonne von der erforderlichen Masse und Größe in unserem Fixsternsysteme, dem Sonnensternhaufen, vorauszusetzen, scheint aber den tatsächlichen Wahrnehmungen zuwiderzulaufen. Hingegen hindert nichts, einer ungeheuren dunklen Masse die Rolle der Beherrscherin des Systems zuzuweisen, und als auf Spuren einer solchen deutet Lambert auf den großen Orionnebel hin. Ihm hatte schon Huygens, von dem seine erste Beschreibung stammt, geheimnisvolle Bedeutung beigelegt. Lambert erblickt in ihm einen selbstleuchtenden oder durch eine nahestehende Sonne erleuchteten Flecken auf dem riesigen Zentralkörper unseres Sternhaufens, und er wird in dieser Erklärung noch bestärkt durch die anfangs vermutete Veränderlichkeit des Orionnebels, die er der Rotation des Zentralkörpers zuschreibt. Die Systeme der 3. Ordnung, die Sternhaufen, sind nebeneinander um eine Fundamentalebene, aus der sie sich nicht weit entfernen, gelagert, sie bilden in ihrer Gesamtheit einen linsenförmigen Körper, der sich uns in dem Gesamtbilde der Milchstraße darstellt. Die Forderung der Stabilität der Systeme 3. und 4. Ordnung, die notwendig ist, wenn die Welt, der Philosophie der damaligen Zeit entsprechend, die vollkommenste sein

soll, bedingt hinreichend große Entfernungen zwischen den Sternen in den Systemen dritter Ordnung und noch größere zwischen diesen Systemen. So wird Lambert dazu geführt, die nächsten nicht mehr zu unserem Sonnensternhaufen gehörigen Sterne in eine Entfernung von 750 Siriusweiten zu versetzen und die Ausdehnung des ganzen Milchstraßensystems auf 150000 Siriusweiten anzugeben.

Wir können diese kosmogonischen Versuche nicht an uns vorübergehen lassen, ohne uns bewundernd zu fragen, wie es möglich war, daß so manche der kühnen Schlüsse, besonders Lamberts, vor der späteren exakten Forschung bestehen bleiben konnten, und müssen die Erklärung dafür darin suchen, daß sich in diesen Ideen nur die Überzeugung von dem ewigen, sich selbst erhaltenden Walten eines obersten Prinzipes, der Gravitation, verkörperte. Der gegen Ende des 18. Jahrhunderts hereinbrechende große geistige Kampf lenkte auch die Erforschung der Frage nach dem Bau des Weltalls aus dem Reiche der Spekulation hinüber auf das Gebiet der Erfahrung und der Sinnenwahrnehmung. Die großen Geister des 17. und 18. Jahrhunderts hatten sich vor allem mit der Ausbildung der geistigen Hilfsmittel beschäftigt, um die Probleme der Himmelsmechanik auf dem Boden des von Kopernikus, Kepler und Newton Geschaffenen einer vollständigen Lösung entgegenzuführen. So war gegen Ende des 18. Jahrhunderts die theoretische Astronomie zu einer hohen Entwicklung und zur völligen Beherrschung des von der praktischen Astronomie Dargebotenen gelangt. Ein Weiterschreiten, das Angreifen neuer Probleme, erforderte neue, von der praktischen Astronomie zu liefernde Tatsachen. Um die Waffen der Himmelsmechanik über die Grenzen des Sonnensystems hinaustragen zu können, mußten zunächst die optischen und mechanischen Hilfsmittel, dem erweiterten Gesichtskreise entsprechend, entwickelt werden. In der Tat heben die großen Errungenschaften, die uns in der Spanne knapp eines Jahrhunderts so manches Rätsel gelöst und uns einen klaren Blick in Einzelheiten wenigstens des großen Mechanismus des Universums gestattet haben, an mit den großen technischen Fortschritten der Neuzeit. Am Ausgangspunkte dieser Periode steht Wilhelm Herschel, der mit den mit eigener Hand geschaffenen Teleskopen von immer mehr gesteigerter Kraft den Himmel durchforschte, die Sternverteilung studierte und auf Grund der erlangten Resultate zu einer in den wesentlichen Punkten noch heute gültigen Vorstellung des Fixsternsystems gelangte. Auch die Wege, die zum Verständnis der Fixsternbewegungen führten, sind von Herschel vorgezeichnet und gaben ihm selbst schon ein der Wahrheit sehr nahekommendes Resultat in einer auf das Sternbild des Herkules zu gerichteten Bewegung des Sonnensystems im Raume. Als völlig gesichertes Ergebnis der Herschelschen Arbeiten haben wir auszusprechen: Die Milchstraße ist eine Anhäufung teils dicht gedrängter, teils lockerer Sternhaufen, die in einer verhältnismäßig dünnen, sich in unmeßbare Entfernungen ausdehnenden Schicht angeordnet sind. W. Herschel.

Die Eigenbewegungen der Fixsterne waren durch Herschels Arbeiten, die schon zur Erkenntnis des systematischen Charakters derselben führten, in den Mittelpunkt der ganzen Frage gerückt, und ihre Ermittlung und möglichste Sicherung durch Steigerung der Genauigkeit der Beobachtungen und der Reduktionsmethoden stand in den auf Herschels Wirken folgenden Jahrzehnten im Vordergrund der astronomischen Interessen. Sobald man zu einer umfassenderen Kenntnis dieser Bewegungen gelangt war, wurden, allerdings vorzeitig, von Argelander und von Mädler Theorien derselben aufgestellt. Argelander prüfte die Vorstellung eines nach Analogie des Sonnensystems aufgebauten Fixsternsystems mit zentraler, weit überwiegender Masse. In ihm hätten wir nahe kreisförmige Bewegungen zu erwarten, die in einer Ebene, als welche nur die Ebene der Milchstraße angenommen werden kann, erfolgen und um so größer werden, je näher man dem Zentrum der Bewegung kommt. Dieses Zentrum ist in einer zur Bewegungsrichtung des Sonnensystems im Raume senkrechten Richtung zu suchen. Diese beiden Forderungen führten dazu, den Zentralkörper im Sternbild des Perseus zu vermuten. Die rechnerische Prüfung der Hypothese führte aber zu unbefriedigenden Resultaten und zum Fallenlassen derselben. Mädlers Hypothese verwarf den Zentralkörper ganz. Das Sternsystem wird gedacht als gebildet aus einer großen Zahl von Körpern, die in einem kugelförmigen Raume verteilt sind und sich um ihren gemeinsamen Schwerpunkt bewegen. In einem solchen System wächst die Anziehungskraft proportional mit dem Abstande vom Mittelpunkte, die Umlaufszeiten aller Körper des Systems müssen identisch sein, die lineare Größe der Bewegung zunehmen mit der Entfernung vom Mittelpunkte. Die Plejadengruppe scheint Mädler die geeignetste zu sein, um in den Mittelpunkt des ganzen Systems gesetzt zu werden, und in ihrer Mitte vermutet er denselben. Alcyone, der hellste Stern der Plejaden, ist möglicherweise das in nächster Nähe den Schwerpunkt umkreisende Glied des Systems. Die numerische Prüfung der Hypothese an den beobachteten Bewegungen kann aber auch nicht zum Beweise derselben führen, weil das Material dazu noch bei weitem nicht reif ist.

Argelanders Hypothese.

Mädlers Hypothese.

Wenn auch dieser Mädlersche Versuch, dessen Grundgedanke den wirklichen Verhältnissen vielleicht entsprechen dürfte, nicht zum Ziele führen konnte, so lag das daran, daß man die Tragweite der in den Eigenbewegungen beobachteten Gesetzmäßigkeiten weit überschätzte. Wir erkennen das am besten, wenn wir die damaligen tatsächlichen Kenntnisse in Vergleich stellen mit denjenigen, über die wir jetzt verfügen: Um die Mitte des 19. Jahrhunderts gelang die erste zuverlässige Entfernungsbestimmung eines Sternes, durch die der Übergang von der angulären Bewegung, die aus der Ortsbestimmung sich direkt ergibt, auf die lineare möglich wurde; im letzten Dezennium des 19. Jahrhunderts wurde der Weg aufgedeckt, der uns aus der Verschiebung der Spektrallinien eine Bestimmung der zweiten Komponente der Bewegung, der in die Gesichtslinie fallenden, direkt in linearem Maße ermöglichte. Für eine zwar noch sehr beschränkte Zahl von Sternen

können wir aus diesen drei Daten die totale Bewegung im Raume ihrem linearen Betrage und ihrer Richtung nach berechnen. Welch großer Fortschritt ist das gegenüber den dürftigen Kenntnissen jener früheren Zeit! Trotzdem sind die Schwierigkeiten der Aufgabe kaum geringer geworden, und wir müssen uns damit begnügen, ein Weltenbild nur in großen Zügen zu entwerfen, das die charakteristischen Ergebnisse unserer Beobachtungen und der an sie geknüpften Folgerungen wiedergibt.

Das Beobachtungsmaterial, das uns zur Verfügung steht, ist gegeben in Sternzählungen, in Parallaxenbestimmungen, in Bewegungen und in den spektralen Eigenschaften der Sterne. Wir ordnen dieses Material zunächst, um einen Überblick zu gewinnen und die Beziehungen zu erkennen, welche zwischen der Verteilung der Sterne im Raume, der Verteilung nach der Größe der linearen Bewegung und der Verteilung nach der absoluten Helligkeit bestehen. Das sind die drei Grundlagen zur Erkenntnis der Anordnung des Sternsystems und der Bewegungen in demselben.

V. Die Sternverteilung. Die räumliche Anordnung der Sterne muß, wenn sie bestimmten Gesetzen unterworfen ist, zum Ausdruck kommen in einer gesetzmäßigen Verteilung der Sterne über die Sphäre. Dieser Gedanke bildet die Grundlage der frühesten Theorie des Sternsystems, und von ihm gingen auch wieder Herschels Untersuchungen aus. Das Neue, was Herschel hinzufügte, war die Erkenntnis, daß man unter bestimmten Voraussetzungen aus der Sternverteilung auf die Entfernung der Grenzschicht des mit Sternen erfüllten Raumes schließen könne. In einem bestimmten Areale am Himmel erblicken wir alle jene Sterne, die sich in einem Kegel befinden, dessen Spitze im Auge des Beobachters liegt und dessen Grundebene die aus dem Himmel ausgeschnittene Fläche ist. Kennten wir die Entfernung der Grenzschicht, d. h. die Höhe des Kegels, und außerdem das Gesetz der Sternverteilung, so würden wir die Sternzahl in dem Kegel ausrechnen können, und umgekehrt ließe sich bei gegebener Kenntnis der Sternverteilung aus der Zahl der Sterne im Kegel auch die Höhe des Kegels berechnen. Die Sternverteilung kennen wir nicht, wir sind gezwungen, um den Gedanken zu verwerten, über dieselbe eine Annahme zu machen, und die nächstliegende, die wir zu prüfen hätten, wäre diejenige einer gleichförmigen Verteilung der Sterne im Raume. Weiter müssen wir aber noch voraussetzen, daß wir wirklich alle in dem Kegel befindlichen Sterne auch zählen können, daß sie uns sichtbar sind. Wäre das nicht der Fall, weil unsere Wahrnehmung nur bis zu einer beschränkten, nach allen Richtungen gleichen Entfernung in den Raum eindringt, so müßte die Zahl der Sterne in einem Areal von bestimmter Größe bei gleichförmiger Verteilung der Sterne im Raume und bei gleicher Leuchtkraft aller Sterne überall am Himmel die gleiche sein. Das unbewaffnete Auge reicht bestimmt nicht bis an die Grenze des Sternsystems, denn sonst dürfte ja bei Benutzung eines Fernrohres die Zahl der zu erkennenden

Herschels Sterneichungen.

Sterne nicht größer werden. Die Verteilung der dem freien Auge sichtbaren Sterne ist daher auch nahezu gleichförmig, wenigstens ist eine Ungleichförmigkeit auf den ersten Blick nicht zu erkennen, wenn sie auch in der Tat vorhanden ist; nach Houzeaus Zählung enthält eine 60° breite die Milchstraße symmetrisch umschließende Zone, die genau die Hälfte des ganzen Himmels umfaßt, 3154 Sterne, während die beiden übrigbleibenden Kalotten, die die zweite Hälfte des Himmels einschließen, nur 2565 Sterne enthalten. Soweit unser Auge reicht, wäre also die Voraussetzung gleichförmiger Verteilung der Sterne wenigstens nahezu erfüllt.

Solange man die Entfernung der Sterne nicht kannte, konnte man über ihre absolute Leuchtkraft nichts aussagen, sondern konnte die verschiedene scheinbare Helligkeit nur erklären durch Verschiedenheit der Entfernung. W. Herschels Methode der Sterneichungen bestand nun darin, daß er mit einem seiner großen Spiegelteleskope die Anzahl der Sterne im Gesichtsfelde an 1088 verschiedenen Stellen des Himmels abzählte. Später führte sein Sohn J. Herschel am Kap der Guten Hoffnung noch 2299 Eichungen am Südhimmel aus. Unter der Annahme gleichförmiger Verteilung der Sterne im Raume und gleicher mittlerer Leuchtkraft der Sterne berechnete W. Herschel dann aus der beobachteten Sternzahl die Höhe des Kegels ausgedrückt in Einheiten der Entfernung des Sirius von der Sonne, einer Siriusweite. Während an einzelnen Stellen des Himmels nur zwei oder drei Sterne im Gesichtsfelde erschienen, war an der reichsten Stelle die Anzahl 588. Durch Zusammenstellung der Messungen zu einem die Milchstraße senkrecht durchschneidenden Querschnitte durch das Sternsystem erhielt Herschel hieraus als Gestalt des Sternsystems einen linsenförmigen Körper. Die größte Ausdehnung ist 849, die Dicke nur 155 Siriusweiten. Nach der einen Seite ist die Linse in zwei Scheiben gespalten, die sich in einer Entfernung von 220 Siriusweiten trennen und dann bis 497 bzw. 420 Siriusweiten reichen.

Die Fortsetzung seiner Studien führte Herschel schon selbst zu der Erkenntnis, daß die Voraussetzungen, von denen er ausgegangen war, nicht erfüllt seien. Die Entdeckung der Doppelsternsysteme offenbarte das Walten der Gravitation auch in den Tiefen des Raumes und legte damit den Gedanken nahe, daß durch sie eine Zusammenordnung einer größeren Zahl von Sternen zu besonderen Systemen erfolgen könne, wodurch die gleichförmige Verteilung ausgeschlossen ist. Die Entdeckung der auch durch das stärkste Fernrohr nicht in Sterne auflösbaren Nebelmassen, die Herschel richtig als selbstleuchtende Nebelmassen erklärte, machte die Annahme gleicher absoluter Helligkeit der Sterne unwahrscheinlich, und schließlich bewies der Umstand, daß an manchen Stellen der Milchstraße auch im größten Teleskop immer noch ein weißer Hintergrund blieb, der bei Anwendung noch stärkerer Hilfsmittel voraussichtlich sich in Sterne auflösen würde, daß hier sein Instrument nicht bis an die Grenze des Sternsystems eindrang.

