

OTTO STRUVE · ASTRONOMIE

ASTRONOMIE

EINFÜHRUNG IN IHRE GRUNDLAGEN

OTTO STRUVE

PROFESSOR DER ASTRONOMIE
AN DER UNIVERSITY OF CALIFORNIA
DIREKTOR DES LEUSCHNER OBSERVATORY

BEVERLY LYNDS UND HELEN PILLANS
BERKELEY ASTRONOMICAL DEPARTMENT,
UNIVERSITY OF CALIFORNIA

MIT 296 ABBILDUNGEN, 1 FARBTAFEL UND 4 STERNKARTEN



WALTER DE GRUYTER & CO. · BERLIN 1962

VORMALS G. J. GÖSCHEN'SCHE VERLAGSHANDLUNG
J. GUTTENTAG, VERLAGSBUCHHANDLUNG
GEORG REIMER — KARL J. TRÜBNER — VEIT & COMP.

Titel der englischen Originalausgabe: *Elementary Astronomy*, Oxford University Press 1959

Deutsche Übersetzung: Dr. habil. Hans Klauder

©

Copyright 1962 by Walter de Gruyter & Co., vormals G. J. Göschen'sche Verlagshandlung / J. Guttentag Verlagsbuchhandlung / Georg Reimer / Karl J. Trübner / Veit & Comp., Berlin W 30. — Alle Rechte, einschl. der Rechte der Herstellung von Photokopien und Mikrofilmen, vom Verlag vorbehalten. — Archiv-Nr. 12 37 62. — Satz und Druck: Walter de Gruyter & Co., Berlin W 30. — Printed in Germany. — Ausstattung: Johannes Boehland.

VORWORT ZUR DEUTSCHEN AUSGABE

Die deutschsprachige Literatur weist bisher kein Werk auf, das dem vorliegenden gleichkommt. Otto Struve, der viele Jahre Direktor des Yerkes Observatory der Universität Chicago war, dann als Direktor des Lick Observatory in Berkeley an der Universität von Kalifornien wirkte und gegenwärtig das U. S. National Radio Observatory in Green Bank, West Virginia, leitet, ist einer der hervorragendsten Astronomen unserer Zeit. Wir verdanken ihm nicht nur viele großartige Forschungsergebnisse, sondern auch eine einmalige Breiten- und Tiefenwirkung seiner Lehrtätigkeit. Daher wurde das Erscheinen des vorliegenden Werkes aus seiner Feder in aller Welt begrüßt.

In diesem Werk ist es dem Verfasser gelungen, Astronomie sowohl elementar darzubieten als auch die wesentlichen letzten Erkenntnisse so zu bringen, daß der gebildete Laie vieles gewinnen wird und der Naturwissenschaftler sein Wissen in angenehmer Lektüre bereichern kann.

Daher war es zu begrüßen, daß sich der Verlag Walter de Gruyter & Co. um die Übertragung des Werkes in die deutsche Sprache bemühte und in Herrn Dr. Hans Klauder einen Fachgelehrten fand, dessen eigene Kenntnis der dargebotenen Materie eine zuverlässige Übersetzung verbürgte.

Dr. Walter Fricke

ord. Professor für theor. Astronomie und
Direktor des Astronomischen Rechen-Institutes
Heidelberg

Heidelberg, im Oktober 1961

VORWORT ZUR ENGLISCHEN AUSGABE

Dieses Buch will nicht die vielen ausgezeichneten Lehrbücher der beschreibenden Astronomie ersetzen, die zur Zeit an vielen Universitäten und Bildungsstätten in Gebrauch sind, sondern es beabsichtigt, den wachsenden Wunsch von Studenten nach einer zusammenfassenden Darstellung des Inhalts eines Astronomiekurses als allgemeine Grundlage für das Studium der physikalischen Wissenschaft zu befriedigen.

Vor dem zweiten Weltkrieg verfolgte die Mehrzahl der Kurse in elementarer Astronomie vor allem kulturelle Ziele; die dafür geschriebenen Lehrbücher legten das Hauptgewicht auf die beschreibenden Seiten des Gegenstandes und auf die philosophischen und historischen Zusammenhänge. Daneben erhob sich aber das Bedürfnis nach einem Buch, das die Grundgedanken der Physik in ihrer Beziehung zum Universum darstellte. Und demgemäß befassen wir uns in beträchtlichem Umfang mit Themen wie der allgemeinen Gravitation, dem Ursprung und der Entwicklung der Sterne, der Sonne, der Planeten und Kometen; mit Kernprozessen in Sternen und mit der Dynamik des Milchstraßensystems. Die Anordnung des Stoffes ist der in mehreren anderen Lehrbüchern ähnlich. Wir haben jedoch den beschreibenden Charakter der Darstellung etwas (aber wir hoffen nicht gänzlich) zurücktreten lassen, um dem Anfänger so früh wie möglich eine vertiefte Kenntnis einiger der grundlegenden Gedanken und Theorien der Physik wie Gravitation, Strahlung, Wärme usw. zu vermitteln, die alle für ihn von Nutzen sein dürften, sollte er sich später auf eine der anderen physikalischen Wissenschaften oder ihre technische Anwendung spezialisieren.

Mathematische und physikalische Vorkenntnisse werden nicht vorausgesetzt; mathematische Beweisführung und Trigonometrie wurden gänzlich unterdrückt. Es wurde versucht, die Ergebnisse durch Zurückführung auf einfache arithmetische Rechnungen abzuleiten. Eine Reihe von Gegenständen wurde aufgenommen, die man in elementaren Büchern gewöhnlich nicht findet, so die Ableitung des dritten Keplerschen Gesetzes (für Kreisbahnen) aus dem Newtonschen Gravitationsgesetz, die Berechnung der Entweichungsgeschwindigkeit von der Erde, eine elementare Übersicht über den inneren Aufbau der Sonne, Berechnungen der Wahrscheinlichkeit von Zusammenstößen zwischen verschiedenen Arten von Himmelskörpern usw.

Um die den Rechnungen zugrunde liegenden Gedankengänge leichter verständlich zu machen, wurden für viele numerische Daten oft rohe Näherungswerte verwendet: $1,5 \cdot 10^8$ km für die astronomische Einheit, $7 \cdot 10^{10}$ cm für den Sonnenradius, 10^4 parsec für den Abstand der Sonne vom galaktischen Zentrum usw. Es wurde für das Beste gehalten, das Gedächtnis des Lesers nicht mit Diskussionen der erreichbaren Genauigkeit bei den verschiedenen Arten von Messungen zu belasten. Die besten Werte für die wichtigsten Konstanten sind in einer besonderen Tabelle am Ende des Buches zusammengestellt. Wegen der großen Unsicherheit, die bei vielen der im Text gebrauchten numerischen Werte besteht, sollte der Leser nicht überrascht sein, wenn er in verschiedenen Abschnitten für dieselbe Konstante leicht voneinander abweichende Zahlenangaben findet. Zum Beispiel reicht es gewöhnlich aus, die Masse des Wasserstoffatoms zu 10^{-24} anzunehmen. Der genaue Wert beträgt $1,66 \cdot 10^{-24}$ g.

Zur Vereinfachung der Berechnungen wurde das metrische System der Einheiten verwandt. In einigen Fällen wurden englische Einheiten zusätzlich angegeben und die Umrechnungsfaktoren in einer Tabelle zusammengestellt. Nur im letzten Kapitel über Fernrohre und

Hilfsinstrumente wurden die Einheiten Zoll und Fuß für Öffnung bzw. Brennweite beibehalten.

Das Buch kann als Grundlage sowohl für eine zweisemestrige, wie auch für eine einsemestrige Vorlesung dienen. Im zweiten Fall können folgende Abschnitte übergangen werden: 7,8; 7,9; 7,10; 7,12; 8,2; 8,5; 8,12; 9,6; 10,3; 10,9; 13,2; 13,4; 14,5; 16,2; 16,3; 20; 21; 23,2; 26,3; 27,4; 27,5; 28,1; 28,2; 28,4; 28,5; 29,3; 29,4; 29,5; 29,6; 29,8; 31,4; 31,5; 31,6; 32; 33,6; 33,7; 33,10; 33,11; 33,12.

Für Unterstützung verschiedener Art sind wir vielen Astronomen zu Dank verpflichtet. In den Unterschriften zu den photographischen Abbildungen sind die Personen oder Stellen genannt, die die Originale zur Verfügung stellten. Besonders danken wir Herrn Dr. P. Frank für die Erlaubnis, für Kapitel 32 seine Aufsätze über allgemeine Relativität in „Sky and Telescope“ (Bd. 1 und 2) zu benützen. Den Herausgebern von „Sky and Telescope“ sind wir für viele Aufsätze und Abbildungen zu Dank verpflichtet. Herr Dr. W. H. McCrea hat eine Reihe wertvoller Anregungen in Verbindung mit dem Kapitel über die Relativität gegeben. Herrn Dr. R. Wildts Kritik an dem Kapitel über die Planeten war sehr förderlich. Herr Dr. George H. Herbig unterstützte uns bei dem Abschnitt über die T Tauri-Veränderlichen, und Herr Dr. W. P. Bidelman überprüfte die Tabellen der spektralen Eigenschaften von Sternen verschiedener Typen. Herr Dr. C. R. Lynds half eine Reihe von Punkten klarzustellen und stellte mehrere Abbildungen zur Verfügung. Herrn W. C. Miller verdanken wir zahlreiche schöne Reproduktionen von Mount Wilson und Palomar-Aufnahmen. Die Strichzeichnungen wurden von Fräulein E. Winkler angefertigt.

Frau Velta Zebergs war an der Vorbereitung des Manuskripts für den Druck beteiligt.

O. S., B. L., H. P.

Berkeley, Californien

INHALT

Vorwort

1. Das Universum 13
2. Fundamentale Einheiten 25
 - 2.1 Englische und metrische Einheiten 25
 - 2.2 Temperatur-Skalen 26
 - 2.3 Zehnerpotenzen 26
 - 2.4 Eigenschaften des Kreises und der Kugel 27
3. Koordinaten und Zeit 28
 - 3.1 Einleitung 28
 - 3.2 Koordinaten auf der Erde 29
 - 3.3 Koordinaten auf der Himmelskugel 30
 - 3.4 Die Bestimmung der Breite 33
 - 3.5 Die Bestimmung der Länge 34
 - 3.6 Die Zeit 35
4. Das Gravitationsgesetz 39
 - 4.1 Geschwindigkeit und Beschleunigung 39
 - 4.2 Newtons Bewegungsgesetze 43
 - 4.3 Das Gravitationsgesetz 44
5. Die Erde als physikalischer Körper 47
 - 5.1 Größe und Gestalt der Erde 47
 - 5.2 Die Masse der Erde 49
 - 5.3 Newtons Gravitationskonstante 51
 - 5.4 Die Dichte der Erde 54
 - 5.5 Erdbebenwellen 54
 - 5.6 Innere Struktur der Erde 55
 - 5.7 Das Magnetfeld der Erde 56
 - 5.8 Die Erdatmosphäre 57
 - 5.9 Refraktion und andere atmosphärische Effekte 59
 - 5.10 Das Alter der Erde 61
6. Die Bewegungen der Erde 64
 - 6.1 Einleitung 64
 - 6.2 Rotation 64
 - 6.3 Schwankungen der Breite 72
 - 6.4 Präzession und Nutation 75
 - 6.5 Bahnbewegung 77
 - 6.6 Die Jahreszeiten 78
 - 6.7 Die Bestimmung der astronomischen Einheit 79
 - 6.8 Die Eigenschaften des Lichts 80
 - 6.9 Der Doppler-Effekt 84
 - 6.10 Die Aberration des Sternlichts 87
7. Dimensionen des Mondes 91
 - 7.1 Die Entfernung des Mondes 91
 - 7.2 Die Größe des Mondes 92
 - 7.3 Die Masse des Mondes 92
 - 7.4 Die Dichte des Mondes 95
 - 7.5 Phasen und Aspekte des Mondes 95
 - 7.6 Siderische und synodische Perioden 96
 - 7.7 Finsternisse 97
 - 7.8 Der Saros 98
 - 7.9 Sonnenfinsternisse 99
 - 7.10 Mondfinsternisse 101
 - 7.11 Gezeiten auf der Erde 103
 - 7.12 Gezeitenentwicklung 105
8. Die Oberfläche des Mondes 107
 - 8.1 Allgemeiner Überblick 107
 - 8.2 Die Bestimmung der Höhen der Berge auf dem Monde 112
 - 8.3 Der Ursprung der Krater 114
 - 8.4 Energie 115
 - 8.5 Meteorzusammenstöße 116
 - 8.6 Die Temperatur des Mondes 116
 - 8.7 Das Fehlen einer Atmosphäre auf dem Mond 117
 - 8.8 Das Entweichen einer Atmosphäre 117
 - 8.9 Die Albedo des Mondes 118
 - 8.10 Der Helligkeitswechsel des Mondes 119
 - 8.11 Temperaturänderung während einer Finsternis 120
 - 8.12 Thermische Radiowellen vom Monde 121
9. Die Bewegungen der Planeten 122
 - 9.1 Hauptgesetzmäßigkeiten 122
 - 9.2 Aspekte und Phasen 122
 - 9.3 Siderische und synodische Umlaufzeiten 124
 - 9.4 Keplers Bestimmung der Marsbahn 126
 - 9.5 Die Keplerschen Gesetze 127
 - 9.6 Newtons Abänderung des dritten Keplerschen Gesetzes 131
 - 9.7 Die Entdeckung von Neptun und Pluto 135
10. Die physikalischen Eigenschaften der Planeten 137
 - 10.1 Die Einteilung der Planeten 137
 - 10.2 Der innere Aufbau der Planeten 137
 - 10.3 Entweichungsgeschwindigkeit von der Erde 138
 - 10.4 Die Atmosphären der Planeten 141
 - 10.5 Die jupiterähnlichen Planeten 145
 - 10.6 Spektrum und Albedo der Erde 148
 - 10.7 Die terrestrischen Planeten Merkur und Venus 150
 - 10.8 Mars 152
 - 10.9 Der Ursprung des Lebens auf den Planeten 159
 - 10.10 Das Pluto-Problem 160

11. Satelliten und der Saturnring 162
 - 11.1 Allgemeine Daten 162
 - 11.2 Die Marsmonde 163
 - 11.3 Die Jupitermonde 164
 - 11.4 Saturns Ring und Satelliten 166
 - 11.5 Die Monde des Uranus und Neptun 169
 - 11.6 Künstliche Satelliten 170
12. Die kleinen Planeten 174
 - 12.1 Die Bodesche Beziehung 174
 - 12.2 Die Trojaner und andere kleine Planeten 176
 - 12.3 Planetenfamilien 177
13. Kometen 180
 - 13.1 Die Bewegungen der Kometen 180
 - 13.2 Die Entstehung der Kometen 182
 - 13.3 Berühmte Kometen 184
 - 13.4 Der Aufbau der Kometen 186
 - 13.5 Kometenschweife 187
 - 13.6 Meteorschwärme 189
14. Meteore 192
 - 14.1 Sporadische Meteore 192
 - 14.2 Radio-Meteore 192
 - 14.3 Meteoriten 195
 - 14.4 Meteorkrater 197
 - 14.5 Mikrometeoriten 198
 - 14.6 Staub im Sonnensystem 198
 - 14.7 Das Zodiakallicht 201
 - 14.8 Gas im Sonnensystem 201
15. Die Sonne 202
 - 15.1 Die Sonnenmasse 202
 - 15.2 Die Größe der Sonne 202
 - 15.3 Die Dichte der Sonne 203
 - 15.4 Die Solarkonstante 203
 - 15.5 Energie pro Gramm 204
 - 15.6 Aufbau der Atomkerne 204
 - 15.7 Thermonukleare Reaktionen 205
16. Der Aufbau der Sonne 209
 - 16.1 Die Oberflächentemperatur der Sonne 209
 - 16.2 Die Zustandsgleichung 211
 - 16.3 Der innere Aufbau der Sonne 212
17. Atomtheorie 216
 - 17.1 Atombau 216
 - 17.2 Anregung und Ionisation 217
 - 17.3 Typen von Spektren 219
18. Die Sonnenatmosphäre 223
 - 18.1 Fraunhofer-Linien 223
 - 18.2 Die Photosphäre 223
 - 18.3 Bildung von Absorptionslinien 226
 - 18.4 Turbulenz 227
 - 18.5 Die Chromosphäre 228
 - 18.6 Die Korona 232
19. Die Aktivität der Sonne 237
 - 19.1 Sonnenflecken 237
 - 19.2 Spektroheliogramme 240
 - 19.3 Fackeln 243
 - 19.4 Chromosphärische Ausbrüche 243
 - 19.5 Filamente und Protuberanzen 246
 - 19.6 Das Magnetfeld der Sonne 248
 - 19.7 Die Sonnenrotation 250
20. Solar-terrestrische Beziehungen 251
 - 20.1 Die Strahlung der Sonne 251
 - 20.2 Radiostörungen 251
 - 20.3 Magnetische Stürme und Polarlichter 252
 - 20.4 Kosmische Strahlen 256
 - 20.5 Andere Effekte 257
21. Der Ursprung des Sonnensystems 259
 - 21.1 Das Problem 259
 - 21.2 Der Anfangszustand des Sonnensystems 262
 - 21.3 Drehimpuls 262
 - 21.4 Die Nebularhypothese 266
 - 21.5 Andere Theorien 267
 - 21.6 Die Protoplaneten-Hypothese 267
 - 21.7 Gezeiteninstabilität 269
 - 21.8 Stellare Planetensysteme 271
22. Entfernungen und Leuchtkräfte der Sterne 272
 - 22.1 Sternparallaxen 272
 - 22.2 Entfernungseinheiten 272
 - 22.3 Scheinbare Größen 273
 - 22.4 Visuelle, photographische und bolometrische Größen 275
 - 22.5 Absolute Größen 276
23. Die Verteilung der Sterne in der Milchstraße 278
 - 23.1 Scheinbare Verteilung der Sterne am Himmel 278
 - 23.2 Sternzählungen 278
 - 23.3 Interstellare Absorption 279
 - 23.4 Kosmische Radiowellen 281
 - 23.5 Galaktische Struktur 285
24. Sternbewegungen 292
 - 24.1 Die Rotation der Galaxien 292
 - 24.2 Die Rotation der Milchstraße 292
 - 24.3 Die Pekuliargeschwindigkeit der Sonne 295
 - 24.4 Eigenbewegung und Tangentialgeschwindigkeit 296
 - 24.5 Raumgeschwindigkeiten 297
 - 24.6 Bewegungshaufen 298
 - 24.7 Statistische Parallaxen 302
25. Klassifikation der Sterne 303
 - 25.1 Die stellare Temperatursequenz 303
 - 25.2 Sternradien 303
 - 25.3 Spektralklassifikation 305
 - 25.4 Das H-R-Diagramm 309
 - 25.5 Riesen 313
 - 25.6 Überriesen 313
 - 25.7 Leuchtkraftkriterien 314
 - 25.8 Spektroskopische Parallaxen 316
 - 25.9 Die weißen Zwerge 317
26. Sternhaufen 321
 - 26.1 Galaktische Sternhaufen 321
 - 26.2 Kugelhaufen 322
 - 26.3 Stabilität von Sternhaufen 328
 - 26.4 Farben-Helligkeits-Diagramme 330
 - 26.5 Der innere Aufbau der Sterne 335