Herschels photometrisches Verfahren.

Ein besser begründetes Urteil über die Ausdehnung des Sternsystems

in der Richtung der Milchstraße suchte Herschel dann in folgender Weise zu gewinnen. Er benutzte zwei Fernrohre von verschiedener Öffnung, von denen er durch Versuche an irdischen Objekten festgestellt hatte, daß ein und dasselbe Objekt in dem stärkeren Fernrohr in der doppelten Entfernung dieselbe Helligkeit habe wie mit dem schwächeren in der einfachen Entfernung. Er richtete nun das schwächere Fernrohr auf einen Stern erster Größe und suchte dann mit dem stärkeren Fernrohr einen anderen Stern, der in ihm dieselbe Helligkeit hatte wie der Stern erster Größe in dem schwächeren Rohre. Bei gleicher absoluter Leuchtkraft mußte dann dieser zweite Stern in der doppelten Entfernung des Sternes erster Größe stehen. Auf demselben Wege konnte er Sterne finden, die in der 4-, 8-, 16-.....fachen Entfernung der Sterne erster Größe sich befanden. Auf diesem Wege ermittelte er zunächst, daß die dem freien Auge noch eben sichtbaren Sterne in der Entfernung von zwölf Siriusweiten ständen. Bei dem stärksten Fernrohre, das er zur Anwendung brachte, fand er, daß es in der Entfernung 191.75 einen Gegenstand noch ebenso hell zeige, wie ihn das freie Auge in der Entfernung 1 sieht. Die Zahl 191.75 nennt man die raumdurchdringende Kraft jenes Fernrohres. Dort wo dieses Fernrohr also den milchigen Hintergrund in der Milchstraße nicht aufzulösen vermochte, mußte das Sternsystem sich über eine Entfernung von 12×191.75 oder 2300 Siriusweiten hinaus erstrecken. Als Endergebnis dieser Forschungen ist die schon S. 533 angeführte Vorstellung Herschels vom Sternsystem zu betrachten.

Sternzählung nach Größenklassen.

Wenn nun auch die Methode der Sterneichungen nicht unmittelbar zum gewünschten Ziele führte, so bildet sie, richtig angewandt, doch ein Hilfsmittel von größtem Werte. Die Voraussetzung gleicher absoluter Leuchtkraft der Sterne ist, wie wir aus der Tabelle auf S. 527 wissen, nicht gestattet, sie ist aber auch nicht nötig. Die Methode darf ohne Änderung auch noch angewandt werden, wenn nur überall im Raume die Verteilung der Sterne nach den verschiedenen Stufen der absoluten Leuchtkraft durchschnittlich die gleiche ist. Denn dann würden für die einzelnen Helligkeitsstufen die Zahlen der Herschelschen Voraussetzung entsprechend wachsen, also auch für alle Helligkeitsstufen zusammengenommen. Wenn weiter die Voraussetzung gleichförmiger Verteilung der Sterne im ganzen Raume nicht erfüllt ist, so wird sich das darin zeigen, daß die scheinbare Helligkeit nicht entsprechend der aus der Sternzahl geschlossenen Entfernung abnimmt. In der doppelten Entfernung sollte die mittlere scheinbare Helligkeit auf $\frac{1}{4}$ gesunken sein. Fänden wir in der, nach der Sternzahl beurteilt, doppelten Entfernung eine geringere Helligkeit, so folgte daraus, daß die wirkliche Entfernung mehr als das doppelte ist, und da die Sternzahl nicht entsprechend gewachsen ist, so müssen die Sterne weniger dicht stehen. Es muß also mit dem Zählen der Sterne eine Schätzung ihrer Helligkeit verbunden werden, oder man muß die Zählungen für die Sterne der einzelnen Helligkeitsabstufungen getrennt ausführen. Mit diesen Einschränkungen angewandt, ist

die Methode der Sterneichungen durchaus berechtigt und geeignet, uns zu wichtigen Aufschlüssen zu führen.

Zonenbeobachtungen.

Nur eine systematische Durchmusterung des ganzen Himmels, die die Sterne mit ihrer scheinbaren Helligkeit verzeichnete, konnte da ein Material liefern, das nach den verschiedensten Richtungen hin verwertbar war. Versuche, solche Sternverzeichnisse anzulegen, waren, allerdings aus anderen Beweggründen, schon von mehreren Beobachtern aus dem Ende des 18. Jahrhunderts und der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts unternommen. Es sind die Zonenbeobachtungen, die von Lalande (um 1800), von Bessel (um 1825), von Argelander (um 1842) ausgeführt sind und die darin bestanden, daß der Beobachter die Durchgangszeiten und Deklinationen aller das Gesichtsfeld eines während des betreffenden Beobachtungssatzes immer nahezu auf dieselbe Deklination eingestellten Meridianinstrumentes passierenden Sterne beobachtete mit Angabe ihrer Größe. Entsprechend der Helligkeitsgrenze, bis zu der man mit den üblichen Meridianinstrumenten noch Sterne sicher zu beobachten vermag, gehen diese Zonen bis zur neunten Größe. Die Besselschen Zonen, die sich auf den zwischen den Parallelkreisen -15^0 und $+45^0$ liegenden Teil des Himmels beziehen, wurden auch in der Tat von W. Struve zu einer Untersuchung über die Konstitution des Fixsternsystems benutzt. Sie konnten aber nur zu Resultaten von zweifelhaftem Werte führen, weil sie eine der wesentlichsten Bedingungen, die an das Material zu stellen ist, nicht erfüllten, nämlich die der Vollständigkeit. Angestellt nur zu dem Zwecke, ein engmaschiges Netz gut bestimmter Fixpunkte am Himmel zu beschaffen, mit deren Hilfe man jedes andere Objekt durch Differenzenmessungen leicht festlegen könne, strebten sie in den sternreichen Gegenden die möglichste Vollständigkeit gar nicht an.

Bonner und Cordobaer Durchmusterung.

Dieses Ziel und gleichzeitig die genauere Bestimmung der scheinbaren Helligkeit der Sterne erreichte erst Argelander, als er es mit seinen Mitarbeitern Krueger und Schönfeld unternahm, ein Verzeichnis aller Sterne des nördlichen Himmels bis zur neunten Größe aufzustellen. Diese große Arbeit, mit der eine neue Epoche in der Geschichte der Himmelsforschung anhebt, wurde in den Jahren 1852 bis 1859 in Bonn ausgeführt. Das Resultat der Arbeit war ein Katalog, der die genäherte Position und die Helligkeit von 324188 Sternen nördlich vom Parallelkreise -2^0 gibt. Schönfeld führte die Arbeit später in Bonn noch bis zum Parallelkreis von -23^0 fort und fügte hier weitere 133659 Sterne hinzu. Die Fortsetzung auf der Südhemisphäre wurde von der Nationalsternwarte in Cordoba unternommen. Soweit schon publiziert, reicht sie bis zum Parallelkreise von -62^0 und enthält in der Zone -22^0 bis -62^0 578802 Sterne. Die Fortsetzung bis zum Südpole ist in Arbeit. Diese Cordobaer Durchmusterung geht in der Grenzgröße etwas weiter als die beiden Bonner Durchmusterungen, indem sie Sterne bis zur zehnten Größe verzeichnet. Diese Durchmusterungskataloge wurden gleichzeitig auch in Karten niedergelegt, die uns also ein getreues Bild des Himmels, wie er sich gegenwärtig in mittleren Fernrohren

darstellt, geben. Für die praktische Astronomie sind diese Karten ein Hilfsmittel von außerordentlicher Wichtigkeit, da sie eine schnelle Orientierung und die Erkennung jedes Neulings am Firmament, soweit er eben in den Bereich der Durchmusterung fällt, gestatten. Noch größer aber ist vielleicht ihre Bedeutung für die Erforschung der Struktur des Universums. In allen Einzelheiten steht das derzeitige Bild des Firmamentes klar gezeichnet vor unsern Augen. Wir brauchen nur zu überdenken, welch kostbares Gut für uns eine vor Hunderten von Jahren nach denselben Prinzipien gezeichnete zweite Karte des Himmels sein würde, um den bleibenden und ständig sich vergrößernden Wert dieser Schöpfung zu ermessen.

Photographische Himmelskarte.

Durch das Hilfsmittel der Photographie wurde den Aufgaben der Sternzählung ein neues, in seiner Fülle kaum zu bewältigendes Material erschlossen. In systematischer Weise wurde zuerst zu Anfang des 20. Jahrhunderts auf den Sternwarten des Harvard College zu Cambridge und Arequipa unter E. C. Pickerings Leitung eine photographische Karte des ganzen Himmels angefertigt. Sie gibt auf 115 sich schindelförmig überdeckenden Platten, deren jede ein Areal des Himmels von mehr als 30^0 im Quadrat bedeckt, ein treues bis zur 11. und teilweise bis zur 12. Größe reichendes Bild des Himmels. Eine andere Aufnahme des ganzen Himmels ist in der Zeit von 1905 bis 1909 von J. Franklin-Adams hergestellt. Die 206 Platten, deren jede ein Feld von $15^0 \times 15^0$ bedeckt, sind in Mervel Hill und in Johannesburg aufgenommen, und die Aufnahmen geben über die Sterne bis zur 17. Größe Aufschluß. Noch viel weiter reichende Ziele verfolgt das internationale Unternehmen der Astrographischen Himmelskarte, zu dessen Ausführung sich eine ganze Reihe von Sternwarten zusammengeschlossen haben (vgl. S. 153) und das uns einen Katalog aller Sterne bis zur 11. Größe und in 21600 Karten ein bis zur 13. oder 14. Größe reichendes Bild des Himmels, auf dem jede Himmelsgegend zweimal dargestellt ist, liefern wird.

Gesetze der Sternstatistik.

Verschiedene Versuche sind schon gemacht, um das in so reicher Fülle dargebotene Material für das Studium des Baues des Fixsternsystems auszunutzen. Es handelte sich zunächst um die Beantwortung der Frage, ob die die Dichtigkeit der Sternverteilung repräsentierende Sternzahl und die mit der scheinbaren Helligkeit eng verbundene Entfernung einander entsprechen. Es sind drei verschiedene Gesetze, die hier zusammenwirken:

1. Bei gleichmäßiger Verteilung der Sterne im Raume wächst die Sternzahl mit der Entfernung proportional dem Inhalt der mit der Entfernung um das Auge beschriebenen Kugel, also proportional mit dem Kubus der Entfernung;

2. die scheinbare Helligkeit einer Lichtquelle nimmt ab mit dem Quadrat der Entfernung;

3. nach dem im vorigen Kapitel Gesagten nehmen die den einzelnen Klassen unserer Größenskala entsprechenden Helligkeiten in einem konstanten Verhältnisse ab; die Helligkeit der nächstfolgenden Klasse ist immer 2.5 mal so klein wie die der nächstvorhergehenden. Dabei ist 2.5 ein Näherungswert für die zu dem Logarithmus 0.4 gehörige Zahl (s. S. 377).

Fassen wir zunächst nur die Sterne einer bestimmten absoluten Leuchtkraft, also etwa eines bestimmten Glühzustandes oder einer bestimmten Temperatur ins Auge, so wird nach dem dritten Satze die scheinbare Helligkeit eines dieser Sterne, der uns um eine Größenklasse heller erscheint als ein anderer, 2.5 mal so groß sein wie die des schwächeren. Diese größere scheinbare Helligkeit kann nur durch größere Nähe entstanden sein, und zwar muß nach dem zweiten Satze der 2.5 mal schwächere Stern in einer Entfernung stehen, die 1.585 mal so groß ist als die des helleren, weil $1.585 \times 1.585 = 2.5$ ist. Wenn aber die Sterne gleichförmig verteilt sind, dann stehen nach dem ersten Satze in der Kugel, die zu der 1.585 mal größeren Entfernung gehört, $1.585 \times 1.585 \times 1.585 = 3.98$ mal soviel Sterne. Also müßte die Zahl der Sterne einer bestimmten absoluten Leuchtkraft, wenn wir um eine Größenklasse weiter gehen, immer 4 mal größer werden. Die Zahl der Sterne 1. und 2. Größe müßte 4 mal so groß wie die der Sterne 1. Größe, die Zahl der Sterne 1., 2. und 3. Größe müßte wieder 4 mal so groß wie die der Sterne 1. und 2. Größe sein und so fort. Derselbe Satz gilt auch für die Sterne einer beliebigen anderen absoluten Leuchtkraft, und wenn also überall im Raume der mittlere Zustand der Sterne der gleiche ist, so müßten die Sternzahlen mit der Größenklasse im Verhältnis 4 : 1 wachsen. Genauer wäre statt 4 zu setzen 3.981.

Ergebnisse der Zählungen.

Diese Folgerung aus den gemachten Annahmen wurde unter Benutzung der Bonner Durchmusterung des nördlichen Himmels zuerst von Littrow einer Prüfung unterzogen. Später hat Gould dies für die dem freien Auge sichtbaren Sterne des ganzen Himmels ausgeführt und Schiaparelli unter Einführung der genaueren photometrisch bestimmten Größen der helleren Sterne wiederholt. Eine Erweiterung über die Grenzen der Durchmusterungen hinaus haben Pickering und Seeliger versucht, indem sie die für einzelne Gebiete aus Karten, oder auch aus mit stärkeren Fernrohren ausgeführten Zonenbeobachtungen oder endlich aus den Herschelschen Eichungen entnommenen Sternzahlen für noch schwächere Sterne zu Hilfe nahmen. Durch diese Untersuchungen wurde mit voller Sicherheit erwiesen, daß die Sternzahl mit der Größe in erheblich geringerem Maße zunimmt, als es den Voraussetzungen gleichförmiger Verteilung und gleicher mittlerer Leuchtkraft entsprechen würde. An Stelle des Wertes 3.981 für das Verhältnis der Sternzahlen zweier aufeinanderfolgender Größenklassen, den wir erwarteten, erhalten wir für die in den Bereich der Durchmusterungen fallenden Sterne im Durchschnitt etwa 3.266. Es ergibt sich aber noch weiter, daß diese Zahl nicht konstant, sondern sehr erheblichen Schwankungen unterworfen ist. Daraus ist also die Folgerung zu ziehen, daß die Voraussetzungen, die dem Werte 3.981 zugrunde liegen, im Sternsystem nicht zutreffen und durch andere ersetzt werden müssen, die sich den Zählungen besser anschließen. Eine weitere Prüfung der sich ergebenden Werte der Verhältniszahl offenbarte eine Abhängigkeit von der Lage der der Abzählung unterworfenen Region zur Milchstraße, die sich dadurch wieder als die Fundamentalebene

des Sternsystems erweist. Für die dem freien Auge sichtbaren Sterne hat die Verhältniszahl an den Polen der Milchstraße nahezu den den einfachen Voraussetzungen entsprechenden Wert, und sie nimmt ab mit der Annäherung an die Milchstraße; für die schwächeren Sterne kehrt sich dieser Gang um; für sie tritt in der Milchstraße der Maximalwert 3.8 bis 3.9 ein, und mit der Entfernung von der Milchstraße wird der Wert kleiner. Er sinkt für die Sterne der Durchmusterungen bis etwa 3.0, für die schwächeren Sterne aber noch wesentlich weiter. Für die schwächeren Sterne nimmt also die Sternzahl in der Milchstraße am stärksten, und zwar nahe so zu, wie es der Voraussetzung gleichförmiger Verteilung im Raume und gleicher mittlerer Leuchtkraft entsprechen würde; je weiter wir uns aber von der Milchstraße entfernen, um so langsamer wird die Zunahme. Dieses abweichende Verhalten der Verhältniszahl tritt um so mehr in Erscheinung, je schwächer die Sterne sind, bis zu denen wir zählen.

Seeligers Untersuchungen.

Durch die mathematische Interpretation der ermittelten Werte der Verhältniszahlen gelangte Seeliger zu einem Ausdrucke für die Dichtigkeit der Sternverteilung. Diese würde mit der Entfernung abnehmen, und zwar um so stärker, je mehr die Verhältniszahl der Sternzahlen von dem normalen Werte abweicht; also am langsamsten in der Milchstraße, am stärksten in der zur Milchstraße senkrechten Richtung. Mit der einfachsten Annahme über die durch die Beobachtungen ohne weitere Hypothesen nicht bestimmbare Verteilung der absoluten Helligkeit der Sterne, nämlich derjenigen gleicher Verteilung überall im Raume, war Seeliger imstande, die Anordnung der Sterne im Raume in großen Zügen anzugeben. Aber die Beweiskraft der Sternzahlen reicht noch weiter. Wäre der Raum bis in unendliche Fernen oder doch wenigstens bis über die Grenzen unseres Wahrnehmungsvermögens hinaus mit Sternen erfüllt und hätten die Gesetze für die Dichtigkeit der Sternverteilung und für die Verteilung der absoluten Helligkeiten gleichfalls Geltung bis in jene Fernen, so müßte auch die Verhältniszahl der Sternzahlen in einer bestimmten Richtung unveränderlich bleiben bis hinab zu den schwächsten Sternen. Tritt eine Änderung der Verhältniszahl ein, so ist die einzige noch übrigbleibende Erklärung dafür die, daß in der der scheinbaren Helligkeit, bei der die Änderung eintritt, entsprechenden Entfernung eine Unstetigkeit in der Anordnung der Sterne vorhanden ist, und die wahrscheinlichste Annahme wäre, daß jene Entfernung die Grenze des Sternsystems bedeute. Diese Auffassung führt dann auf ein endliches Sternsystem, das in der Richtung der Milchstraße sich etwa doppelt so weit erstreckt wie in der darauf senkrechten Richtung. Die entferntesten Sterne der größten absoluten Leuchtkraft würden in der Richtung der Milchstraße uns als Sterne der Größe 13, in der dazu senkrechten Richtung als Sterne 11.5. Größe erscheinen, und daraus folgte, daß die Grenze des Sternsystems in den beiden Richtungen in einer Entfernung von etwa 5000 bzw. 2500 Sternweiten, oder 16000 bzw. 8000 Lichtjahren läge.

Eine Verbesserung der so gefundenen ersten rohen, zum Teil auf noch unsicheren Annahmen beruhenden Vorstellung vom Sternsystem erfordert eine genauere Kenntnis des Gesetzes der Sternzahlen und der Verteilung der Sterne nach ihrer absoluten Helligkeit. Für das Studium der ersten Frage wird nun in absehbarer Zeit in den photographischen Himmelsaufnahmen ein Material vorliegen, dem man eine sehr große Tragweite beilegen darf, und es ist in der Tat auch schon ein Versuch gemacht, dieses neue Material, soweit es jetzt schon erreichbar ist, auszubeuten. Charlier, der ihn ausführte, ging von der Annahme aus, daß die Verteilung der Sterne nach der scheinbaren Helligkeit dem Wahrscheinlichkeitsgesetze folge, daß also die auf die einzelnen Größenklassen fallende Sternzahl bis zu einem bestimmten in der Mitte der ganzen Reihe der scheinbaren Größen stehenden Werte wächst und dann wieder in gleicher Weise abnimmt. Die Rechnungen sind durchgeführt für neun Stellen an der Sphäre, für die die Sternzahlen nach drei Abstufungen vorlagen, nämlich für den Bereich 1. des Auges, 2. der Durchmusterungen, 3. der photographischen Himmelskarte. Wegen der Unbestimmtheit über die Helligkeitsgrenze, bis zu welcher die photographische Himmelskarte reicht, wohnt den Zahlen noch eine erhebliche Unsicherheit inne. Für die sternreichste, in der Milchstraße gelegene Gegend, die zur Untersuchung kam, fand sich, daß in einem Kegel, dessen Grundfläche $\frac{1}{48}$ des Himmels bedeckt, die Anzahl der Sterne zwischen 30 Millionen und 250 Millionen liege. Die Sternzahl wächst bis zur scheinbaren Größe 20.07 und beträgt für die Größenklasse 19.0 bis 20.0 unter der über die Grenzgröße gemachten Annahme 3730000. Für die sternärmste Gegend liegt die Gesamtzahl der Sterne im Kegel zwischen 600000 und zwei Millionen, die in der Mitte stehende scheinbare Größe ist 16.9. In ihrer Gesamtheit führen auch Charliers Untersuchungen zu der Vorstellung eines wohlbegrenzten Sternsystems, dessen Grenze in der Richtung der Milchstraße in einer dem 600- bis 1400-millionenfachen der Entfernung Erde—Sonne (10000 bis 22000 Lichtjahre) entsprechenden Entfernung liegt.

Charliers Untersuchungen.

Neuere Bearbeitungen konnten noch wesentlich erweiterte und in sich besser ausgeglichene Sternzählungen zugrundelegen. Kapteyn benutzte ein in ähnlicher Art wie das Seeligersche zusammengetragenes Material, suchte aber durch Zählung der Sterne in der Umgebung veränderlicher Sterne auf photographischen Aufnahmen die Sterne bis 16. Größe zu erfassen. Ein einheitliches Material benutzten Chapman und Melotte, die sich auf die Franklin-Adamsschen Himmelsaufnahmen stützten, und Nort, der die Harvard-Himmelskarte verarbeitete. Die Dichte der Sternverteilung ist hiernach in der Milchstraße 4.8 mal größer als an den Polen. Die Zone größter Dichtigkeit ist ein kleiner Kugelkreis, der vom Nordpole der Milchstraße $91^0\ 38'$ absteht. Das System der Sterne bis zur 11. Größe ist ein Ellipsoid mit den Achsenverhältnissen 5.6 und 8.6 parallel zur Ebene der Milchstraße und 4.5 senkrecht dazu.

Neuere Bearbeitungen.

Die neueren Forschungen haben Tatsachen zutage gefördert, die auf

den ersten Blick mit der Annahme, daß die Verteilung der Sterne auf die einzelnen Stufen der absoluten Leuchtkraft überall im Raume dieselbe sei, unverträglich zu sein scheinen. Die wichtigste dieser Tatsachen ist die, daß die Sterne von verschiedenem Spektraltypus verschieden verteilt sind in bezug auf die Milchstraße. Die Zusammendrängung der Sterne gegen die Milchstraße ist am stärksten für die Heliumsterne, die in der Milchstraße 10 mal dichter stehen als am Pole der Milchstraße. Für die Siriussterne ist das Dichteverhältnis Milchstraße zu Pol 2 : 1, für die Sterne des II. Typus, die Harvardklassen F, G, K, etwa 2 : 3 und für die rötlichen Sterne, Klasse M, 5 : 6. Die Wolf-Rayetsterne, Klasse O, finden sich bis auf einige, in den Magellanischen Wolken stehende, ausschließlich in der Milchstraße. Da man in dem Spektraltypus das Merkmal des Entwicklungszustandes der Sterne erblickt, so müßte die erwähnte Tatsache von der größten Bedeutung für den Aufbau des Sternsystems sein, wenn sie nicht durch andere Verhältnisse bedingt ist. In der Tat ist aber der Spektraltypus auch das Charakteristikum des Glühzustandes, also der absoluten Helligkeit der Sterne, und da von der absoluten Helligkeit auch die Entfernung abhängt, bis zu der die Sterne uns wahrnehmbar bleiben, die Dichtigkeit der Sternverteilung in den verschiedenen galaktischen Breiten mit der Entfernung aber verschieden abnimmt, so wird auch die scheinbare Verteilung der Sterne verschiedener absoluter Helligkeit verschieden sein können. In der Tat findet Seeliger bei Annahme gleichmäßiger Verteilung der Sterne nach absoluter Helligkeit eine hinreichende Übereinstimmung der theoretisch berechneten und der beobachteten Sternzahlen für bestimmte Spektralklassen charakterisierende Stufen der absoluten Helligkeiten. Hieraus würde also eine Schwierigkeit nicht entstehen.

Einfluß des Spektraltypus.

Festgehalten ist bislang immer an dem zweiten der S. 539 aufgeführten Gesetze, daß nämlich die scheinbare Helligkeit mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt. Aber auch dieses Gesetz ist nicht unbestritten. Schon Olbers schloß aus dem Widerspruch der Folgerung, daß bei unendlich großer Zahl der Sterne diese den ganzen Himmel bedecken und ihn uns bei völlig ungehinderter Fortpflanzung des Lichtes überall im strahlenden Glanze der Sonne erscheinen lassen müßten, auf eine Absorption des Lichtes im Weltenraum. Die photographischen Daueraufnahmen geben durch die Tatsache, daß ausgedehnte Gebiete am Himmel sich mit leuchtender, dem Auge freilich direkt nicht wahrnehmbarer Materie bedeckt zeigen, eine Stütze für die Annahme einer wenigstens stellenweise wirkenden Absorption, die auch in dieser Beschränkung die Folgerungen aus den Abzählungen entstellen müßte. Die Wirkung einer Absorption des Lichtes würde sich darin zu erkennen geben, daß die scheinbare Helligkeit eines Sternes z. B. auf $^1/_{100}$ gesunken wäre nicht in der 10-fachen Entfernung, sondern schon in einer geringeren, sagen wir etwa der neunfachen Entfernung. Der Helligkeit nach würden also bei Vorhandensein von Absorption die Sterne bis zur Entfernung 9 den Anforderungen entsprechen, die ohne Absorption erst bei der Entfernung 10

Absorption des Lichtes.

erfüllt sein würden. Unsere Abzählungen müßten uns auf zu kleine Zahlen, auf eine zu geringe Dichtigkeit der Sternverteilung, führen, und der Unterschied würde mit der Entfernung immer mehr anwachsen. Statt der gleichförmiger Sternverteilung entsprechenden Verhältniszahl 3.981 der Sternzahlen würden wir eine kleinere erhalten. Es ist nun leicht, einen solchen Betrag der Absorption zu berechnen, daß z. B. für die dem freien Auge sichtbaren Sterne die beobachtete Verhältniszahl der unter Annahme gleichförmiger Verteilung und stattfindender Absorption berechneten gleich wird. Man würde das erreichen durch die Annahme, das Licht verlöre beim Durchlaufen einer Strecke gleich der mittleren Entfernung der Sterne erster Größe 7.3 % seiner Intensität. Dieser Betrag erweist sich aber, wenn wir zu schwächeren Sternen, also größeren Entfernungen übergehen, als viel zu groß. Wir würden zu einer mit den tatsächlichen Verhältnissen ganz unvereinbaren Beschränkung unseres Gesichtskreises gelangen.

Auf Aufnahmen des Himmels, besonders in der Milchstraßengegend, findet man häufig dunkle Stellen oder Streifen, die aussehen wie Löcher oder Unterbrechungen im Sternengrunde. Andererseits sieht man helle Sterne oft eingehüllt in einen dünnen, sehr schwach leuchtenden, oft nur photographisch feststellbaren Nebelschleier. Man gewinnt dadurch die Überzeugung, daß es im interstellaren Raume dunkle Nebelmassen gibt, die uns die dahinter stehenden Sterne verbergen oder ihr Licht schwächen. Das Vorhandensein solcher Nebelmassen ist auch herangezogen zur Erklärung der Beobachtung, daß im Spektrum bewegter Sterne zuweilen einzelne Linien, namentlich die Calciumlinie K, an der Verschiebung der übrigen Linien nicht teilnehmen, was sich dadurch erklären ließe, daß diese Linien nicht in der Sternatmosphäre, sondern in einer vor dem Stern stehenden, relativ zu ihm ruhenden Wolke entstehen. Bislang ist diese Erscheinung allerdings nur bei Sternen eines bestimmten Spektraltypus beobachtet, so daß auch eine andere Ursache vorliegen kann. Ohne Zweifel ist auch der Raum erfüllt mit großen Massen kosmischen Staubes, mit den Produkten der Ausströmungen der Kometen und den aus den Sternatmosphären ausgestoßenen gasförmigen Massen. Daher muß das von den Sternen ausgehende Licht infolge der Lichtzerstreuung eine Art „selektiver Absorption" vortäuschen, die nach physikalischen Gesetzen sich umgekehrt mit der 4. Potenz der Wellenlänge ändert, also für die blauen Strahlen erheblich größer ist als für die roten Strahlen. Je entfernter die Sterne sind, um so mehr müßte also in ihrem Spektrum das Rot vorherrschen. In der Tat lehren die Beobachtungen, daß die Sterne von geringerer scheinbarer Helligkeit im Durchschnitt roter sind als die scheinbar helleren und daß bei Sternen gleicher scheinbarer Helligkeit und gleichen Spektrums die ferneren Sterne roter sind als die näheren. Eine Erklärung wäre gegeben durch selektive Absorption des Lichtes, aber es könnten doch auch noch zwei andere Ursachen mitwirken, nämlich ein Vorwiegen der späteren Typen, der gelben und rötlichen Sterne, unter den schwachen Sternen oder eine Abhängigkeit des

Spektrums von der absoluten Leuchtkraft. Aus der Vergleichung der Spektren stark bewegter, also naher, und schwach bewegter, ferner, Sterne gleicher scheinbarer Helligkeit schloß King auf eine Absorption von 0.00184 Größenklassen für einen Weg von einer Sternweite. Ein Stern 5. Größe würde dann in der Entfernung 10 die scheinbare Helligkeit 5.02 haben, in 100 mal größerer Entfernung würde er statt 15.0. Größe aber 16.84. Größe sein. Auch ein solcher Betrag der Absorption erscheint noch unzulässig groß, und es muß angenommen werden, daß neben der Absorption auch die beiden anderen vorhin angegebenen Ursachen wirksam sind. Neuere Untersuchungen führen auch auf eine Absorption von nur $^1/_{10}$ des eben angenommenen Betrages. Es würde dann erst in 1000 Sternweiten eine Schwächung um 0.2 Größenklassen eintreten; die an der äußersten Grenze des Milchstraßenringes, wie Seeliger ihn bestimmte, stehenden Sterne würden nur um eine Größenklasse geschwächt werden. Aber auch in dieser Größe würde die Wirkung hinreichend sein, um zu verhindern, daß durch das Licht von einem anderen Sternsystem Kunde zu uns gelangte. Auch daraus, daß der Farbenindex bei den Sternen der kugelförmigen Sternhaufen, deren Entfernung nach Zehntausenden von Sternweiten zu berechnen ist, dasselbe Verhalten zeigt, daß also in diesen fernen Sternsystemen das Zahlenverhältnis der blauen und roten Sterne das gleiche ist wie bei den Sternen in unserer Nähe, ist auf eine verschwindende Extinktion zu schließen. Bei merklicher Extinktion müßten hier Werte des Farbenindex auftreten, die um mehrere Größenklassen größer wären als die normalen Werte, die roten Sterne also stark überwiegen. Die von Shapley bei den kugelförmigen Sternhaufen gefundenen tatsächlichen Verhältnisse erscheinen nur vereinbar mit einer Extinktion des Lichtes von weniger als 0.00001^m für eine Sternweite. Das aus einer Entfernung von 1000 Sternweiten, nach einer Lichtzeit von 3258 Jahren zu uns gelangende Licht hätte noch nicht 1% an Intensität eingebüßt.