- 27. Interstellare Materie 339
 - 27.1 Interstellarer Wasserstoff 339
 - 27.2 Diffuse Nebel 341
 - 27.3 Dunkelnebel 346
 - 27.4 Die Polarisation des Sternlichts 348
 - 27.5 Der Ursprung der Staubeilchen 350
 - 27.6 Interstellare Absorptionslinien 350
 - 27.7 Die Bestandteile des interstellaren Mediums 353
 - 28. Sterne und Nebel 355
 - 28.1 Wolf-Rayet-Sterne 355
 - 28.2 Hüllen-Sterne 356
 - 28.3 Planetarische Nebel 359
 - 28.4 R Coronae Borealis-Sterne 363
 - 28.5 P Cygni-Sterne 364
 - 28.6 Novae und Supernovae 365
 - 28.7 Der Krebs-Nebel 369
 - 28.8 Die T Tauri-Sterne 374
 - 29. Doppelsterne 376
 - 29.1 Sternmassen 376
 - 29.2 Beobachtungsmethoden 376
 - 29.3 W Ursae Majoris und β Lyrae 385
 - 29.4 Die Sterne größter Masse 385
 - 29.5 Doppelsternstatistik 388
 - 29.6 Die Entwicklung von Doppelsternen 389
 - 29.7 Die Masse-Leuchtkraft-Beziehung 390
 - 29.8 Sternrotation 391
 - 30. Veränderliche Sterne 394
 - 30.1 Echte Veränderliche 394
 - 30.2 Beobachtungsdaten 395
 - 30.3 Gruppen pulsierender Sterne 396
 - 30.4 Der Mechanismus von Sternpulsationen 398
 - 30.5 Langperiodische Veränderliche 401
 - 30.6 Kurzperiodische Veränderliche 403
 - 30.7 Spektrum-Veränderliche 404
 - 30.8 Die Perioden-Leuchtkraft-Beziehung 405
 - 31. Sternsysteme 409
 - 31.1 Die Identifizierung extragalaktischer Systeme 409
 - 31.2 Die Klassifikation extragalaktischer Systeme 410
 - 31.3 Die Farben der Galaxien 417
 - 31.4 Spektralklassifikation von Galaxien 417
 - 31.5 Nebelzählungen 418
 - 31.6 Zusammenstöße von Galaxien 418
 - 31.7 Rotverschiebungen und Helligkeiten extragalaktischer Nebel 420
 - 32. Relativität 425
 - 32.1 Newtonsche Mechanik 425
 - 32.2 Newtons Gravitationsgesetz 426
 - 32.3 Einsteins Äquivalenzprinzip 426
 - 32.4 Die Ablenkung des Sternlichts 426
 - 32.5 Gravitationsrotverschiebung 428
 - 32.6 Das Vorrücken des Merkurperikels 430
 - 33. Fernrohre und Hilfsinstrumente 432
 - 33.1 Einige Eigenschaften des Lichts 432
 - 33.2 Eigenschaften der Linsen 433
 - 33.3 Aberrationen einer einfachen Linse 434
 - 33.4 Der Refraktor 435
 - 33.5 Der Reflektor 439
 - 33.6 Die Schmidt-Kamera 442
 - 33.7 Fernrohrmontierungen 443
 - 33.8 Radio-Teleskope 444
 - 33.9 Spektrographen 445
 - 33.10 Das Interferometer 452
 - 33.11 Das Thermoelement 454
 - 33.12 Lichtelektrische Photometrie 454
- Konstantentafel 457



1. DAS UNIVERSUM

Das Wort *Astronomie* wird aus dem Griechischen abgeleitet: *astron*, Stern, und *nomos*, Gesetz. Die Astronomie befaßt sich dementsprechend mit dem Studium des Universums und der Gesetze, die es beherrschen.

Mit den größten zur Zeit existierenden Teleskopen können wir in den Raum hinaus vordringen bis zu einer Entfernung von der Größenordnung mehrerer Milliarden Lichtjahre, was bedeutet, daß die entferntesten Objekte, die großen äußeren Galaxien, so weit entfernt sind, daß ihre Lichtstrahlen, die sich mit einer Geschwindigkeit von 300 000 km (186 000 Meilen) pro Sekunde ausbreiten, mehrere Milliarden Jahre benötigen, um die Erde zu erreichen.

Innerhalb dieses beobachtbaren Teils des Universums gibt es einige zehn Milliarden einzelner Galaxien, deren größte der Milchstraße und dem großen Nebel in der Andromeda ähneln (Abb. 1.1). Jede Galaxis ist eine Ansammlung vieler Milliarden Sterne, von denen einige viel größer als die Sonne sind, andere dagegen erheblich kleiner. Die Gesamtzahl der Sterne im beobachtbaren Teil des Universums ist angenähert 10 000 000 000 000 000 000 000, und der Gesamtbetrag der in ihnen enthaltenen Materie übersteigt die Masse der Sonne um die gleiche Zahl.

Trotz dieser enormen Materiemenge in Form von Sternen ist die Haupteigenschaft des Universums seine Leere. In einer klaren, mondlosen Nacht kann das unbewaffnete menschliche Auge annähernd 2 000 bis 3 000 Sterne unterscheiden, die über die sichtbare Hemisphäre des Himmels verstreut sind. Mit dem gewöhnlichen Fernglas erhöht sich die Zahl der sichtbaren Sterne auf etwa 10 000, und auf photographischen Platten, die mit langer Belichtungszeit mit Hilfe der größten existierenden Teleskope aufgenommen wurden, liegt die Zahl der Sterne pro Hemisphäre zwischen zwei und drei Milliarden. Die meisten von ihnen gehören zur Milchstraße; nur in wenigen Fällen lassen sich einige der näheren Galaxien auf Photographien in Einzelsterne auflösen, und zwar handelt es sich dabei um die jeweils hellsten Sterne dieser Systeme. Die gesamte Himmelskugel, die 41 253 Quadratgrad oder rund 200 000 mal die Fläche des Vollmonds, von der Erde aus gesehen, umfaßt, würde annähernd 10 000 Sterne pro Vollmondsfläche zeigen. Es ist nicht überraschend, daß auf den besten Milchstraßenaufnahmen die Bilder der Sterne so dicht gedrängt sind, daß sie ineinander fließen und so die milchige Erscheinung eines kontinuierlichen Hintergrundes diffusen Lichtes bewirken (Abb. 1.2).

Aber dieser Eindruck ist irreführend. In Wirklichkeit sind die einzelnen Sterne durch Entfernungen von mehreren Lichtjahren getrennt. In einem Milchstraßenmodell, in dem die Sterne durch Regentropfen dargestellt werden, müßten ihre gegenseitigen Abstände angenähert 75 km betragen, um die richtige Vorstellung von der Dichte der Materie zu geben, soweit sie in Form von Sternen in einer typischen Galaxis enthalten ist. Auf jeden Kubikzentimeter Sternmaterie entfallen rund 10 000 000 000 000 000 000 000 Kubikzentimeter fast leeren Raumes.

←
Abb. 1.1. Der Andromeda-Nebel, das große Sternsystem in der Andromeda, M 31 oder NGC 224. Seine Entfernung beträgt etwa 1,5 Millionen Lichtjahre, sein Winkeldurchmesser 3,5 Grad und sein linearer Durchmesser rund einhunderttausend Lichtjahre. Es enthält annäherungsweise einhundert Milliarden Sterne. (Photographiert mit dem Crossley-Reflektor, Lick-Observatorium.)

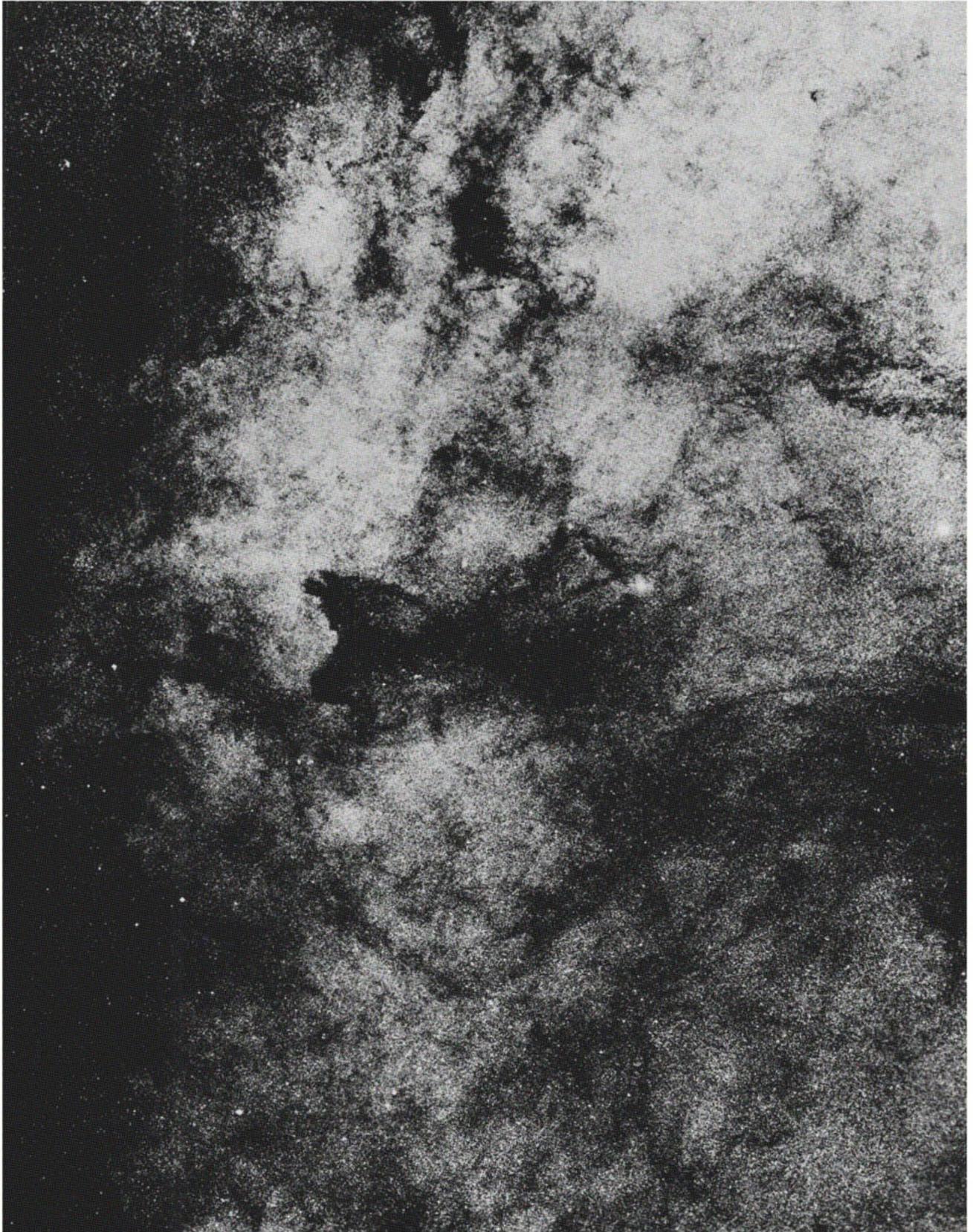
Die Durchschnittsentfernungen zwischen benachbarten Galaxien sind von der Ordnung einer Million Lichtjahre, und der Raum zwischen den Galaxien ist sogar in noch höherem Grade leer als der interstellare Raum innerhalb einer einzigen Galaxis. In dem erforschbaren Teil des Universums entfallen angenähert 10 000 000 000 000 000 000 000 000 Kubikzentimeter leeren Raumes auf jeden Kubikzentimeter Sternmaterie. Da die Durchschnittsdichte eines Sterns nur wenig größer als die des Wassers ist, kann die vorstehende Feststellung auch so formuliert werden, daß die durchschnittliche Dichte des Weltalls von der Ordnung ein Gramm pro 10^{28} Kubikzentimeter ist. Dies ist ungefähr zehn Billionen mal weniger dicht als das, was in der gewöhnlichen Laboratoriumstechnik als Hochvakuum betrachtet wird.