VI. Die Bewegungen. Newtons Entdeckung der allgemeinen Gravitation gab den Anstoß zu einer grundsätzlichen Änderung unseres Standpunktes gegenüber dem Universum. Das Prinzip der Unveränderlichkeit, als dessen Verkörperung von alters her der sternenbesäte Himmel gelten durfte, war unhaltbar geworden. Wo Gravitation, da ist auch Bewegung. Erblicken wir in jedem der zahllosen Sterne des Firmamentes den Sitz einer anziehenden Kraft, deren Wirkung sich auch auf die Sonne erstreckt, so scheint jeder feste Boden zu schwinden, es scheint unmöglich, das Spiel der unermeßlich großen Zahl der auf die Sonne wirkenden Kräfte zu überschauen und das schließliche Resultat ihrer vereinten Wirkung, die resultierende Bewegung der Sonne, auch nur für einen Moment vorauszusehen. In der Tat würde es einen Ausweg aus der Schwierigkeit kaum geben, wenn nicht der großen Zahl der aufeinander wirkenden Massen ihre ungeheuren gegenseitigen Entfernungen gegenüberständen. Diese bewirken, daß uns die kosmischen Bewegungen der Sterne unter so außerordentlich kleinem

Größenordnung der Eigenbewegungen.

Winkel erscheinen, daß sie überhaupt erst nach Ablauf längerer Zeiträume erkennbar werden. Halley war der erste, der sie bei der Vergleichung seiner Breitenbestimmungen mit denen des Altertums, wie sie von Ptolemäus überliefert waren, bei mehreren Sternen wahrnahm; den so sehr verfeinerten Hilfsmitteln der Neuzeit sind sie oft schon im Zeitraum einiger Jahre zugänglich. Jedenfalls aber folgt aus der Beobachtung, daß die resultierenden Bewegungen verschwindend klein sind gegenüber den Entfernungen der Sterne und daß wir berechtigt sind, sie innerhalb des von uns zu überblickenden Zeitraums von zwei Jahrtausenden als gleichförmig und geradlinig zu betrachten, und ihre etwaigen Gesetze zu ergründen versuchen dürfen, ohne uns vor der Hand über ihre Entstehung Rechenschaft zu geben.

Deutung der Eigenbewegungen.

Drei Möglichkeiten konnten vorliegen: entweder die Bewegung der Sonne ist klein und das, was wir beobachten, ist eine Bewegung der Fixsterne selbst, oder das andere Extrem: eine weit überwiegende in den Beobachtungen fast ausschließlich zur Geltung kommende Bewegung der Sonne, so daß sich also die Bewegung der Sterne hauptsächlich aus ihrer säkularen Parallaxe (S. 520) erklären würde, oder die dritte Möglichkeit: Sonnenbewegung und Spezialbewegung der Sterne von gleicher Größenordnung. Der zweite Fall, die reine parallaktische Bewegung, bietet sich am leichtesten der Erklärung dar. Eilen wir mit großer Geschwindigkeit durch einen Wald, so scheinen die vor uns in der Richtung unserer Bewegung stehenden Bäume auseinanderzurücken, sich von dem Zielpunkte unserer eigenen Bewegung fortzubewegen, und umgekehrt die hinter uns liegenden Bäume scheinen sich alle auf den Punkt, auf den unsere eigene Bewegung rückwärts verlängert trifft, hin zu bewegen. Die scheinbaren Bewegungen der Sterne müßten also im Fall 2 sämtlich vom Zielpunkte der Sonnenbewegung, dem „Apex", ausgehen, sie müßten im gegenüberliegenden Punkte der Sphäre, dem „Antiapex", wieder zusammenlaufen. Ganz die gleiche Erscheinung würde freilich auch im Falle 1 eintreten, wenn die Sternbewegungen in der gleichen Richtung untereinander parallel erfolgen. Der Anblick würde ähnlich sein dem einer aus sehr großer Entfernung auf uns zu kommenden und an uns vorübereilenden Reiterschar. Von einem Punkte ausgehend, würden die einzelnen Reiter immer weiter auseinanderrücken, bis sie uns erreicht haben, um dann wieder gegen einen Punkt sich zusammenzudrängen. Die Bedeutung der beiden Strahlungspunkte wäre aber die entgegengesetzte wie vorhin. Der Zielpunkt der Bewegungen wäre der Zielpunkt der Richtung der gemeinsamen Bewegung der Sterne, wir nennen ihn den Vertex, der Ausgangspunkt wäre der Antivertex.

W. Herschels Apexbestimmung.

Überlegungen dieser Art bildeten den Stützpunkt, von dem aus W. Herschel gegen Ende des 18. Jahrhunderts das Problem angriff, und sie haben ihn schon zu einer im wesentlichen richtigen Lösung der Frage der Sonnenbewegung geführt, obwohl in Wirklichkeit nicht die oben unter 1 und 2 dargelegten einfachen Verhältnisse, sondern vielmehr der dritte Fall gleicher Größenordnung der Bewegung der Sonne und der Spezialbewegungen der

Sterne vorlag, so daß die beobachteten Bewegungen, die aus diesen beiden Komponenten als Resultierende entstehen, im allgemeinen nicht auf den Antiapex gerichtet sind. Während die parallaktischen Bewegungen rückwärts verlängert sich sämtlich im Apex schneiden würden, werden die Eigenbewegungen an demselben je nach der Größe der Spezialbewegungen im Verhältnis zur parallaktischen Bewegung mehr oder weniger weit vorübergehen. Immerhin werden aber die Schnittpunkte solcher Bewegungen, bei denen die Spezialbewegung klein ist gegenüber der parallaktischen Bewegung, in der Nähe des Apex liegen. Eine wirkliche Bestimmung der Lage des Apex aus den Schnittpunkten der Eigenbewegung ist indes nur möglich auf Grund einer bestimmten Hypothese über das Verhalten der Spezialbewegungen. Eine allen Sternen gemeinsame Bewegung und eine davon verschiedene Sonnenbewegung würde zu Eigenbewegungen führen, die sich wieder sämtlich in einem Punkte schneiden müßten. Dieser Punkt wäre weder der Antiapex noch der Vertex, sondern ein auf dem größten diese beiden Punkte verbindenden Kreise liegender Punkt, der vom Antiapex um so mehr abstehen würde, je größer die gemeinsame Bewegung der Sterne im Verhältnis zur Sonnenbewegung ist. Das Material, das Herschel zur Verfügung stand, ließ einen solchen gemeinsamen Schnittpunkt der Bewegungen nicht erkennen, wohl aber eine Anhäufung von Schnittpunkten je zweier Bewegungen in einer bestimmten Gegend an der Sphäre. Unter der hiernach vorläufig gerechtfertigt erscheinenden Annahme, daß in den Spezialbewegungen der Sterne eine bestimmte Gesetzmäßigkeit nicht walte, daß sie regellos seien nach Größe und Richtung, und daß sie demnach die Eigenbewegungen wie zufällige Fehler beeinflußten, bestimmte er jenen Punkt der Sphäre, der die Gesamtheit der eingezeichneten Bewegungen möglichst gut darstellte, indem er den einzelnen Bewegungen so nahe wie möglich lag. Diesen Punkt, der nahe bei η Herculis liegt, betrachtete Herschel als den Zielpunkt, den Apex, der Sonnenbewegung. Die Herschelsche, auf der Voraussetzung der Regellosigkeit der Spezialbewegungen beruhende Methode ist von einer ganzen Reihe von Forschern zur Bestimmung der Sonnenbewegung angewandt worden, nachdem Argelander sie in eine für die Behandlung einer großen Zahl von Sternen, wobei Herschels konstruktive Lösung nicht mehr durchführbar war, geeignete Form gebracht hatte. Er ging dabei aus von einer als genähert richtig betrachteten Lage des Apex, berechnete die Abstände desselben von den einzelnen Richtungen und die Abhängigkeit dieser Abstände von Änderungen der Koordinaten des Apex und bestimmte dann solche Werte dieser Änderungen, die die Summe der Quadrate der Abstände so klein wie möglich machten. Eine andere von Airy stammende Methode der Rechnung besteht darin, daß man die parallaktischen Bewegungen in den beiden Koordinaten darstellt als Funktion der rechtwinkligen Komponenten der Sonnenbewegung, ausgedrückt in Teilen der als konstant betrachteten Entfernung der Sterne, und nun jene Werte der Komponenten der Sonnenbewegung bestimmt, die die

Argelander.

Airy.

beobachteten Bewegungen möglichst gut darstellen. Man erhält durch diese Methode die Richtung und auch den linearen, in Einheiten der mittleren Entfernung der bei der Rechnung benutzten Sterne ausgedrückten Betrag der Sonnenbewegung.

Die Resultate, die nach diesen beiden Methoden sich ergaben, zeigten nun eine dem Charakter der in Frage kommenden Verhältnisse nach als ziemlich befriedigend zu betrachtende Übereinstimmung. Sie gruppierten sich um einen Punkt mit etwa den Koordinaten $\alpha = 267^0$, $\delta = +30^0$. Von den neueren in dieser Richtung liegenden Resultaten sei noch das von L. Boss aus seinem 1910 publizierten Kataloge abgeleitete angeführt. Der Katalog enthält 6188 über den ganzen Himmel verteilte hellere Sterne, für die meistens genaue Positionen aus früherer Zeit vorlagen, sodaß eine zuverlässige Bestimmung der Eigenbewegung erwartet werden durfte. Boss fand als Koordinaten des Zielpunktes der Sonnenbewegung $\alpha = 270^0.5$, $\delta = +34^0.3$, geltend für 1875.0.

Die Positionen der Sterne beziehen sich, wie früher erwähnt, auf ein rechtwinkliges Achsensystem, dessen Grundebene der Äquator ist und dessen eine Achse auf den Frühlingspunkt zielt. Aus der Gestalt der Erde und der auf sie durch die anderen Massen ausgeübten Anziehung ergab sich eine Präzession. Bewegung dieses Systems, die Präzession. Daher sind die Bestimmungen der Eigenbewegungen und der Sonnenbewegung untrennbar verknüpft mit der Aufgabe der Bestimmung der Präzessionskonstante, deren Verbesserung gleichfalls in die Bedingungsgleichungen für eine möglichst nahe Darstellung der beobachteten Eigenbewegungen aufzunehmen ist. Die schließlich angenommene Sonnenbewegung bezieht sich also auf ein Achsensystem, dessen Bewegung derjenigen der Gesamtheit der benutzten Sterne folgt. Anfangs waren das nur die helleren Sterne, nach und nach erstreckten die Beobachtungen sich auf immer schwächere Sterne, und da deren Zahl ja verhältnismäßig immer mehr überwiegt, je mehr das benutzte Material anwächst, geben die lichtschwachen sehr entfernten Sterne, bei denen die Wirkung der Sonnenbewegung sehr klein ist, immer mehr den Ausschlag. Zwischen Schwache Sterne. den aus den helleren und den aus den schwachen Sternen abgeleiteten Resultaten für den Ort des Apex besteht nun keine volle Übereinstimmung. Die Deklination des Apex wird um so größer gefunden, je schwächer die zur Rechnung benutzten Sterne sind. Der Grund läßt sich, da das Material für die schwachen Sterne noch zu lückenhaft ist, noch nicht angeben. Ein Versuch Comstocks, aus sehr schwachen Sternen, deren Eigenbewegung er, Arbeiten O. Struves und Winneckes fortführend, durch Anschluß an nahe helle Sterne bekannter Eigenbewegung bestimmte, einen für Sterne der mittleren Helligkeit 11^m geltenden Zielpunkt abzuleiten, scheiterte an systematischen Fehlern der Beobachtungen. Das von Wolf mit Hilfe des Stereokomparators gesammelte Material (vgl. S. 516) umfaßt schwache Sterne von größerer Eigenbewegung; es beschränkt sich also wesentlich auf Sterne von geringer Masse in der Nachbarschaft der Sonne. Eine Bearbeitung der an

23 ziemlich gleichmäßig über den nördlichen Himmel verteilten Stellen gefundenen Eigenbewegungen durch Wirtz und Hügeler ergab einen Zielpunkt in $\alpha = 294^0$, $\delta = +32^0$, also eine Verschiebung um 20^0 in der Richtung der Rektaszension. Für den Südhimmel fand Wirtz aus einem gleichfalls durch Vergleichung photographischer, 16 bis 17 Jahre auseinander liegender Aufnahmen gewonnenen Material als Koordinaten des Apex aus Sternen 8. bis 13. Größe $\alpha = 278^0$, $\delta = +41^0$. Die Lage des Zielpunktes scheint auch durch den Spektralcharakter beeinflußt zu werden. Die Sterne der späteren Typen G, K, M ergeben einen um etwa 10^0 in Deklination nördlicher liegenden Zielpunkt als die Sterne der früheren Typen. Der innere Zusammenhang dieser Verschiebungen des Apex bedarf noch der Aufklärung.

Alle nach diesen Methoden bestimmten Positionen des Zielpunktes der Sonnenbewegung haben das wesentliche Merkmal, daß sie längs des Nordrandes der Milchstraße über einen Raum von etwa 30^0 Längsausdehnung verteilt liegen. Nur der Zielpunkt der Wolfschen Sterne liegt ganz nahe der Mitte der Milchstraße. Die Bewegung des Sonnensystems erfolgt also in der Ebene der Milchstraße, über die Richtung besteht aber noch eine Unsicherheit im Betrage von etwa 10^0.