Außer den Sternen enthält das Universum eine gewaltige Menge Gas und Staub. Sie ist nahezu gänzlich in den Galaxien konzentriert, und im Durchschnitt ist der Anteil an Gas in einer Galaxis ungefähr gleich dem Anteil an Materie, die zu Sternen zusammengeballt ist. Der Staubanteil macht etwa 100mal weniger aus. Roh gerechnet entspricht die Dichte des Gases in einer Galaxis einem Atom im Kubikzentimeter. Zum Vergleich beträgt die Zahl der Atome in Luft an der Erdoberfläche ungefähr 10 000 000 000 000 000 000 pro Kubikzentimeter. Trotz der äußerst geringen Dichte des interstellaren Gases kollidieren die Atome miteinander in Intervallen von einigen Tagen oder Wochen und gehorchen wie ein normales Gas im Laboratorium den physikalischen Gesetzen für ideale Gase. Die Sterne andererseits sind so weit voneinander entfernt, daß Zusammenstöße zwischen ihnen niemals beobachtet wurden; Berechnungen zeigen, daß ein durchschnittlicher Stern, der sich nach dem Zufall durch eine Galaxis bewegt, kaum jemals einen wirklichen Zusammenstoß mit einem anderen Stern erleiden wird und nur wenig von seiner Bahn durch nahe Begegnungen mit anderen Sternen abgelenkt werden dürfte.

Die Sonne ist ein Durchschnittssterne nach Masse, Größe, Oberflächentemperatur und innerem Aufbau. Daher liefert das Studium der Sonne wesentliche Aufschlüsse über die physikalischen Eigenschaften anderer Sterne. Die vielleicht auffallendste Eigenschaft der Sonne ist ihre Kugelform. Sie ist eine Gaskugel, die ungefähr 300 000 mal mehr Materie als die Erde enthält. Ihre Oberflächentemperatur liegt bei 6000 Grad, und ihre Zentraltemperatur ist von der Ordnung 20 Millionen Grad. Die Durchschnittsdichte der Sonne ist 40% größer als die des Wassers, doch verhält sich die Sonnenmaterie durchaus wie ein ideales Gas. Die Dichte am äußeren sichtbaren Rand der Sonne beträgt angenähert ein Millionstel, die Zentraldichte ungefähr das 50fache der Dichte des Wassers.

Die Sonne besitzt eine Familie von neun großen Planeten, Hunderten von Tausenden kleiner Planeten und unzähligen kleinen festen Bruchstücken, die gelegentlich als Meteore sichtbar werden, wenn sie in die Erdatmosphäre eindringen und dabei durch die Einwirkung der Luft aufleuchten. Bei Gelegenheit erreichen Meteore die Erde und werden dann als Meteoriten der Untersuchung zugänglich. Sie sind die einzigen kosmischen Körper, die in einem Laboratorium der physikalischen und chemischen Analyse unterworfen werden können. Man nimmt an, daß das Sonnensystem rund einhundert Milliarden Kometen enthält, sowie eine beträchtliche Menge feinen Staubes, der als Zodiakallicht nach Sonnenuntergang und vor Sonnenaufgang zu sehen ist. Der von den Planeten besetzte Raum erstreckt sich bis zu einer Entfernung von rund $1/7000$ der Entfernung bis zu den nächsten Sternen, Alpha und Proxima Centauri. Die Kometen andererseits bewegen sich von der Sonne bis zu Entfernungen von der Ordnung von einem

Abb. 1.2. Sternwolken im Sagittarius-Scorpius-Gebiet. Norden ist oben und Osten rechts. In der Mitte am äußersten rechten Rand des Bildes liegt der Kugelsternhaufen NGC 6522. Die durchschnittliche Entfernung der Wolken beträgt mehrere Tausend Lichtjahre. (Photographiert im roten Licht mit dem 48-Zoll-Schmidt-Teleskop der Mount Wilson und Palomar-Observatorien.)



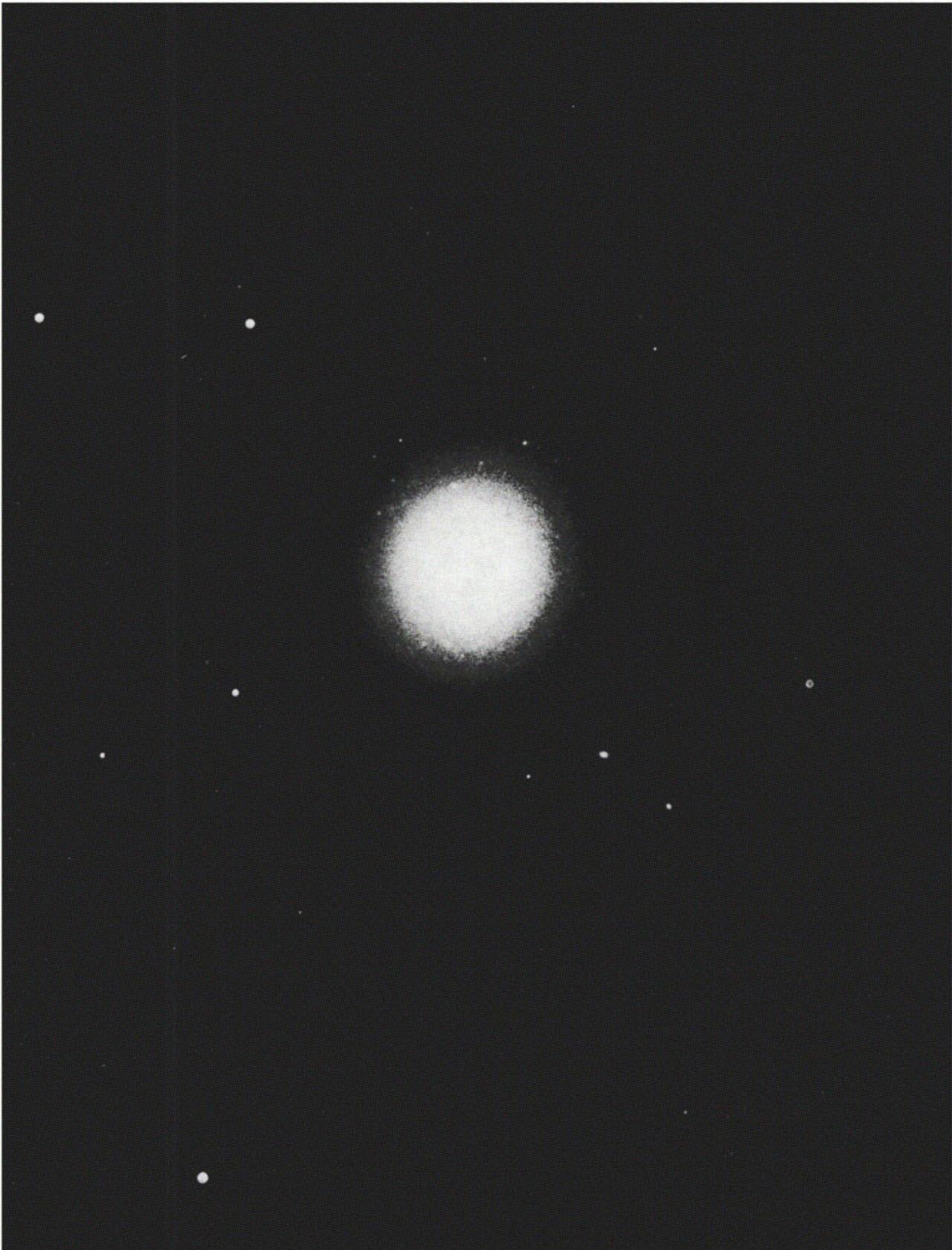
Drittel derjenigen bis α Centauri; wenn man daher die Größe des Sonnensystems nach den Abständen seiner entferntesten Glieder bemißt, so berührt also das ihm zuzuordnende Volumen das der anderen Nachbarsterne. Man kann daher eine Einteilung der Milchstraße in einander berührende Zellen annehmen, deren Radien gleich der Hälfte der Durchschnittsentfernungen zwischen benachbarten Sternen sind.

Der Größte unter den Planeten, Jupiter, hat eine Masse von der Ordnung $1/1000$ der Sonnenmasse. Sogar die Gesamtmasse aller Glieder der Sonnenfamilie ist nur sehr wenig größer als ein Zehntel von einem Prozent der Sonnenmasse. Niemand hat bisher ein Planetensystem in Verbindung mit einem anderen Stern als der Sonne gefunden, obgleich mehrere Sterne bekannt sind mit Sternbegleitern, die an Größe in der Mitte zwischen Jupiter und Sonne liegen. Beobachtungsschranken würden es unmöglich machen, mit den heutigen Instrumenten das schwache reflektierte Licht eines Planeten wie Jupiter zu entdecken, wenn er sich in derselben Entfernung von Alpha Centauri befände wie die Jupiters von der Sonne. Da jedoch Milliarden anderer Sterne der Sonne in allen beobachtbaren Eigenschaften ähneln, ist die Annahme berechtigt, daß sie der Sonne auch hinsichtlich des Besitzes von Planetensystemen ähnlich sind.

Die Sonne und nahezu alle Sterne besitzen eine fast kugelförmige Gestalt. Direkte Beobachtungen mit kleinen Fernrohren zeigen, daß die neun großen Planeten und einige der größten kleinen Planeten ebenfalls der Gestalt nach sehr nahe sphärisch sind. Warum ist dies so? Das Wachstum von Körpern an der Erdoberfläche, zum Beispiel von Kristallen, führt selten, wenn überhaupt jemals, zu sphärischen Objekten. Offensichtlich wird die Bildung von großen Körpern im Universum durch andere Prozesse bestimmt als diejenigen, die Kristalle und andere Formen von Materie an der Erdoberfläche hervorbringen. Diese und andere Überlegungen führen zur Erkenntnis der überragenden Bedeutung der allgemeinen Gravitation in der Astronomie.

Die Sterne und die größeren Planeten haben sich aus interstellarem Gas und Staub verdichtet infolge der Gravitationsanziehung der einzelnen Teilchen untereinander. Da die Gravitationskraft nach dem Zentrum eines anziehenden Körpers gerichtet ist, sind alle durch Kontraktion entstandenen Kondensationen notwendig sphärischer Gestalt, wenn das kondensierende Medium nicht rotiert. Andernfalls wird der kontrahierende Körper mehr oder weniger abgeplattet sein. Da die Sonne eine nur sehr kleine Rotationsgeschwindigkeit am Äquator besitzt, ist ihre Abplattung zu klein, um sich messen zu lassen. Auch die Gestalt der Erde weicht wenig von einer Kugel ab, doch die Jupiterscheibe ist, wie die Betrachtung durch ein Fernrohr zeigt, an den Polen abgeflacht. Es gibt eine Anzahl schnell rotierender Sterne in der Milchstraße, aber ihre Oberflächenformen können selbst mit den größten existierenden Fernrohren nicht direkt bestimmt werden. Jedoch ergibt die Theorie rotierender Gasmassen, daß ein Stern mit einer Rotationsperiode von der Ordnung einiger Stunden linsenförmige Gestalt annehmen würde mit einer scharfen Kante am Äquator und einem flachen äquatorialen Ring rundherum. In einem solchen Stern ist der Äquatordurchmesser etwa dreimal so groß wie die Entfernung zwischen den beiden Polen. Auch die Galaxien müssen als Verdichtungen in einem Urganz entstanden sein, welches das Universum vor einigen fünf oder sechs Milliarden Jahren erfüllte. Turbulente Bewegungen des Mediums waren nicht vollständig aufgehoben in einer einzelnen wolkenartigen Kondensation. Eine Wolke mit geringer oder gar keiner Rotation sollte eine kugelförmige Gestalt angenommen haben. Eine Anzahl sphärischer Galaxien wurde auf Photo-

Abb. 1.3. Sphärische Galaxis im Sternbild Virgo, M 87 oder NGC 4486. Diese Galaxis besteht aus Milliarden von Sternen ohne Anzeichen einer Spiralstruktur und ohne auffallende Staub- und Gaswolken. Die Originalaufnahme zeigt einen Gasstreifen nahe dem Zentrum. Dieses Objekt ist eine intensive Quelle von Radiostrahlung. (Photographiert mit dem 200-Zoll-Reflektor, Mount Wilson und Palomar-Observatorien.)



graphien beobachtet, die mit großen Teleskopen erhalten wurden (Abb. 1.3). Bei anderen Wolken mit größerer Rotationsgeschwindigkeit ergaben sich abgeflachte Formen. Bei seitlichem Anblick zeigen sie eine linsenartige Kontur. Bei senkrechter Aufsicht sind sie angenähert kreisförmig (Abb. 1.4 und 1.5).

Die Gravitationstheorie erhielt ihre stärksten Anregungen aus dem Studium der Planetenbewegungen. Die Anziehungskraft zwischen zwei irdischen Objekten ist so klein, daß sie nur eine geringe oder gar keine Rolle in der täglichen Erfahrung spielt. Die von der Erde auf Objekte an ihrer Oberfläche ausgeübte Anziehung war natürlich schon in alter Zeit bekannt, und die Eigenschaften fallender Körper wurden von Galilei in der ersten Hälfte des 17. Jahrhunderts untersucht. Aber es bedurfte des Genius eines Isaac Newton um zu beweisen, daß die gleiche Kraft, die das Fallen eines Steines zur Erdoberfläche hin bewirkt, auch den Mond zum Zentrum der Erde, und die Erde zum Zentrum der Sonne fallen läßt. Diese Verallgemeinerung der Gravitationstheorie wurde möglich, nachdem Newton seine drei Bewegungsgesetze aufgestellt hatte. Bis er erkannte, daß der Mond entweder stationär im Raum stehen bleiben oder sich mit gleichförmiger Geschwindigkeit längs einer geraden Linie bewegen würde, wenn keine Kraft auf ihn wirkte, wäre die Annahme unvernünftig erschienen, daß der Mond zur Erde fällt, ohne jedoch jemals ihre Oberfläche zu erreichen. Erst war Verständnis für die Tatsache erforderlich, daß die durchfallene Strecke dieselbe ist, ob nun ein Körper aus der Ruhelage senkrecht nach unten fällt oder, wenn er sich bereits bewegt, nur seine Bewegungs-komponente in senkrechter Richtung, d. h. in Richtung der wirkenden Kraft, betrachtet wird.

Die Theorie des Sonnensystems so, wie wir sie heute kennen, ist erbaut auf dem Grund, der durch Newtons Arbeiten über die Gravitation gelegt wurde. Nur eine relativ geringfügige Ausdehnung war erforderlich, um zu erkennen, daß die Gravitation nicht auf das Sonnensystem beschränkt ist, sondern im ganzen Universum wirkt und daß viele Eigenschaften der Sterne und Sternsysteme mit Hilfe der Schwerkraft sich erklären lassen. Gravitationsanziehung spielt auch in der Dynamik von Doppelgalaxien eine Rolle, in denen die Entfernung der beiden Komponenten nicht viel größer ist als ihre Durchmesser. Mit sehr wenigen Ausnahmen werden die Bewegungen aller Objekte im Universum durch die allgemeine Gravitation bestimmt. Ihre Eigenschaften sind so wohlbekannt, daß sich die künftigen Stellungen der Planeten im Sonnensystem für Hunderte von Millionen Jahren vorhersagen lassen und daß Berechnungen, die sich in die Vergangenheit erstrecken, genau mit allen Beobachtungen übereinstimmen, die seit den frühesten Tagen der Astronomie angestellt wurden. Doch trotz dieses Erfolges ist die physikalische Natur der Gravitationskraft heute noch ebenso geheimnisvoll, wie sie es in den Tagen Galileis und Newtons war. Sie wirkt über Entfernungen von vielen Millionen Meilen und wird durch dazwischentretende Körper nicht absorbiert: Die Mondbewegung erleidet keine meßbare Störung während einer Mondfinsternis, wenn die Erde sich zwischen Sonne und Mond befindet. Noch überraschender ist die Tatsache, daß die Schwerkraft für alle Körper gleicher Masse dieselbe ist und nicht von ihrer chemischen Zusammensetzung und ihren physikalischen Eigenschaften abhängt.

Nahezu alle Probleme der Astronomie können gelöst werden, ohne daß man mehr über die Gravitation wissen muß als das, was in Newtons Gesetzen enthalten ist. Die wenigen Ausnahmen — und sie sind wichtig — betreffen allmähliche Änderungen der Bahnen der inneren Planeten, insbesondere Merkurs, und das Verhalten von Licht in einem Gravitationsfeld. Einsteins Relativitätstheorie ist ein weiterer Schritt in der Deutung des Gravitationsphänomens. Auf den ersten Blick erscheint die neue Gravitationstheorie nicht verständlicher als die alte

→
Abb. 1.4. Galaxis bei seitlichem Anblick. Ein Spiralnebel im Sternbild Coma Berenices, NGC 4565. (Photographiert mit dem 200-Zoll-Teleskop, Mount Wilson und Palomar-Observatorien.)



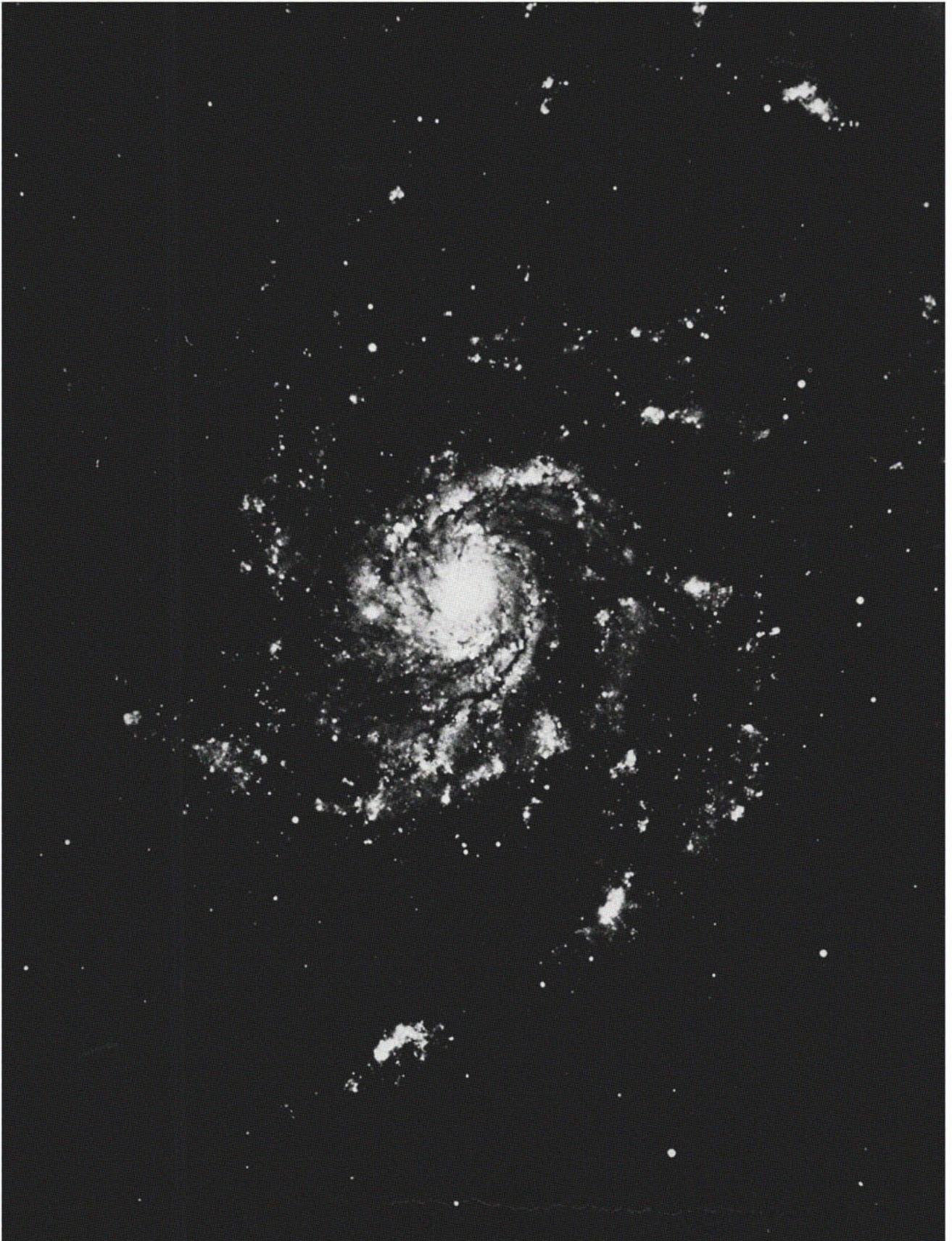
Theorie Newtons. Eine kleine Überlegung jedoch zeigt, daß keine Theorie erklärt, was Gravitation ist. Es ist in der Tat nutzlos, nach einer einfachen Erklärung der Gravitation durch irgendeine Theorie zu suchen. Beide Theorien gehen von dem beobachteten Verhalten bewegter Körper aus, und ihr Zweck ist es, folgerichtige Regeln zu entwickeln, um das Verhalten dieser Körper in Zukunft genau voraussagen zu können. Der Erfolg der Theorie hängt davon ab, ob die Voraussagen durch Beobachtungen bestätigt werden. Newtons Theorie reicht für fast alle Probleme aus und muß daher als eine weitgehende Annäherung an die Wahrheit angesehen werden. Einsteins Theorie sagt darüber hinaus die Phänomene genau voraus, bei denen Newtons Theorie versagt, und sie darf daher als noch bessere Annäherung an die Wahrheit betrachtet werden.