Der wesentliche Unterschied der Argelanderschen und der Airyschen Behandlung des Problems der Sonnenbewegung ist der, daß jener nur die Richtungen der Bewegungen, nicht ihre Größe mitsprechen läßt, also die durch die Beobachtungen gelieferten Daten nicht voll ausnutzt, während dieser, um die scheinbaren Bewegungen auch ihrer Größe nach darzustellen, die Kenntnis der Entfernung der einzelnen Sterne braucht, was nur auf dem Wege über unsichere Hypothesen erreichbar ist. Wenn die Übereinstimmung der Resultate beider Wege nun auch die hieraus sich ergebenden Bedenken zu zerstreuen scheint, so muß doch die so erlangte Bestimmung der Größe der Sonnenbewegung immer noch von zweifelhaftem Werte sein. Das Spektroskop in Verbindung mit der Photographie gab uns nun aber ein weiteres wichtiges Hilfsmittel zur Lösung der Frage in den Radialbewegungen, den Bewegungen von uns weg oder auf uns zu. Da diese Bewegungen direkt ausgedrückt in einer irdischen Einheit, etwa Kilometern, erhalten werden, so fällt aus ihrer Darstellung durch die Hypothese einer Sonnenbewegung die Entfernung ganz heraus. Nehmen wir eine auf einen bestimmten Punkt gerichtete Sonnenbewegung von bestimmter Größe an, projizieren dieselbe auf die Visionsrichtung nach einem gegebenen Sterne, so sollte der erhaltene Betrag mit der Radialbewegung dieses Sternes übereinstimmen, falls Spezialbewegungen nicht vorhanden wären. Betrachten wir diese wieder als regellos, so bestimmt die möglichst gute Darstellung der beobachteten Radialbewegungen wieder Richtung und Größe der Sonnenbewegung, letztere jetzt aber gänzlich unabhängig von Hypothesen über die Sternentfernungen. Das zuverlässigste in dieser Richtung jetzt vorliegende Resultat stammt von W. W. Campbell und beruht auf 1180 Sternen und 13 gleichfalls beobachteten Nebeln beider

Radialbewegungen.

Campbells Bestimmung.

Hemisphären. Für den Zielpunkt der Sonnenbewegung findet Campbell $\alpha = 268^0.5$, $\delta = +25^0.3$ und für die Größe der Bewegung 19.5 km in der Sekunde. Die Sonnenbewegung ist hiernach eine Größe gleicher Ordnung wie die Bewegungen der Planeten in unserem Sonnensystem: Die Erde legt auf ihrer Bahn um die Sonne in der Sekunde einen Weg von 30 km, Merkur einen solchen von 48 km, Neptun von 5 km zurück.

Frei von jeder Hypothese können wir die Bewegung eines Sternes relativ zur Sonne berechnen, wenn wir seine Parallaxe, seine seitliche Eigenbewegung und seine Radialbewegung kennen. Wir berechnen dann mit Hilfe der Parallaxe den linearen Betrag der senkrecht zur Gesichtslinie liegenden Komponente der Bewegung, verbinden diese mit der in die Gesichtslinie fallenden Komponente und erhalten als Resultante beider die totale relative Bewegung nach Größe und Richtung. Wegen der Schwierigkeit der Parallaxenbestimmung kann dieser Weg nur für die nähere Umgebung der Sonne zur Ausführung kommen, er wird uns mit der Zeit aber für diesen begrenzten Bereich die lückenlose Kenntnis der Anordnung und der Bewegung der einzelnen Massen verschaffen. Gyllenberg fand nach dieser Methode, daß relativ zu der Gesamtheit der 144 Sterne, die der Rechnung zugrunde lagen, die Sonne sich mit 20.0 km in der Sekunde Geschwindigkeit auf den Punkt $\alpha = 277^0.1$, $\delta = +34^0.0$ bewegt.

Totale Bewegungen.

Spezialbewegungen.

Hiernach konnte man die Richtung der Sonnenbewegung als mit hinreichender Sicherheit festgestellt betrachten und war imstande, die beobachteten Eigenbewegungen in zwei Teile, eine auf den Antiapex gerichtete Komponente und die dazu senkrechte, durch die Spezialbewegungen erzeugte Komponente zu zerlegen. Das Studium dieser zweiten Komponente mußte zeigen, ob die Voraussetzung der Regellosigkeit dieser Spezialbewegungen erlaubt sei, oder ob zwischen diesen Bewegungen Gezetze beständen, die einen physischen Zusammenhang von Sterngruppen zu besonderen Systemen oder eine Gesamtbewegung des Sternsystems wahrscheinlich machten. Für einzelne Sterngruppen, so die Plejaden, die Hyaden, die hellen Sterne im Großen Bären, macht der bloße Anblick schon eine engere Zusammengehörigkeit wahrscheinlich, und die Parallelität der Eigenbewegung oder die Gleichheit der Radialbewegungen, wie im Falle der hellen Sterne des Orion, trat hier als weiteres Beweismittel hinzu;

Sternscharen.

bei anderen Gruppen, den sogenannten star-drifts, auf die zuerst von Proctor hingewiesen wurde und von denen die im Stier, die im Perseus, die 61 Cygni-Gruppe und die die Bärensterne selbst mit umfassende Ursa major-Gruppe als die wichtigsten hervorgehoben seien, sprach nur die Gleichheit der Bewegungen für eine solche Zusammengehörigkeit und demnach gegen die Annahme der Regellosigkeit der Spezialbewegungen. Andererseits legt das Vorhandensein der Milchstraße und der offenbar gesetzmäßigen Anordnung der Sterne gegenüber dieser Grundebene den Gedanken nahe, daß die Bewegungen der Fixsterne in Beziehung zu dieser Ebene ständen. Eine Prüfung dieser Annahme führte Schönfeld aus, indem er versuchte,

die Bewegungen darzustellen als Gesamtergebnis einer fortschreitenden Bewegung der Sonne und einer Rotation des ganzen Sternsystems um eine zur Ebene der Milchstraße senkrechte Achse. Die Hypothese führte aber nicht zu einer genügenden Erklärung der Spezialbewegungen.

Es war also erforderlich, auf ein genaueres Studium der Spezialbewegungen einzugehen. Eine notwendige Folgerung aus der Voraussetzung der Regellosigkeit der Spezialbewegungen ist die, daß eine Abweichung nach der linken Seite von der Richtung auf den Antiapex genau ebenso wahrscheinlich sein muß wie eine Abweichung nach der rechten Seite. Bezeichnen wir die erstere Abweichung als positiv, die andere als negativ, so müßte die Anzahl der positiven und der negativen Abweichungen gleich sein. Das ist aber nicht der Fall, vielmehr stellte sich zuerst bei einer Untersuchung der Bewegungen im neuen Auwersschen Kataloge der Bradleyschen Sterne ein erhebliches Überwiegen der positiven Abweichungen heraus, wenn man den Zielpunkt der Sonnenbewegung wie oben annahm. Man kann nun die Richtung einer Bewegung an der Sphäre in einfachster Weise dadurch festlegen, daß man den Pol des größten Kreises bestimmt, auf dem die Bewegung erfolgt. Für alle Bewegungen, die auf einen Punkt der Sphäre gerichtet sind, also für alle größten Kreise, die sich in diesem einen Punkte und dem ihm gegenüberliegenden an der Sphäre durchschneiden, werden diese Pole selbst wieder auf einem größten Kreise liegen, der vom Zielpunkte der Bewegungen 90^0 absteht. Hiernach müßten die Pole der parallaktischen Bewegung der Sterne auf einem größten Kreise liegen, der vom Zielpunkte der Sonnenbewegung 90^0 absteht. Wir nennen ihn den parallaktischen Äquator. Die Pole der Eigenbewegungen, in denen die parallaktische Bewegung sich mit der Spezialbewegung zusammengesetzt hat, würden dadurch aus dem parallaktischen Äquator herausgerückt sein, dieser würde aber bei regelloser Verteilung der Spezialbewegungen die Mittellinie der Zone bleiben, über die die Pole verteilt sind. Eine nach diesen schon von Bessel angegebenen Prinzipien von Kobold ausgeführte Untersuchung ergab nun, daß ein parallaktischer Äquator allerdings vorhanden ist, daß er aber nicht den oben erhaltenen Koordinaten des Zielpunktes der Sonnenbewegung entspreche, sondern eine gemeinsame Bewegung der Sterne auf einen Punkt in $\alpha = 266^0.5$, $\delta = +3^0.5$ andeute. Vergleicht man die Richtungen der Bewegungen mit der Richtung auf diesen Punkt hin, so ergibt sich eine nahe Gleichheit der Anzahlen der positiven und negativen Abweichungen, also die Erfüllung der Forderung, von der wir ausgingen, zugleich aber noch eine andere Tatsache. Wäre nur die Sonnenbewegung vorhanden, so müßten alle Bewegungen auf den Antiapex gerichtet sein; die Spezialbewegungen ändern die Richtung, es könnte aber eine Bewegung auf den dem Antiapex gegenüberliegenden Punkt, den Apex, nur entstehen bei Sternen, die eine der Sonnenbewegung genau parallel erfolgende, sie an Größe übertreffende Bewegung besitzen. Es ergab sich nun in der Tat, daß neben den auf den vorhin angegebenen

Kobolds Untersuchungen.

Punkt gerichteten Bewegungen eine erhebliche Zahl von Bewegungen vorhanden sei, die auf den gegenüberliegenden Punkt gerichtet waren, und das führte Kobold zu der Annahme, die Sonne bewege sich mit den Sternen ihrer Umgebung in derselben Richtung, aber mit verschiedener Geschwindigkeit, hinter der Mehrzahl zurückbleibend, aber eine beträchtliche Zahl doch auch überholend.

Durch diese Untersuchungen war die Annahme der Regellosigkeit der Spezialbewegungen unhaltbar geworden, und es war damit der Anstoß gegeben, daß auch andere Forscher nach einer von dieser Annahme freien Darstellung der beobachteten Bewegungen suchten. Einen ersten erfolgreichen Versuch auf graphischem Wege machte Kapteyn, indem er den Himmel in 28 Felder einteilte und in jedem dieser Felder ein graphisches Bild der Verteilung der Bewegungsrichtungen in bezug auf die Richtung nach dem in $\alpha = 275^0$, $\delta = +30^0$ angenommenen Apex konstruierte. Er fand dabei, daß diese Verteilung durchaus nicht symmetrisch in bezug auf die Richtung nach dem Apex sei, wie zu fordern war, wenn die systematischen Bewegungen gesetzlos wären. In allen einzelnen Feldern traten zwei Vorzugsrichtungen der Bewegungen auf, sie fallen aber in den verschiedenen Feldern auf verschiedene Richtungen. Verlängert man diese Richtungen vom Mittelpunkte der Fläche, für die sie gelten, aus, so schneiden sie sich in zwei Punkten der Sphäre, natürlich nicht streng, sondern nur genähert. Hieraus folgt, daß die scheinbaren Bewegungen der Sterne in zwei Vorzugsrichtungen erfolgen, daß zwei Sternschwärme vorhanden sind, deren einer sich relativ zur Sonne auf einem Punkt 7^0 nördlich von α Orionis zu bewegt, während der andere auf einen Punkt 2^0 südlich von η Sagittarii gerichtet ist. Die beiden Punkte liegen in der Milchstraße, aber nicht genau gegenüber, sondern in einem Abstande von 140^0. Es handelt sich nun um die Erklärung dieser Tatsache. Die einfachste Annahme wäre die, daß wir unsere Sonne als ruhend betrachteten und zwei sich in den beiden bezeichneten Richtungen bewegende Sternschwärme voraussetzten. Wir würden damit der Sonne aber eine bevorzugte Stellung einräumen, und deshalb scheint diese Annahme unberechtigt. Wahrscheinlicher ist die Annahme, daß der Gesamtheit der Sterne eine Bewegung in einer bestimmten Richtung innewohne und daß die Sonne eine davon verschiedene Bewegung habe. Die beiden Richtungen wären dann die scheinbaren Bewegungsrichtungen, die als Resultante der Sonnenbewegung und der beiden entgegengesetzten Richtungen der Sternbewegungen sich ergeben. Nehmen wir die Richtung der Sonnenbewegung als durch die älteren Methoden bestimmt an, so würden wir (Fig. 36) aus den drei Richtungen SV_1, SV_2 und SA, die alle drei in der Ebene der Milchstraße liegen, die Richtung der absoluten Sternbewegungen bestimmen können, sobald wir über das Verhältnis der Größe der Bewegungen, etwa durch die beobachteten Radialgeschwindigkeiten, eine Kenntnis hätten.

Kapteyns Zweischwarmhypothese.

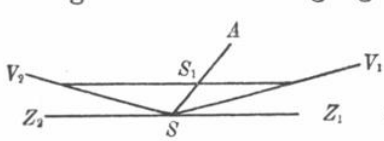

Fig. 36.

Wir können uns aber unter der durch die Beobachtung gerechtfertigten Annahme, daß die Zahl der Sterne beider Schwärme gleich sei, auch auf den Standpunkt eines ruhenden Beobachters dadurch stellen, daß wir den Sternen gleichgroße Bewegungen in den beiden diametralen Richtungen erteilen, also auf SV_1 und SV_2 gleiche Stücke abschneiden. Dann ergibt sich durch Z_1Z_2 die Richtung der Bewegung der Sterne und durch SS_1 die Sonnenbewegung. Nach Kapteyn zielt die Richtung Z_1Z_2 auf den Punkt $\alpha = 271^0$, $\delta = -13^0$. Nach den Beobachtungen wäre anzunehmen, daß die Verteilung der Sterne auf die beiden Ströme überall am Himmel etwa die gleiche sei. Die beiden Ströme scheinen sich auch nicht durch die Sternhelligkeiten oder durch das Spektrum oder durch die Größe der mittleren Bewegung zu unterscheiden.

Eddingtons Theorie.

Diese Zweischwarmtheorie ist von Eddington weiter ausgebaut und der strengeren Rechnung zugänglich gemacht. Wenn bei den über eine bestimmte Fläche am Himmel verteilten Sternen sich eine allen Sternen gemeinsame Bewegung verbindet mit einer den einzelnen Sternen eigentümlichen, gesetzlos erfolgenden Bewegung, so entspricht der entstehenden Verteilung der Bewegungen ein ganz bestimmtes Bild. Tragen wir die Bewegungen von einem Punkte aus in der ihnen zukommenden Richtung ab und verbinden die Endpunkte dieser Radien, so entsteht eine Ellipse, deren Lage durch die Richtung der gemeinsamen Bewegung und deren Gestalt durch das Verhältnis der Größen der gemeinsamen und der mittleren eigentümlichen Bewegung bestimmt ist. Sind in den Bewegungen zwei Vorzugsrichtungen wirksam, so entspricht der Verteilung der Bewegungen eine durch die Überlagerung zweier solcher Ellipsen entstehende Figur, und wir müssen durch Drehung zweier Ellipsen gegeneinander und durch Änderung ihrer Elliptizitäten in der Lage sein, ein der tatsächlich beobachteten Verteilung entsprechendes Bild zu konstruieren und so die beiden Vorzugsrichtungen und die Größe der mittleren Spezialbewegung und die der gemeinsamen Strombewegung im Verhältnis zur Sonnenbewegung bestimmen können.