Die Bewegungen der Sterne innerhalb einer Galaxis lassen sich mit denen eines Moskitoschwarms vergleichen: Der Schwarm der Sterne läuft in einer Kreisbahn um das Zentrum der Galaxis mit einer Geschwindigkeit, die in der Umgebung der Sonne 300 km/sec beträgt entsprechend einer Periode von 200 Millionen Jahren. Die einzelnen Sterne innerhalb des Schwarms bewegen sich in alle Richtungen mit Geschwindigkeiten von der Ordnung 20 km/sec im Mittel. Manche Sterne können jedoch auch weit größere zufällige Bewegungen erhalten — bis zu 500 km/sec. Diese Bewegungen übersteigen die Geschwindigkeit, die ein Stern haben würde, wenn er aus dem Unendlichen in die Galaxis fallen würde. Man sagt daher, dieser Stern übersteige die Entweichungsgeschwindigkeit aus der Galaxis. Er wird die Galaxis verlassen und ein intergalaktischer Stern werden, bis er von einer anderen Galaxis eingefangen wird. Es gibt bisher noch keine direkten Beobachtungen von Einzelsternen zwischen den Galaxien, doch kann ihre Existenz nicht bezweifelt werden. Ihre Anzahl muß jedoch unbedeutend sein verglichen mit der Zahl der Sterne, die durch die Schwerkraft gezwungen sind, in den Spiralarmen von Galaxien zu bleiben.

Die Beobachtung zeigt, daß die Geschwindigkeiten von Galaxien, die durch Entfernungen von Millionen von Lichtjahren voneinander getrennt sind, durch zwei Bewegungstypen beschrieben werden können: Zufallsbewegungen in alle Richtungen mit Durchschnittsgeschwindigkeiten von der Ordnung 1000 km/sec und systematische Fluchtbewegungen mit der Tendenz, die intergalaktischen Entfernungen zu vergrößern. Hierbei handelt es sich um das Phänomen des expandierenden Universums. Die Materiedichte nimmt ständig ab und an den Grenzen des beobachtbaren Teils des Universums verschwinden laufend Galaxien in die unbeobachtbaren äußeren Gebiete mit Geschwindigkeiten von der Ordnung der Lichtgeschwindigkeit. Obgleich von Zeit zu Zeit die Vermutung geäußert wird, daß die Rotverschiebungen der Galaxien nicht durch wirkliche Fluchtgeschwindigkeiten bedingt sind, sondern durch eine Eigenschaft des Lichts verursacht werden, die der physikalischen Theorie noch unbekannt ist und etwas Ähnliches wie einen Energieverlust mit der Zeit in sich schließt, scheint das vorliegende Beweismaterial, soweit sich jetzt sagen läßt, die ursprüngliche Deutung zu stützen. Es wurde auch vermutet, daß trotz der Expansion des Universums die Dichte der Materie nicht abnimmt, sondern das neue Materie kontinuierlich in allen Teilen des Universums geschaffen wird, um die scheinbare Dichteabnahme auszugleichen. Diese Theorie der kontinuierlichen Materieerzeugung von F. Hoyle, H. Bondi und anderen ist einer der vielen Versuche, die Beobachtungsergebnisse verständlich zu machen, die den Forderungen des gesunden Menschenverstandes zu widersprechen scheinen.

→

Abb. 1.5. Galaxis in senkrechter Aufsicht. Spiralnebel im Sternbild Ursa Major, M 101 oder NGC 5457 Entfernung 3,6 Millionen Lichtjahre, linearer Durchmesser rd. 240 000 Lichtjahre. Die Arme bestehen aus Sternen und Staub- und Gaswolken, der Kern überwiegend aus Sternen. (Photographiert mit dem 200-Zoll-Reflektor, Mount Wilson und Palomar-Observatorien.)



Wenn das Phänomen des expandierenden Weltalls wörtlich aufgefaßt wird und wenn in der Vergangenheit keine Erzeugung neuer Materie stattgefunden hat, so muß die Dichte in der Nachbarschaft der Milchstraße vor einigen Milliarden Jahren ganz beträchtlich größer gewesen sein als heute. In der Tat müßten vor fünf oder sechs Milliarden Jahren sämtliche Galaxien in ein ganz kleines Raumvolumen zusammengedrängt gewesen sein. Diese Überlegung ist es, die zu der Vorstellung des „Alters der Welt“ geführt hat, welches auf fünf bis sechs Milliarden Jahre geschätzt wird. Diese Vorstellung muß als eine zweckmäßige Art, die Ergebnisse der Messungen der Rotverschiebungen von Galaxien auszudrücken, angesehen werden, es sollte ihr aber keine tiefe philosophische Bedeutung unterlegt werden. Sie bedeutet nicht, daß das Universum plötzlich vor fünf bis sechs Milliarden Jahren aus dem Nichts entstanden ist; sie besagt nur, daß im Rahmen der gegenwärtigen Theorie die Entwicklung des Universums fünf oder sechs Milliarden Jahre zurückverfolgt werden kann und nichts über seine Eigenschaften in der Zeit vorher bekannt ist.

Während die Materie innerhalb einer Galaxis jetzt in Form von Sternen und Gas mit einer Beimischung von Staub verteilt und der interstellare und intergalaktische Raum fast leer ist, ist das gesamte Volumen des beobachtbaren Universums mit Energie in der Form von Strahlung erfüllt. Die Sterne senden dauernd Licht und Wärme in das Weltall aus, und jedes von einem Stern emittierte Photon wandert nach außen mit einer Geschwindigkeit von 300 000 km/sec. Der Betrag an Strahlungsenergie, der in einem Kubikzentimeter des interstellaren Raums enthalten ist, läßt sich berechnen. Das Ergebnis ist ein äußerst kleiner Betrag — angenähert 0,000 000 000 001 der konventionellen Energieeinheit, des Erg. Um diese Größe richtig einschätzen zu können, sollte sie mit der Menge an Sonnenenergie verglichen werden, die jeder Quadratcentimeter der Erdoberfläche empfängt, nämlich etwa eine Million erg/sec. Die Strahlungsdichte im leeren Raum ist in Annäherung dieselbe in einer Galaxis und zwischen den Galaxien. Strahlungsenergie strömt kontinuierlich in die äußeren, nicht beobachtbaren Raumgebiete und geht wahrscheinlich für immer verloren.

Fast unser gesamtes Wissen über das Weltall beruht auf dem Studium der Strahlung, die von den Himmelskörpern ausgesandt wird. Diese Strahlung umfaßt sichtbares Licht, wie auch unsichtbare Formen wie γ -Strahlen, Röntgen-Strahlen, ultraviolette und infrarote Strahlung, Wärmestrahlung, Mikrowellen und Radiowellen. Wie im Fall der Schwerkraft sind die Eigenschaften des Lichts gut bekannt. Dagegen gibt es keine einfache Erklärung des Lichtphänomens. Mathematisch lassen sich die meisten seiner Eigenschaften durch zwei verschiedene Theorien beschreiben. Die erste Theorie faßt das Licht als Schwingung auf, die Welleneigenschaften besitzt: Länge (Farbe), Amplitude (Intensität) und Ausbreitungsgeschwindigkeit. Die zweite Theorie beschreibt das Licht als einen Strom diskreter Photonen, von denen jedes ein Energiequantum trägt, dessen Betrag der Wellenlänge umgekehrt proportional ist, und die sich im Vakuum mit derselben Geschwindigkeit von 300 000 km/sec bewegen. In der ersten Theorie wird kein Versuch gemacht, das schwingende Medium zu beschreiben, noch wird in der zweiten Theorie versucht, etwas über die physikalischen Eigenschaften der Photonen auszusagen. Jede Theorie wird allein durch den Erfolg in der Voraussage verschiedener Phänomene gerechtfertigt, die sich durch Laboratoriumsexperimente oder astronomische Beobachtungen nachprüfen lassen.

Da alle Kenntnisse über die Sterne aus der Erforschung ihrer Strahlung folgen, erhebt sich die Frage, ob das Weltall dunkle Sterne in größerer Zahl enthält. Wahrscheinlich können sie nicht entdeckt werden außer in seltenen Fällen, wenn sie das Licht eines leuchtenden Objekts abschirmen, wenn nicht ihre Massen groß genug sind, um beobachtbare Störungen in den Bewegungen leuchtender Sterne als Ergebnis ihrer Gravitationsanziehung zu bewirken. Es kann gezeigt werden, daß die Kreisbahnen der Sterne um das galaktische Zentrum vollständig erklärt werden können durch die Anziehung, die auf jeden Stern durch die Gesamtheit aller leuchtenden Sterne in der Galaxis und ihres gesamten Gases und Staubes ausgeübt wird.

Dunkle und folglich nicht zu entdeckende Massen können nur einen kleinen Bruchteil zur Gesamtmasse der sichtbaren Himmelsobjekte beitragen.

Verfinsterungen eines Sternes durch einen anderen ereignen sich in Tausenden von Doppeltsternsystemen, in denen periodisch die eine Komponente die andere bedeckt. Kein System ist jemals gefunden worden, in dem der verfinsternde Stern ganz dunkel ist. Es ist daher hinreichend sicher, daß große dunkle Sterne im Weltall nicht existieren. Dagegen würde ein sehr kleiner Stern oder ein Planet der Entdeckung entgehen sogar dann, wenn er zufällig bei seiner Bahnbewegung einen sehr kleinen Teil der Scheibe eines leuchtenden Sterns verfinstern würde. Solche kleinen dunklen Objekte könnten in großer Zahl in jeder Galaxis vorhanden sein, ohne merklich zu ihrer Gesamtmasse beizutragen. Aus verschiedenen Gründen dürfen wir annehmen, daß äußerst dichte Sterne, deren Masse der Sonnenmasse ähnlich, deren Volumen aber nahe gleich dem der Erde ist, der Zahl nach einen wesentlichen Teil der Populationen vieler Galaxien bilden. Die durch Beobachtungen bekannten „weißen Zwerg“-Sterne sind nicht vollständig dunkel, aber es ist wahrscheinlich, daß sie keine Energiequellen mehr enthalten und sich in dem Stadium befinden, in dem sie ihren Wärmegehalt durch Ausstrahlung verlieren. Das Schicksal eines solchen Sterns dürfte sein, schließlich ein dunkles Objekt zu werden. Es gibt auch keinen Grund, der der Annahme widerspricht, daß planetenartige Objekte nicht immer mit leuchtenden Sternen verbunden sind, daß aber viele derartige Körper in jeder Galaxis existieren und für immer ungesehen bleiben. Endlich muß sich im interstellaren Raum eine große Zahl kleiner fester dunkler Objekte wie Meteore und Kometen befinden. Unser eigenes Sonnensystem verliert jedes Jahr an den interstellaren Raum eine Anzahl Kometen und Meteore als Ergebnis von Störungen durch die Planeten, die unter günstigen Umständen die Bahngeschwindigkeiten dieser Objekte über die Entweichungsgeschwindigkeiten aus dem Sonnensystem hinaus erhöhen. Die Zahl dieser kleinen interstellaren Körperchen pro Volumeneinheit muß jedoch klein sein. Andererseits wird das Sonnensystem von Zeit zu Zeit Kometen oder Meteoriten begegnen, die irgendeinem anderen Stern entwichen sind und als interstellare Objekte an der großen Annäherungsgeschwindigkeit erkannt werden, wenn sie in die Nachbarschaft der Sonne gelangen. Kein Komet oder Meteor ist jedoch bisher schlüssig als interstellar identifiziert worden.

Der Strahlungsfluß von der Sonne wird aus Messungen der Energie berechnet, die pro Zeiteinheit an der Erdoberfläche empfangen wird. Diese Energie ist so groß, daß in der Sonne irgendein Mechanismus wirksam sein muß, der einen ausreichenden Nachschub über Intervalle von mehreren Milliarden Jahren aufrechtzuerhalten gestattet. Die Quelle dieser Energie wurde in Kernprozessen gefunden, besonders in denjenigen der Umwandlung von Wasserstoff in Helium. Jedoch ist der Nachschub an Wasserstoff in der Sonne begrenzt; und daher wird die Sonne bei ihrer jetzigen Ausstrahlung den verfügbaren Wasserstoffvorrat in zehn bis hundert Milliarden Jahren verbrauchen. Soweit bekannt, geht dieser Alterungsprozeß in allen Sternen des Universums vor sich. Wasserstoff wird in Helium verwandelt und Helium wahrscheinlich in schwere Elemente; daher unterliegt die chemische Zusammensetzung des Universums einer kontinuierlichen Änderung. Es ist einleuchtend anzunehmen, daß vor fünf bis sechs Milliarden Jahren der größte Teil des Weltalls aus Wasserstoff bestand. Mit fortschreitender Zeit nimmt der Anteil an schweren Elementen relativ zum Wasserstoff zu. Ein Teil des mit schweren Elementen angereicherten stellaren Materials kehrt in das interstellare gasförmige Medium zurück, vielleicht in Form von Protuberanzen oder noch heftigeren Explosionen, und daher wird das interstellare Gas selbst mit schweren Elementen angereichert. Doch sind sogar im gegenwärtigen Zeitpunkt Wasserstoff-Atome etwa 2000 mal häufiger als die Atome der schweren Elemente. Wahrscheinlich ist dieser Prozeß nicht umkehrbar. Alte Sterne wie die Sonne, die vor fünf Milliarden Jahren als Kondensation interstellaren Gases gebildet wurden, enthielten zu Anfang fast reinen Wasserstoff, während Sterne, die jetzt aus Gaswolken der Milchstraße entstehen, ihren Entwicklungsgang mit einer Beimischung von schweren Elementen beginnen.



Abb. 1.6. Ein Balken-Spiralnebel, NGC 7741 im Pegasus. (Photographiert mit dem 200-Zoll-Teleskop, Mount Wilson und Palomar-Observatorien.)

2. FUNDAMENTALE EINHEITEN

2.1 Englische und metrische Einheiten

Die Astronomie befaßt sich wie jede andere physikalische Wissenschaft mit quantitativen Messungen an den physikalischen Objekten. Der Astronom hat in erster Linie genaue Messungen der Entfernungen, Massen, Größen und Bewegungen der Planeten und Sterne anzustellen. Diese Größen lassen sich alle auf drei Fundamenteinheiten zurückführen: Länge, Masse und Zeit. In den Vereinigten Staaten ist das gesetzliche System von Fundamental-Einheiten das englische System, in dem als Standardeinheiten dienen: Länge, 1 yard; Masse, 1 pound; Zeit, 1 second.

Das englische System mit seinen verschiedenen Teilen ist für wissenschaftliche Zwecke ungeeignet. Daher wurde für alle wissenschaftlichen Arbeiten das metrische System angenommen. Seine Standard-Einheiten sind:

Länge	1 Meter (m)
Masse	1 Kilogramm (kg)
Zeit	1 Sekunde (sec).

Das Meter, ursprünglich definiert als die Länge, auf der Erdoberfläche, des zehnmillionsten Teils des Bogens zwischen Pol und Äquator, wird in 100 Einheiten, genannt *Zentimeter* (cm), unterteilt. Das Zentimeter wird in 10 *Millimeter* (mm) unterteilt. Für größere Entfernungen ist das *Kilometer* (km) = 1000 Meter in Gebrauch. Das Gramm ist definiert als die Masse eines Kubikzentimeters reinen Wassers bei 4° Celsius. Das Kilogramm (kg) enthält 1000 Gramm (g). Das englische und das metrische System verwenden die gleiche Zeiteinheit, die Sekunde, definiert als der Bruchteil 1 : 31 556 925,975 des tropischen Jahres für 1900,0 (Abschn. 6.6).

Die folgende Tabelle faßt die Beziehungen zwischen beiden Systemen zusammen:

Tabelle 2.1

Längeneinheiten		
1 km	= 0,6214 mile	1 mile = 1,6093 km
1 cm	= 0,3937 in	1 in = 2,5400 cm
Masseneinheiten		
1 kg	= 2,2046 lb	1 lb = 0,4536 kg
1 g	= 0,0353 oz	1 oz = 28,3495 g
Zeiteinheiten		
1 siderisches Jahr = 31 558 150 sec = $3,2 \cdot 10^7$ sec.		

Ogleich das Meter, das Kilogramm und die Sekunde die Standardeinheiten sind, werden als metrische Einheiten am häufigsten das Zentimeter, das Gramm und die Sekunde gebraucht. Diese drei Einheiten bilden das cgs-System.

2.2 Temperatur-Skalen

Die Bestimmung der Temperatur eines Himmelskörpers spielt in der Astronomie eine ebenso fundamentale Rolle wie die Messungen seiner Masse, Entfernung und Bewegungen. Eine Temperatur-Skala wird festgelegt, indem man willkürlich das Intervall zwischen den Temperaturen gefrierenden und siedenden Wassers, gemessen in Seehöhe, in eine bestimmte Anzahl von Grad einteilt und einen Nullpunkt der Skala annimmt. Die im englischen System gewöhnlich benützte Fahrenheit-Skala legt 180 gleiche Grade zwischen den Gefrierpunkt und den Siedepunkt des Wassers. Der Nullpunkt der Skala (0°F) ist so gewählt, daß Wasser bei 32° gefriert und bei $32 + 180$ oder 212°F siedet.

Das metrische System verwendet zwei Skalen, die sich nur im Nullpunkt unterscheiden und bei denen der Abstand zwischen den Fundamentalpunkten des Wassers in 100 Grad geteilt

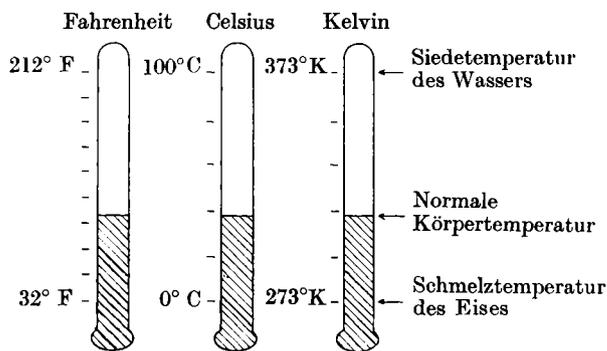


Abb. 2.1. Temperaturskalen. Fahrenheit, Celsius, Kelvin.

ist. Die Zentigrad- oder Celsius-Skala nimmt als Nullpunkt den Gefrierpunkt des Wassers an; in dieser Skala siedet folglich das Wasser bei 100°C . Die in der Astronomie am häufigsten gebrauchte Kelvin-Skala oder absolute Skala hat ihren Nullpunkt 273° unter dem Gefrierpunkt des Wassers. Nach den Gesetzen der Thermodynamik ist 0°K die niedrigste Temperatur, die es geben kann, — der sogenannte absolute Nullpunkt — weil bei dieser Temperatur die Atome eines Gases in Ruhe sein würden. Sogar der Staub

im interstellaren Raum besitzt eine Temperatur von mehreren Grad über dem absoluten Nullpunkt. Nach der Kelvin-Skala gefriert Wasser bei 273° und siedet bei 373° . Abb. 2.1 zeigt die Beziehung zwischen den drei Temperaturskalen.