Die Vorstellung zweier einander so völlig gleicher, sich durchdringender Sternströme läßt sich vielleicht schwer mit mancherlei Tatsachen vereinigen. Vor allen Dingen spricht die sicher nachgewiesene gesetzmäßige Verteilung der Sterne in bezug auf die Milchstraße, welche für die Einheitlichkeit des Sternsystems zeugt, gegen dieselbe. Trotz der guten Darstellung der beobachteten Tatsachen, die diese Hypothese ergibt, wird man doch lieber an der einfacheren und natürlicheren Vorstellung nur einer gemeinsamen Bewegung der Gesamtheit der Sterne neben der Sonnenbewegung festhalten.

Schwarschilds Hypothese.

Eine auf dieser Grundlage aufgebaute Hypothese hat Schwarzschild ausgestaltet. An die Stelle der alten Hypothese der Regellosigkeit der Spezialbewegungen der Sterne setzt er die Annahme, daß diese Bewegungen eine bestimmte Richtung bevorzugen, daß aber die zu dieser Vorzugsrichtung senkrechte Komponente der Bewegungen den Charakter zufälliger Fehler habe, also keine Richtung bevorzuge und meist von geringer Größe sei.

Tritt zu den so charakterisierten Spezialbewegungen der Sterne nun die durch die Sonnenbewegung erzeugte parallaktische Komponente hinzu, so lassen sich die beiden ausgezeichneten Richtungen, nämlich die nach dem Antiapex und die nach dem Vertex, die Vorzugsrichtung der Spezialbewegungen, dadurch erkennen, daß in bezug auf die Richtung nach dem Antiapex die Bewegungen symmetrisch verteilt sein müssen, d. h. eine gleiche Anzahl auf beiden Seiten dieser Richtung liegen muß, während in bezug auf die Richtung zum Vertex die Bedingung erfüllt sein muß, daß auf jeder Seite dieser Richtung das Verhältnis der dem Vertex zugewandten und der abgewandten, nach der Seite des Antivertex liegenden Bewegungen das gleiche sein muß. Ordnen wir die Richtungen nach dem Winkel, den sie mit der Vorzugsrichtung bilden, und zählen die in die vier Quadranten fallenden Richtungen, so ist, wenn n_1, n_2, n_3, n_4 die erhaltenen Zahlen sind, für die Richtung nach dem Antiapex $n_1 + n_2 = n_3 + n_4$ und für die Richtung nach dem Vertex $n_1 : n_2 = n_4 : n_3$. Verschiedene Berechnungen nach dieser Hypothese führten im Mittel auf die Werte: Apex $\alpha = 269^0$, $\delta = +32^0$, Vertex $\alpha = 93^0$, $\delta = +8^0$. Die mittlere Geschwindigkeit der Bewegung in der Richtung nach dem Vertex ergibt sich zu 28 km. Eine Untersuchung der Radialbewegungen ließ auch in diesen die beiden Vorzugsrichtungen erkennen, aber nicht so deutlich, wie zu erwarten war. Der Grund davon lag aber nicht in einem Versagen der Hypothese oder in einem anderen Verhalten dieser Bewegungen als vielmehr darin, daß bei den ersten Anwendungen die Auswahl der der Bestimmung der Radialbewegungen zugänglichen Sterne auf die helleren Sterne beschränkt war, wodurch besondere Verhältnisse bedingt sind, wie wir noch sehen werden.

Dreischwarmhypothese.

Geben diese Hypothesen nun auch die charakteristischen Züge der beobachteten Sternbewegungen wieder, so können wir uns mit ihrer Hilfe doch noch kein Bild von den Ursachen und dem Zusammenhange der Bewegungen machen, und es bedarf noch des tieferen Eindringens in die Einzelheiten, um das Bild zu vervollständigen. Einzelne solche Züge haben die Forschungen der jüngsten Zeit schon zutage gefördert. So wurden Hough und Halm durch Gegenüberstellung der berechneten relativen Bewegung aus den Sternen nördlich von der Milchstraße und den südlich von derselben zu der Erkenntnis geführt, daß der eine der beiden scheinbaren Sternströme sich über den ganzen Himmel gleichförmig verhält, während der andere auf beiden Hemisphären verschieden auftritt. Sie fanden eine Erklärung in der Annahme eines dritten Sternstromes oder vielmehr Sternschwarmes, der von den beiden anderen dadurch ausgezeichnet ist, daß er relativ zu ihnen in Ruhe ist. Zu diesem dritten Sternschwarme gehörten besonders die Orionsterne, die sich in der Tat den anderen beiden Strömen nicht leicht einordnen ließen.

Verhalten der verschiedenen Spektralklassen.

Ein ganz neuer Zug kam aber durch die Diskussion der Spezialbewegungen der Sterne in bezug auf ihren Spektralcharakter zutage. Man machte zuerst die Wahrnehmung, daß die Sterne vom Heliumtypus sich durch außergewöhnlich kleine Bewegungen, sowohl im Visionsradius wie senkrecht da-

zu, auszeichnen und an der Zweischwarmbewegung nicht teilnehmen. Die Heliumsterne zeigen, wie früher schon erwähnt, eine starke Zusammendrängung in der Milchstraße. Die kleine Bewegung senkrecht zur Gesichtslinie bei beträchtlicher scheinbarer Helligkeit läßt auf eine große Entfernung und auf eine große absolute Helligkeit dieser Sterne schließen. Es sind Sterne im höchsten Glutzustande in den äußersten Regionen des Sternsystems, deren intensives Licht aber doch bis zu uns dringt. Bei den Radialgeschwindigkeiten, bei denen die Entfernung keine Rolle spielt, ist man ohne eine Hypothese in der Lage dadurch, daß man die beobachteten Bewegungen vom Einflusse der bekannten Sonnenbewegung befreit, den dem Sterne selbst anhaftenden Teil der Bewegung zu berechnen. Bei den seitlichen Eigenbewegungen erreicht man das gleiche Ziel auf einem Umwege. Man zerlegt die beobachteten Eigenbewegungen in eine nach dem Antiapex gerichtete und eine dazu senkrechte Komponente. Unter der Voraussetzung, daß die Spezialbewegungen der Sterne nach allen Richtungen gleich wahrscheinlich und durchschnittlich von gleicher Größe sind, verschwindet für die Sterne eines bestimmten, nicht zu ausgedehnten Areals am Himmel im Mittel der in die Richtung nach dem Antiapex fallenden Komponenten der Einfluß der Spezialbewegungen. Wir können den so bestimmten Mittelwert als das Spiegelbild der Sonnenbewegung für den Mittelpunkt des betreffenden Himmelsareals betrachten und nach dem einfachen Gesetze, nach dem die Größe dieses Spiegelbildes vom Werte null im Apex und Antiapex bis zu seinem Maximalwerte in 90^0 Abstand vom Apex und Antiapex wächst, diesen Maximalwert, d. h. den Winkel, unter welchem die Sonnenbewegung aus der mittleren Entfernung der Sterne, senkrecht gesehen, erscheint, berechnen. Unter der gleichen Voraussetzung ist aber das Mittel der anderen Komponenten, wenn wir es, ohne Rücksicht darauf, ob die Bewegung nach rechts oder nach links von der parallaktischen Sonnenbewegung fällt, bilden, die mittlere Spezialbewegung der Sterne in der Richtung senkrecht zur parallaktischen Bewegung von uns aus gesehen. Im Verhältnis der Werte der beiden Komponenten haben wir auch das Verhältnis der Sonnenbewegung zur Sternbewegung, beide in Bogenmaß ausgedrückt. Da wir die Sonnenbewegung auch in linearem Maße kennen, erfahren wir durch Multiplikation mit dieser Verhältniszahl auch die Größe der Sternbewegung in linearem Maße, geltend für die bestimmte Richtung senkrecht zur parallaktischen Bewegung. Aus der mittleren Radialbewegung sowohl, als auch aus der so berechneten mittleren Bewegungskomponente senkrecht zur Apexrichtung können wir aber ferner auch die wahre totale mittlere Bewegung der Sterne berechnen, da nach einem zuerst von Kleiber bewiesenen Satze der Mittelwert jeder dieser Komponenten gleich der Hälfte der mittleren totalen Bewegung ist. Die erhaltenen Zahlen sind in folgender Tabelle zusammengestellt (S. 556).

Die Vergleichung der beiden in Spalte 5 angegebenen Werte der linearen und der in Bogenmaß ausgedrückten, zur Apexrichtung senkrechten

Typus Vogel	Typus Pickering	Mittlere Bewegung im Visionsradius (Campbell)	Mittlere Bewegung parallaktische (L. Boss)	Mittlere Bewegung senkrecht zur Apexrichtung (L. Boss)	Mittlere Bewegung total	Mittlere Parallaxe L. Boss	Mittlere Parallaxe Campbell	Mittlere Entfernung (Campbell) Sternweiten	Mittlere Entfernung (Campbell) Lichtjahre
I	B	6.3 km	0″.0273	0″.0086 = 6.3 km	12.6 km	0″.0066	0″.0076	132	430
	A	10.5	0.0408	0.0207 10.2	20.7	0.0099	0.0166	60	196
	F	14.4	0.0499	0.0403 16.2	30.6	0.0121	0.0354	28	91
II	G	15.9	0.0312	0.0289 18.6	34.5	0.0096	0.0223	45	147
	K	16.8	0.0403	0.0304 15.1	31.9	0.0098	0.0146	68	222
III	M	17.1	0.0329	0.0282 17.1	34.2	0.0080	0.0106	94	306

Komponente der Spezialbewegung der Sterne ergibt direkt die in Spalte 7 aufgeführte mittlere Parallaxe der Sterne der einzelnen Spektralklassen. Bei der Ableitung dieser Zahlen durch L. Boss ist durch den Ausschluß der besonders großen Eigenbewegungen ein unerlaubter Zwang ausgeübt. Dieser trifft besonders die Klassen F und G, die die Sterne in der Nähe der Sonne umfassen. Befreit man die Zahlen von diesem Zwange, so entstehen die Werte der Kolumne 8 für die mittleren Parallaxen.

Die Tabelle bringt nun eine von Kapteyn und Campbell unabhängig gefundene wichtige Tatsache zum Ausdruck, nämlich die Abhängigkeit der Bewegung vom Spektralcharakter. Den Spektralcharakter betrachtet man vom astrophysikalischen Standpunkt aus als den Ausdruck des Entwicklungsstadiums der Sterne. Der innige Zusammenhang mit der Bewegung gibt dieser Ansicht eine kräftige Stütze.

Sternentwicklung.

Man deutete diese Tatsache zunächst in folgender Weise. Die in dem frühesten Stadium der Entwicklung stehenden, noch im höchsten Glutzustande befindlichen Heliumsterne haben die kleinste Bewegung, es folgen die Siriussterne, dann die Sonnensterne, und die Bewegung ist am größten bei den schon im Zustande der Rotglut befindlichen Sternen. Wenn die Sterne aus dem Nebelzustande heraustreten, so sind sie ohne Bewegung, und ihre Bewegung wird erst während der weiteren Entwicklung durch die Gravitationswirkung des gesamten Sternsystems erzeugt, und sie wächst deshalb mit der Dauer der Zugehörigkeit des Sternes zum System. Die Sterne entstehen in der Milchstraße und werden erst durch ihre Bewegungen aus derselben entfernt. Deshalb beobachten wir bei dem frühesten Typus, den B-Sternen und den noch früheren O-Sternen, die starke Zusammendrängung gegen die Milchstraße und sehen diese Zusammendrängung abnehmen beim Fortschreiten der Entwicklung bis zu gleichförmiger Verteilung bei den M-Sternen. Wäre diese Ansicht richtig, so müßten wir die M-Sterne als die durchschnittlich am wenigsten leuchtenden Sterne ansehen und könnten nur erwarten, daß sie in der näheren Umgebung der Sonne für uns sichtbar sein würden, jedenfalls nicht in gleichen Entfernungen wie die früheren Sterntypen. In der Tat aber ergibt sich für die M-Sterne eine viel größere mittlere Entfernung als für die Sonnensterne. Hertzsprung erklärte diesen Widerspruch durch den Nachweis, daß die Sterne unabhängig vom Spektralcharakter in zwei Typen zu teilen sind. Der eine Typus, „Riesensterne", sind

Riesen- und Zwergsterne.

Sterne von sehr großer, nahe gleicher Helligkeit, der andere, die „Zwergsterne", Sterne, die mit zunehmender Rotfärbung schnell an Helligkeit abnehmen. In dem der Klasse B entsprechenden Entwicklungsstadium fallen beide Typen zusammen, in Klasse A sind beide Typen noch vermischt, auch bei Klasse F sind sie noch nicht zu trennen, bei den späteren Klassen macht sich der Unterschied aber immer mehr geltend. Nun hat das Studium der Doppelsterne gelehrt, daß die Massen der Sterne nicht sehr untereinander verschieden sind, daß jedenfalls große Massenunterschiede nur ausnahmsweise auftreten, daß aber große Unterschiede in den Dichteverhältnissen bestehen. Da nun eine Zunahme der Dichte eine notwendige Folge der fortschreitenden Entwicklung ist, haben wir anzunehmen, daß die Riesensterne der Klasse M sich in einem sehr frühen Entwicklungsstadium befinden; es schließen sich an die Riesensterne der Typen K, G, F, A. Die Sterne des Typus B befinden sich in einem mittleren Entwicklungszustande, und die weitere Entwicklung führt über die Zwergsterne durch die Typen A, F, G, ... bis M zurück. Im Anfange der Entwicklung ständen also Körper in einem sehr diffusen Zustande mit großer Oberfläche, es sind die Riesensterne der Klasse M. Mit zunehmender Temperatur und Zusammenziehung durchlaufen sie die Entwicklungsstadien von M bis B und dann mit abnehmender Temperatur wieder rückwärts von B bis M, bis wir schließlich in den Zwergsternen der Klasse M stark verdichtete Körper mit kleiner strahlender Fläche vor uns haben. Außerdem wohnt den großen Sternen eine kleine Bewegung, den kleinen eine größere Bewegung inne, und es durchlaufen nur die größten, also mit der kleinsten Bewegung behafteten Sterne die volle Entwicklung von M bis B und zu M zurück, während die kleineren, stärker bewegten die Höhe ihrer Entwicklung schon in einem der späteren Typen A, F, .., erreichen. Daher haben wir bei den B-Sternen nur Sterne kleiner Bewegung und sehen die Bewegung größer werden mit dem Fortschreiten in der Reihenfolge der Typen. Diese von Russell gegebene Darstellung der Sternentwicklung läßt die vorhin gegebene Erklärung der verschiedenen Verteilung der Sterntypen in bezug auf die Milchstraße bestehen.

VII. Das Sternsystem. Gegen Ende des 19. Jahrhunderts war es Seeliger. Seeliger gelungen, das stellarstatistische Material auf Grund einfacher Annahmen über das Dichtigkeits- und das Helligkeitsgesetz zu einer in sich fest gefügten und plausiblen Vorstellung vom Bau des Fixsternsystems zu vereinigen, nach der sich uns das Sternsystem als ein in bestimmte Grenzen eingeschlossenes einheitliches System darstellte. Die Unabhängigkeit der Verteilung der Sterne nach der Helligkeit vom Orte und eine endliche Maximalhelligkeit der Sterne waren grundlegende Voraussetzungen für den Aufbau der Theorie. Die Ergebnisse der Forschungen der späteren Zeit lassen sich mit diesen Anschauungen durchaus vereinen. Nach einer zweiten Ausarbeitung des Zahlenmaterials ergibt sich ein linsenförmiges Stern-

system, das in der größten Ausdehnung, die in die Ebene der Milchstraße fällt, sich bis 8500 Sternweiten, in der dazu senkrechten Richtung bis 1600 Sternweiten ausdehnt. Die hellsten Sterne des Systems haben in der Einheit der Entfernung, die gleich 5 Sternweiten gewählt ist, die Helligkeit — 4.3, d. h. sie sind noch um 5.3 Größenklassen heller als ein Stern 1. Größe. Diese hellsten Sterne erscheinen an der Grenze des Systems in der Richtung der Milchstraße als Sterne 11.9. Größe und nach den Polen hin als Sterne 8.3. Größe.

Kapteyn. Als ein nur auf die Beobachtungen gestützter Versuch zur Erklärung der Bewegungserscheinungen trat neben diese an der von alters her gewohnten Vorstellung von der Einheitlichkeit und der fortschreitenden Entwicklung des Weltalls festhaltenden Theorie die Zweischwarmtheorie Kapteyns, die das große Heer der Fixsterne in zwei voneinander völlig unabhängige, sich gesetzlos durchdringende Schwärme auflöst und zunächst keinen Weg übrigzulassen schien, der zu einem Zustande des Gleichgewichts führen könnte. Näher gebracht wurde die Theorie dem Verständnis durch die Erklärung, die Turner versuchte. Nach ihm übt die ganze Masse des Sternsystems auf jedes einzelne Glied eine Anziehung aus, durch die es gezwungen wird, in langgestreckter, fast geradliniger Bahn durch das Zentrum des Systems zu schwingen. Die in der einen Richtung sich bewegenden Körper bilden den ersten, die entgegengesetzt bewegten den zweiten Schwarm, und auch der dritte von Halm eingeführte Schwarm würde eine ungezwungene Erklärung finden in den in den Umkehrpunkten der Bahnen für geraume Zeit sich in Ruhe befindenden Sternen.

Schwarzschild. Einfacher vereinte mit der Vorstellung von der Einheitlichkeit des Sternsystems die beobachteten Erscheinungen der zwei Schwärme Schwarzschilds Theorie. Wie man in der Kristalloptik bei den einachsigen Kristallen die Brechungsvorgänge dadurch erklärt, daß man annimmt, die Ätherschwingungen des außerordentlichen Strahles pflanzten sich nach den verschiedenen Richtungen mit verschiedener Geschwindigkeit, beim Bergkristall z. B. in der Richtung der Hauptachse mit größerer, senkrecht dazu mit kleinerer Geschwindigkeit fort, so daß die von einem Punkte im Innern ausgehenden Impulse nach einer bestimmten Zeit nicht auf der Oberfläche einer Kugel, wie in isotropen Medien, sondern auf der Oberfläche eines in der Richtung der Hauptachse verlängerten Rotationsellipsoides angelangt sind, so nimmt Schwarzschild auch im Sternsystem eine von Ort zu Ort sich in Größe und Richtung stetig ändernde Geschwindigkeit an und erklärt die Vorzugsrichtung der Sternbewegung als die Rotationsachse des Geschwindigkeitsellipsoides.

Charlier. Auf Grund dieser Ellipsoidtheorie entwarf Charlier einen Plan des Baues des Fixsternsystems. Für die Entfernungsmessungen läßt er sich leiten von der Annahme, daß zwischen dem Spektraltypus und der Temperatur und also auch der Leuchtkraft ein inniger Zusammenhang bestehen müsse. Wenn durch den Spektralcharakter die nahe Gleichheit der einzelnen Sterne

nach Masse und Dimensionen verbürgt ist, so kann man aus der scheinbaren Helligkeit unmittelbar die relativen Entfernungen dieser Sterne ableiten. Durch Vergleichen mit durch unmittelbare Messung gefundenen Entfernungen oder durch Verbindung von Säkularparallaxe und Radialbewegung kann man den relativen Maßstab in einen absoluten überführen und so unmittelbar zur Kenntnis der räumlichen Anordnung der Sterne durchdringen. Das System der B-Sterne, das auf diesem Wege entsteht, ist ein Sternhaufen von abgeplattet sphäroidischer Gestalt. Die Äquatorebene fällt nahe mit der Milchstraße zusammen, der Halbmesser in dieser Richtung beträgt 720 Sternweiten, während die Polarachse nur 240 Sternweiten mißt. In der Nähe des Zentrums kommt ein B-Stern auf einen kugligen Raum von etwa 20 Sternweiten Halbmesser, und die Dichtigkeit der Sternverteilung nimmt nach dem Rande zu allmählich ab. Die in die Äquatorebene fallende Komponente der Sterngeschwindigkeiten beträgt im Mittel 9.0 km in der Sekunde, die nach den Polen gerichtete 6.2 km. Der Mittelpunkt des Systems der B-Sterne, der mit dem unseres ganzen Sternsystems identisch sein wird, liegt von der Sonne aus gesehen in der Richtung auf den Punkt $\alpha = 7^h.7$, $\delta = -55^0.6$ im Sternbilde Carina etwas südlich von der Milchstraße. Die Sonne ist von diesem Mittelpunkte 88 Sternweiten entfernt. Ähnliche Untersuchungen sind von Schülern Charliers auch für die anderen Sterntypen ausgeführt; sie gestatten den Schluß, daß die Sterngeschwindigkeiten wachsen mit dem Sterntypus von den weißen nach den roten Sternen hin, und daß gleichzeitig die Verschiedenheit der Sterngeschwindigkeit nach den verschiedenen Richtungen hin kleiner wird, so daß bei den roten Sternen die Geschwindigkeitsverteilung nahezu eine sphärische ist. Die fortschreitende Entwicklung hätte bei diesen Sternen schon den Zustand des dynamischen Gleichgewichts herbeigeführt.

Das Ziel, das man bei diesen Untersuchungen im Auge hatte, war die Erkenntnis der Anordnung des Sternsystems und des allgemeinen Bewegungszustandes in demselben. Der innere Zusammenhang dieser Bewegungen und ihre Deutung, abgesehen von dem durch die Sonnenbewegung hervorgerufenen Teile, standen dabei nicht in Frage. Nach Gesetzen in den Spezialbewegungen der Sterne hatte man auch früher schon gesucht. Schönfelds Hypothese (vgl. S. 550) einer Rotation des Sternsystems um eine zur Ebene der Milchstraße senkrechte Achse mit konstanter Winkelgeschwindigkeit hatte sich als ungeeignet erwiesen. Der Gedanke, daß auch im Fixsternsystem eine Zentralkraft die Bewegungen bestimmt, scheint zu der Annahme zu berechtigen, daß zwischen den von der Erde aus gesehenen Bewegungen des Schwarmes der Kleinen Planeten und den von der Sonne aus gesehenen Bewegungen der Sterne eine Verwandtschaft bestehen müsse, und veranlaßte Oppenheim, beide Erscheinungen nach gleichen Methoden zu behandeln. Es stellte sich dabei heraus, daß im Fixsternsystem nicht so einfache Verhältnisse herrschen wie bei den um die Sonne kreisenden Planeten. Wir müssen vielmehr zur Erklärung der beobachteten Bewegungs- Oppenheim.

verhältnisse annehmen, daß wir es mit einem System mehrerer sich in Ebenen, die der Milchstraße parallel sind, bewegender Schwärme zu tun haben. Die Bewegungszentren dieser Schwärme liegen auf einer zur Ebene der Milchstraße senkrechten Achse, fallen aber nicht in einen einzigen Bewegungsmittelpunkt wie im Planetensystem zusammen.

Nebelflecke und Sternhaufen.

Als Glieder unseres Sternsystems haben wir außer den einzelnen Sternen auch die auflösbaren Sternhaufen und die meisten Nebelflecke anzusehen. Für die Sternhaufen folgt das einmal daraus, daß sie in ihrer Verteilung sich eng an die Milchstraße anschließen, und dann weiter daraus, daß wir den Sternen dieser Haufen ganz unwahrscheinlich große Dimensionen zuschreiben müßten, wenn bei der für außerhalb des Milchstraßensystems stehende Objekte anzunehmenden Entfernung die einzelnen Sterne sichtbar sein sollten. Bei der Mehrzahl der Nebelflecke müssen wir auf ihre Zugehörigkeit zum Milchstraßensystem daraus schließen, daß sie uns Sterne zeigen, die unmittelbar zu dem Nebel gehören müssen, weil sie an besonders dichten Stellen der Nebelmaterie stehen oder durch Nebelarme mit der Hauptmasse zusammenhängen. Für diese gilt dann dasselbe wie für die Sterne der Sternhaufen. Die planetarischen Nebel und die wirklichen Gasnebel, die im Spektroskop helle Linien zeigen, sind wieder in ihrer Verteilung so eng mit der Milchstraße verbunden, daß wir keinen Grund haben, sie als außerhalb unseres Sternsystems stehend anzunehmen.

Um einen Überblick über die räumliche Anordnung der Sternhaufen zu erhalten, nahm Charlier in erster Näherung an, daß ihre linearen Dimensionen so nahe einander gleich seien, daß man den scheinbaren Durchmesser einfach umgekehrt proportional der Entfernung setzen dürfe. Mit den so berechneten genäherten relativen Entfernungen der einzelnen Haufen erhält man ein Bild der räumlichen Anordnung dieser Objekte, und es zeigt sich nun, daß diese Anordnung, abgesehen von dem unbekannten Maßstabe, völlig der Anordnung des Systems der B-Sterne entspricht. Dieses Ergebnis berechtigt dann zu der Annahme, daß beide Systeme identisch sind, daß ihre Mittelpunkte also zusammenfallen, und damit wird dann auch der wahre Maßstab für die Entfernungen der Sternhaufen bekannt. Sie wären hiernach in der Ebene der Milchstraße doppelt so weit, senkrecht zur Milchstraße nur ebenso weit verstreut wie die B-Sterne.

Kugelförmige Sternhaufen.

Die als kugelförmige bezeichneten Sternhaufen erscheinen nicht nur durch ihre Gestalt und Struktur als von den gewöhnlichen auflösbaren Sternhaufen gänzlich verschieden gebaute Sternsysteme, sie verhalten sich auch in bezug auf ihre räumliche Anordnung anders als diese. Sie sind sämtlich auf einer Hälfte des Himmels vereinigt, stehen am dichtesten gedrängt im Sternbild Sagittarius, zeigen aber sonst keine Zusammendrängung gegen die Milchstraße. Ein Rückschluß auf die Entfernung aus der scheinbaren Anordnung erscheint dieser abweichenden Verhältnisse wegen nicht erlaubt. Nun zeichnen sich aber diese kugelförmigen Sternhaufen weiter dadurch aus, daß unter ihren Sternen veränderliche Sterne von sehr kurzer Periode sehr häufig

sind. Der Charakter dieser Veränderlichkeit scheint mit dem der δ Cephei-Sterne übereinzustimmen. Die δ Cephei-Sterne aber sind Riesensterne, und ihre absolute Helligkeit ist wenig verschieden. Übertragen wir diese absolute Helligkeit, wie sie an den gewöhnlichen einzeln stehenden δ Cephei-Veränderlichen beobachtet ist, auf die Veränderlichen in den Sternhaufen und vergleichen sie mit der beobachteten scheinbaren Helligkeit, so erfahren wir wieder die Entfernung. Bei diesen Sternhaufen herrscht weiter große Übereinstimmung in der Verteilung nach der Helligkeit der Sterne, und man kann deshalb aus der scheinbaren Helligkeit der hellsten Sterne zweier Haufen einen Schluß auf die relative Entfernung derselben machen und so auch die Entfernung von Haufen ermitteln, die keine kurzperiodischen Veränderlichen enthalten. Endlich gibt auch die scheinbare Ausdehnung der Haufen einen Maßstab für die Entfernung, da es erlaubt erscheint, ihre linearen Dimensionen als genähert gleich anzusehen. Auf diesem Wege kam Shapley bei den kugelförmigen Sternhaufen auf Entfernungen von Zehntausenden von Sternweiten, und da der scheinbare Durchmesser dieser kugelförmigen Haufen häufig mehrere Bogenminuten beträgt — bei ω Centauri sogar 35′ erreicht —, erhält man lineare Dimensionen dieser Haufen, die Hunderte von Sternweiten erreichen. In solchen Haufen sind oft Tausende von Sternen zusammengedrängt. Man hat empirisch das Verteilungsgesetz, das in den Haufen herrscht, ermittelt und gefunden, daß es das für eine in adiabatischem Gleichgewicht befindliche Gasmasse von kugliger Gestalt geltende ist, wenn die mit einem Verbleiben im Haufen noch zulässigen größtmöglichen Geschwindigkeiten zugelassen werden.

Spiralnebel

Als nicht zu unserem System gehörig scheinen sich sowohl durch ihre mit der Milchstraße nicht zusammenhängende Verteilung über den Himmel wie durch ihr Spektrum die Spiralnebel und einzelne Nebel von großer Ausdehnung zu erweisen. Die Spiralnebel zeigen ein kontinuierliches Spektrum, und es ist gelungen, auch das Auftreten von dunklen Absorptionslinien, die solchen im Sonnenspektrum entsprechen, nachzuweisen. Damit ist aber der Beweis erbracht, daß diese Nebel aus Sternen bestehen, daß ihre Entfernung aber sovielmal größer ist als die der Sternhaufen, daß wir die einzelnen Sterne nicht mehr zu trennen vermögen.

Die leuchtenden Nebel und die Sterne erscheinen vielerorts am Himmelsgrund eingebettet oder verhüllt durch einen Schleier aus nichtleuchtender Nebelmaterie, die sich nach Hagens Forschungen wie ein Netzwerk, am dichtesten am Nordpol der Milchstraße, von da gegen die Milchstraße hin immer weniger auffällig, über den Himmel zieht. Die kleinen leuchtenden Nebel erscheinen mit Vorliebe längs der Begrenzung dieser zusammenhängenden Massen kosmischen Nebels angeordnet. Stellenweise sind die Nebelmassen zerrissen durch Kanäle oder auch durch Buchten, deren Rand mit Sternchen besetzt ist. So gewinnt man den Eindruck, daß rund um unser Milchstraßensystem diese kosmischen Nebelmassen den Raum erfüllen und daß die kleinen leuchtenden Nebel durch das Licht sternartiger Verdichtungen

erhellte Teile dieser Nebelmassen seien. Unser Milchstraßensystem liegt in einem linsenförmigen Raume innerhalb dieser Urmassen, die uns also in der Richtung senkrecht zur Milchstraßenebene sehr viel näher sind.

Ein für eine Verwendung zur Untersuchung der Bewegungsverhältnisse der Nebelflecken geeignetes Material an Eigenbewegungen senkrecht zur Gesichtslinie liegt bislang nicht vor. Die Örter der Nebel werden bei unmittelbarer Messung bestimmt durch Anschluß an benachbarte schwache Sterne, so daß die Bewegung dieser Sterne in das Resultat mit eingeht. Eine verläßliche Trennung beider Bewegungen ist zur Zeit noch nicht durchführbar. Es liegt aber zunächst auch kein Anzeichen vor, das darauf deutete, daß die Nebel sich wesentlich anders verhalten wie die Sterne. Dagegen liegt eine Anzahl von Bestimmungen von Radialbewegungen vor, die eine Verwendung gestatten. Die von Keeler an 14 wirklichen Gasnebeln ausgeführten Messungen führten zu Bewegungen, die sich der Größenordnung nach ganz den an Sternen beobachteten Bewegungen anschließen. Sie führen zu einem Zielpunkte und einer Größe der Sonnenbewegung, die sich von den aus den Sternbewegungen abgeleiteten nicht unterscheiden. Es spricht sich also auch hierin die Zugehörigkeit dieser Nebel zu unserem Sternsystem aus. Weiter liegen aber auch für 15 Spiralnebel Radialbewegungen vor, und diese sind von einer ganz anderen Größenordnung als die der Sterne. Sie belaufen sich im Durchschnitt auf über 400 km. Diese enormen Bewegungen haben außerdem auch offenbar keine Beziehung zum Zielpunkte der Sonnenbewegung. Wir dürfen auch hierin eine Stütze der Annahme erblicken, daß diese Systeme eine Stellung für sich einnehmen.

Das Weltbild.

Suchen wir nach einem Bilde unseres Sternsystemes am Himmel, so können wir es nur in den Spiralnebeln erblicken. Der Standpunkt der Sonne in unserem Systeme müßte in der Nähe des Mittelpunktes der Spirale sein, weil die Milchstraße, die die Ebene der Spirale bezeichnet, nahezu einem größten Kreise am Himmel sich anschließt; die Sonne müßte aber etwas nördlich von der Hauptebene stehen, da die Milchstraße von ihrem nördlichen Pole um etwas mehr als 90^0 absteht und da auch die heißen, in den ferneren Teilen der Spirale gelegenen Sterne auf der südlichen Hemisphäre dichter gedrängt und häufiger sind als auf der nördlichen. Das Sternsystem selbst wird gebildet teils durch lockere Haufen von Sternen, teils durch Sternzüge und Gruppen. Zwischen ihnen befindet sich Nebelmaterie teils in größeren begrenzten Massen, teils in zwischen den Sternen sich hindurchziehenden Streifen, teils in kleineren kugligen Ballen. Diese letzteren treten besonders zahlreich an der oberen und unteren Seite des Systems auf. In den Sternschwärmen tritt uns vielleicht die Bewegung der Materie in den Armen der Spirale entgegen. Suchen wir den Mittelpunkt des ganzen Systems, so haben wir ihn in einer zur Richtung der Bewegung der beiden großen Sternschwärme senkrechten Richtung zu vermuten. Diese weist auf das Sternbild des Schwans, und der äußere Anblick der Milchstraße an dieser Stelle scheint die Annahme zu rechtfertigen. Hier würden wir den Kern

der Spirale anzunehmen haben, von dem aus sie sich in mehrfachen Windungen, die sich für uns teils decken und zwischen denen wir an anderen Stellen wieder hindurchblicken, in den Raum erstreckt. Der Mittelpunkt der Spirale ist aber nicht als der Sitz einer allgewaltigen, das ganze System beherrschenden Masse anzusprechen. Das ganze System dürfte sich vielmehr zusammensetzen aus einer großen Zahl von Einzelsystemen, in denen eine einzige oder zwei oder auch mehrere Massen die untergeordneten Massen regieren, oder auch solchen, in denen eine große Zahl von Sonnen durch die Gravitationskraft miteinander verbunden sind und nach uns noch nicht bekannten Gesetzen sich bewegen. Die Anzahl der zu dem Gesamtsysteme gehörenden Sterne dürfte Hunderte von Millionen betragen, aber trotzdem ist die Masse sehr dünn verteilt. Die Verteilung ist dichter in der Mitte und wird nach außen hin dünner. In unserer Nähe stehen die Massen etwa in Entfernungen von 600000 Erdbahnradien oder, wenn wir unsere Sonne als Norm zugrundelegen, um das 65 millionenfache ihrer Durchmesser auseinander. Nach einem häufig angewandten Bilde sind es Stecknadelknöpfe in 65 km Entfernung voneinander.

Die weitere Festigung der jetzt noch in vielen Punkten dürftigen und auf unsicherem Grunde fußenden Anschauung von der Gestaltung und den Beziehungen im Sternsysteme ist bedingt durch die Fortschritte unserer Kenntnis in bezug auf die Entfernungen, die Bewegungen und die Verteilung der Fixsterne. Direkt messend sind wir nur bis auf verhältnismäßig sehr geringe Entfernungen vorgedrungen, und es fehlt vor allem noch der sichere Zusammenhang zwischen den Resultaten, der sie in zuverlässiger Weise mit der scheinbaren Helligkeit und den Bewegungen verknüpft und in höherem Maße für die Erkenntnis des Baues des Systems nutzbar werden lassen muß. Die Sternbewegungen sind uns erschlossen für die dem freien Auge sichtbaren Sterne, der nächste Schritt bis zu den Sternen 9. Größe ist bezüglich der Eigenbewegung gut vorbereitet und einer verhältnismäßig nahen Zukunft vorbehalten. Als eine der wichtigsten Aufgaben ist hier die Beantwortung der Frage zu bezeichnen, ob die Richtung der systematischen Bewegung, die bei den helleren Sternen den Vertex bestimmt, auch für die schwächeren gilt. Es wird das von entscheidender Bedeutung für die Kenntnis des Charakters jener Bewegung sein. Von der Photographie ist hier in immer steigendem Maße wirksame Hilfe zu erwarten. Von ihr ist auch eine Lösung der mit der Bewegung der Nebel verknüpften Fragen in nicht zu ferner Zukunft zu erhoffen. Die Fortschritte in der Kenntnis der Radialgeschwindigkeiten sind in erster Linie von den technischen Hilfsmitteln abhängig. Das Material wird sich aber durch die jetzt vorhandenen Instrumente noch sehr weit vervollständigen und durch Ausdehnung auf die schwächeren Sterne erweitern und wirksamer machen lassen. Die Einbeziehung der schwachen Sterne in den Bereich der sich mit der Sternverteilung beschäftigenden Studien, wozu wieder die Photographie die Mittel bietet, dürfte den Weg ebnen zu einer sicheren und tieferen Kenntnis der hier geltenden Gesetze, die für die allgemeinen Fragen in erster Linie maßgebend sind.

Literatur.

Die Grundlagen für die genauen Bestimmungen der Fixsternörter sind von Bessel gegeben in F. W. BESSEL, Fundamenta Astronomiae pro anno 1755 deducta ex observationibus viri incomparabilis J. Bradley (Königsberg, 1818); Tabulae Regiomontanae reductionum observationum astronom. ab anno 1750 ad annum 1850 computatae (Königsberg, 1830). Weiter ist in dieser Hinsicht zu nennen: C. A. F. PETERS, Numerus constans nutationis ex ascensionibus rectis stellae polaris in Specula Dorpatensi annis 1822 ad 1838 observatis deductus (Petersburg, 1842). Eine übersichtliche Zusammenfassung der Theorien und Richtlinien der praktischen Astronomie findet man z. B. in F. COHN, Reduktion der astronom. Beobachtungen (Encyklopädie der math. Wiss. Bd. VI 2, p. 16).

Als hauptsächlichste Quellen für Sternparallaxen sind zu nennen: W. L. ELKIN, F. L. CHASE, M. F. SMITH, Catalogue of Yale parallax results (Transactions of the Astron. Obs. of Yale Univ. Vol. II p. 385). — D. GILL, Researches on stellar parallax made with the Cape Heliometer (Annals of the Roy. Obs. Cape of g. H. Vol. VIII 2). — B. PETER, Parallaxenbestimmungen am Repsoldschen Heliometer der Leipziger Sternwarte (Abhandl. der Kgl. Sächs. Gesellsch. d. Wiss. XXII, XXIV, XXX). — F. SCHLESINGER, Photographic determination of stellar parallax made with the Yerkes refractor (Astrophys. Journ. Vol. XXXIV p. 26). F. SLOCUM, S. A. MITCHELL, Stellar parallaxes from photographs made with the 40-inch refractor of the Yerkes Observatory (Astrophys. Journ. Vol. XXXVIII p. 1).

Wertvolle Zusammenstellungen der Gesamtheit der vorhandenen Bestimmungen sind gegeben in: G. BIGOURDAN, Catalogue des parallaxes stellaires (Bull. Astron. T. XXVI). — J. C. KAPTEYN, H. A. WEERSMA, List of parallax determinations (Publ. of the Astron. Laboratory at Groningen, Nr. 24).

Die im IV. Kapitel behandelten grundlegenden Anschauungen über den Bau des Sternsystems finden sich in den Werken: I. KANT, Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels (Königsberg, 1755). — J. H. LAMBERT, Kosmologische Briefe über die Einrichtung des Weltbaues (Augsburg, 1761). — F. W. HERSCHEL, On the construction of the heavens (Philos. Transactions 1784 u. 1785); On the proper motion of the sun and solar system (ebenda, 1783); On the direction and velocity of the sun and solar system (ebenda, 1805); On the quantity and velocity of the solar motion (ebenda, 1806). — F. W. A. ARGELANDER, Über die eigene Bewegung des Sonnensystems (St. Petersburg, 1837). — J. H. MÄDLER, Die Eigenbewegung der Fixsterne (Beob. auf der Universitätssternwarte zu Dorpat, Bd. XIV). — G. B. AIRY, Movement of the solar system in space (Memoirs of the Roy. Soc. London Vol. XXVIII p. 143).

Die Grundlagen und Nachweise für die beobachteten Bewegungen sind besonders: A. AUWERS, Neue Reduktion der Bradleyschen Beobachtungen (St. Petersburg, 1882, 1888, 1903). — L. BOSS, Preliminary General Catalogue of 6188 stars for the epoch 1900 (Washington, 1910). — H. C. VOGEL, Untersuchungen über die Eigenbewegungen der Sterne im Visionsradius auf spektrographischem Wege (Publikat. des Astrophys. Observ. zu Potsdam, Bd. VII 1). — W. W. CAMPBELL, On the motion of the brighter class B stars (Lick. Bull. Vol. VI p. 101); Preliminary radial velocities of 212 brighter class A stars (ebenda Vol. VII p. 19); The radial velocities of 915 stars (ebenda Vol. VII p. 113).

Die wichtigsten neueren Arbeiten über das Problem der Sonnenbewegung sind: H. KOBOLD, Untersuchung der Eigenbewegungen des Auwers-Bradley-Kataloges nach der Bessel-

schen Methode (Nova acta der Kais.-Leop.-Akad. LXIV). — L. Boss, Precession and Solar motion I—III Paper (Astron. Journ. Vol. XXVI p. 95, 111, 187). – H. Kobold, Die Konstante der Präzession und die Bewegung des Sonnensystems untersucht auf Grundlage der Methode von Bessel (Astronom. Nachr. Bd. 150 p. 257). – J. C. Kapteyn: Star streaming (Report of the British Association in South Africa 1905); On the derivation of the constants for the two Star-Streams (Monthly Not. of the Roy. Astr. Soc. Vol. LXXII p. 743). — A. S. Eddington, On the mathematical theory of two Star-drifts and on the systematic motion of zodiacal stars (Monthly Not. of the Roy. Astr. Soc. London Vol. LXVIII p. 588). — K. Schwarzschild: Über die Eigenbewegungen der Fixsterne (Nachrichten von der Kgl. Gesellsch. d. Wiss. zu Göttingen 1907 p. 614); Über die Bestimmung von Vertex und Apex nach der Ellipsoidhypothese aus einer geringen Zahl beobachteter Eigenbewegungen (ebenda 1908 p. 191). — J. C. Kapteyn, On certain statistical data which may be valuable in the classification of the stars in the order of their evolution (Astrophys. Journ. Vol. XXXI p. 258). — W. W. Campbell, Some peculiarities in the motion of the stars (Lick Bull. Vol. VI p. 125). — P. J. van Rhijn, Derivation of the change of colour with distance and apparent magnitude (Groningen, 1915). — H. Seeliger, Betrachtungen über die räumliche Verteilung der Fixsterne (Abhandl. der Kgl. Bayr. Akad. XIX 3 und XXV 3); Zur Verteilung der Fixsterne am Himmel (Sitzungsber. der Kgl. Bayr. Akad. 1899 p. 363); Über die räumliche Verteilung der Sterne im schematischen Sternsystem (ebenda 1911 p. 413); Über die räumliche und scheinbare Verteilung der Sterne (ebenda 1912 p. 451). — K. Schwarzschild, Über die Integralgleichungen der Stellarstatistik (Astron. Nachr. Bd. 185 p. 81); Zur Stellarstatistik (ebenda Bd. 190 p. 361). — C. V. L. Charlier, Constitution of the Milky Way I; Studies in stellar statistics. III. The distances and the distribution of the stars of the spectral type B. IV. Stellar clusters and related celestial phaenomena (Meddel. från Lunds Astron. Observ. Ser. II Nr. 8, 14, 19). — S. Oppenheim, Über die Bahnebene der Sonne und ihr Verhältnis zur Ebene der Milchstraße (Astronom. Nachr. Bd. 204 p. 417). — W. Stratonoff, Etudes sur la structure de l'univers (Public. de l'observ. de Tachkent Vol. II, III). — H. Shapley, Studies of Magnitudes in Star Clusters. I—XI. Proc.-Nat. Acad. Washington 1916—1920 und Contributions from the Mount Wilson Solar Observatory Nr. 115ff. — J. G. Hagen, Via lattea et via nubila. Mem. d. Soc. Astr. It. 3. Ser. Vol. I. Rom 1920. — J. C. Easton, La voie lactée dans l'hémisphère boréal (Dordrecht et Paris, 1893).

Als zusammenfassende Bearbeitungen des Gesamtgebietes der sich mit dem Sternsystem beschäftigenden Fragen sind die drei Monographien anzuführen: H. Kobold, Der Bau des Fixsternsystems (Braunschweig, 1906). — W. W. Campbell, Stellar motions with special reference to motions determined by means of the spectrograph (New Haven, 1913). — A. S. Eddington, Stellar movements and the structure of the universe (London, 1914).