2.3 Zehnerpotenzen

Für den Astronomen ist es notwendig, mit sehr großen und sehr kleinen Zahlen umzugehen. Zum Beispiel ist die Entfernung der Erde von der Sonne 150 000 000 km, die Masse des Wasserstoffatoms 0,000 000 000 000 000 000 000 17 g, die Gesamtzahl der Sterne in der Milchstraße rund 100 000 000 000. Weil es lästig ist, jedesmal wenn eine solche Zahl vorkommt, diese sämtlichen Nullen zu schreiben, gebraucht man ein abgekürztes Bezeichnungssystem, das Zehnerpotenzen verwendet:

$$\begin{array}{ll}
 1 = 10^0 & 1 = 10^0 \\
 10 = 10^1 & 0,1 = 10^{-1} \\
 100 = 10^2 & 0,01 = 10^{-2} \\
 1\ 000 = 10^3 & 0,001 = 10^{-3} \\
 10\ 000 = 10^4 & 0,0001 = 10^{-4} \\
 100\ 000 = 10^5 & 0,00001 = 10^{-5}
 \end{array}$$

Der Exponent (Potenz) von 10 gibt die Zahl der Stellen an, um die der Dezimalpunkt von der Einheit entfernt ist. Ein positiver Exponent zeigt eine Zahl größer als 1 an (Dezimalpunkt nach rechts verschoben), ein negativer Exponent eine Zahl kleiner als 1 (Dezimalpunkt nach links verschoben).

Unter Verwendung dieser Bezeichnungsweise werden die obigen Beispiele: $1,5 \cdot 10^8 \text{ km}$ für die Entfernung Erde—Sonne; $1,7 \cdot 10^{-24} \text{ g}$ für die Masse des Wasserstoffatoms und 10^{11} für die

Gesamtzahl der Sterne des Milchstraßensystems. Die verschiedenen Einheiten im metrischen System können leicht in folgender Weise umgewandelt werden :

$$\begin{aligned} 1 \text{ km} &= 10^3 \text{ m} = 10^5 \text{ cm} = 10^6 \text{ mm} \\ 1 \text{ m} &= 10^2 \text{ cm} = 10^3 \text{ mm} = 10^{-3} \text{ km} \\ 1 \text{ cm} &= 10 \text{ mm} = 10^{-5} \text{ km} = 10^{-2} \text{ m} \\ 1 \text{ mm} &= 10^{-1} \text{ cm} = 10^{-3} \text{ m} = 10^{-6} \text{ km} \\ 1 \text{ kg} &= 10^3 \text{ g} \\ 1 \text{ g} &= 10^{-3} \text{ kg} \end{aligned}$$

Diese Bezeichnungsweise ist für arithmetische Rechnungen nützlich, da bei der Multiplikation zweier Zahlen die Exponenten zu addieren sind :

$$\begin{aligned} 10^3 \cdot 10^2 &= 10^{3+2} = 10^5 \\ 10 \cdot 10 \cdot 1 &= 10^{1+1+0} = 10^2 \\ 3 \cdot 10^5 \cdot 2 \cdot 10^{-3} &= 6 \cdot 10^{5-3} = 6 \cdot 10^2 \end{aligned}$$

und bei der Division die Exponenten zu subtrahieren sind :

$$\begin{aligned} \frac{10^5}{10^3} &= 10^{5-3} = 10^2 \\ \frac{4 \cdot 10^2}{2 \cdot 10^{-3}} &= 2 \cdot 10^{2-(-3)} = 2 \cdot 10^{2+3} = 2 \cdot 10^5. \end{aligned}$$

2.4 Eigenschaften des Kreises und der Kugel

Die in diesem Buch gebrauchten Winkleinheiten sind der Grad, die Minute und die Sekunde. Jeder Kreis enthält 360 Grad, jeder Grad 60 Minuten und jede Minute 60 Sekunden. Gelegentlich wird, um Verwechslungen mit den Zeiteinheiten zu vermeiden, der Ausdruck „*Bogen*“ zum Winkelmaß hinzugefügt ; zum Beispiel beträgt der Durchmesser des Vollmonds 30 Bogenminuten. Die Winkleinheiten sind leicht umzurechnen : So enthält der Kreis $360 \cdot 60 \cdot 60 = 1\,296\,000 \approx 1,3 \cdot 10^6$ Bogensekunden.

Der Umfang eines Kreises mit dem Radius r cm ist gleich $2 \pi \cdot r$ cm, worin $\pi = 3,1416$ ist. Eine Kugel, deren Querschnitt ein Kreis ist, enthält 41 253 Quadratgrad. Das Volumen einer Kugel beträgt $\frac{4 \pi}{3} r^3$ Kubikzentimeter, wenn r der Kugelradius in cm ist. Die Oberfläche einer Kugel ist gleich $4 \pi r^2$ Quadratzentimeter.

Aufgaben

1. Berechne die Zahl der Sekunden in einem Jahr.
2. Berechne die Gesamtmasse in g der Sterne des Milchstraßensystems. Ein Stern hat im Durchschnitt eine Masse von $2 \cdot 10^{33}$ g und es gibt 10^{11} Sterne im Milchstraßensystem.
3. Die Erde hat einen Radius von 6 400 km. Die Entfernung bis zum Mond beträgt 380 000 km. Drücke die Entfernung zum Mond in Einheiten des Erdradius aus.
4. Benütze den oben angegebenen Erdradius, um den Äquatorumfang der Erde in km und in Meilen zu finden.
5. Der Radius der Sonne ist ungefähr 100mal größer als der Erdradius. Gib das Verhältnis des Volumens der Sonne zum Volumen der Erde an.
6. Berechne die Zahl der Quadratzentimeter auf einer Kugel, deren Radius gleich der mittleren Entfernung der Erde von der Sonne ist.
7. $68^\circ \text{ F} = 20^\circ \text{ C}$. Drücke diese Temperatur in Kelvin-Grad aus.

3. KOORDINATEN UND ZEIT

3.1 Einleitung

Die ersten Photographien der Erde aus großer Höhe wurden mit Kameras von Raketen aus aufgenommen. Sie zeigen die Krümmung der Erde und die Ausdehnung ihrer Atmosphäre (Abb. 3.1), aber sie reichen noch nicht aus, um Aufschluß über ihre Größe, Gestalt und Bewegung zu geben. Alle grundlegenden Daten über die Erde stammen von Beobachtungen, die auf ihrer Oberfläche angestellt wurden. Die Erde ist ein angenähert sphärischer Körper, der einmal in 24 Stunden um eine Achse rotiert. Die Rotationsachse geht durch den Erdmittelpunkt und trifft die Oberfläche im Nord- und Südpol. Die Erde ist leicht abgeflacht an den Polen und besitzt eine Aufwölbung am Äquator, einem Großkreis auf ihrer Oberfläche halbwegs zwischen den Polen, der von einer Ebene durch den Erdmittelpunkt gebildet wird.

Die Rotation der Erde um ihre Achse von Westen nach Osten mit einer Periode von einem Tag läßt alle Himmelskörper — Sonne, Mond, Planeten und Sterne — sich scheinbar um die Erde von Osten nach Westen bewegen mit derselben Periode.

Die Erde bewegt sich um die Sonne mit einer Periode von nahezu $365\frac{1}{4}$ Tagen oder einem Jahr. Der Weg, auf dem die Erde den Raum durchläuft — ihre Bahn — liegt in einer Ebene und ist fast kreisförmig. Der Erdäquator liegt nicht in der Bahnebene, sondern bildet mit ihr einen Winkel von $23\frac{1}{2}$ Grad.

Die Umlaufbewegung der Erde in ihrer Bahn um die Sonne läßt die Sonne sich scheinbar allmählich ostwärts unter den Sternen im Laufe eines Jahres verschieben. Diese langsame jährliche Ostbewegung ist der viel schnelleren täglichen Bewegung in westlicher Richtung überlagert; die Sterne nehmen an der Ostbewegung wegen ihrer großen Entfernungen vom Beobachter nicht teil. Der scheinbare Weg der Sonne unter den Sternen wird die Ekliptik genannt. Da die Sonne sich in einem Jahr oder $365\frac{1}{4}$ Tagen einmal vollständig über den Himmel, d. h. um einen Winkel von 360° , zu bewegen scheint, beträgt ihre Bewegung nach Osten angenähert einen Grad pro Tag längs der Ekliptik.

Die zwei Hauptbewegungen der Erde — Rotation um ihre Achse in einem Tag und Umlauf um die Sonne in einem Jahr — finden sich mit verschiedenen Perioden bei allen Planeten des Sonnensystems wieder. Zum Beispiel rotiert der Planet Mars um seine Achse in $24^h 37^m$ und wandert um die Sonne in 687 Tagen.

Beobachtungen von der Sonne aus, dem Zentrum des Sonnensystems, würden die wahren Bewegungen der Planeten erkennen lassen: Sie alle laufen um die Sonne in nahezu kreisförmigen Bahnen mit Perioden, die zwischen 88 Tagen bei Merkur, dem sonnennächsten Planeten, und 248 Jahren bei Pluto, dem entferntesten bekannten Planeten, variieren. Jeder Planet rotiert auch um seine Achse mit einer Periode, die zwischen $9^h 50^m$ bei Jupiter und 88 Tagen bei Merkur liegt.

Da alle astronomischen Beobachtungen von der bewegten Erde aus angestellt werden, müssen wir unterscheiden zwischen den Bewegungen von Himmelsobjekten, die relativ zur bewegten Erde gemessen wurden, und solchen, bei denen die Bewegung der Erde um die Sonne in Rechnung gestellt ist. Die ersten werden durch verwickelte Bahnformen dargestellt und sind nur

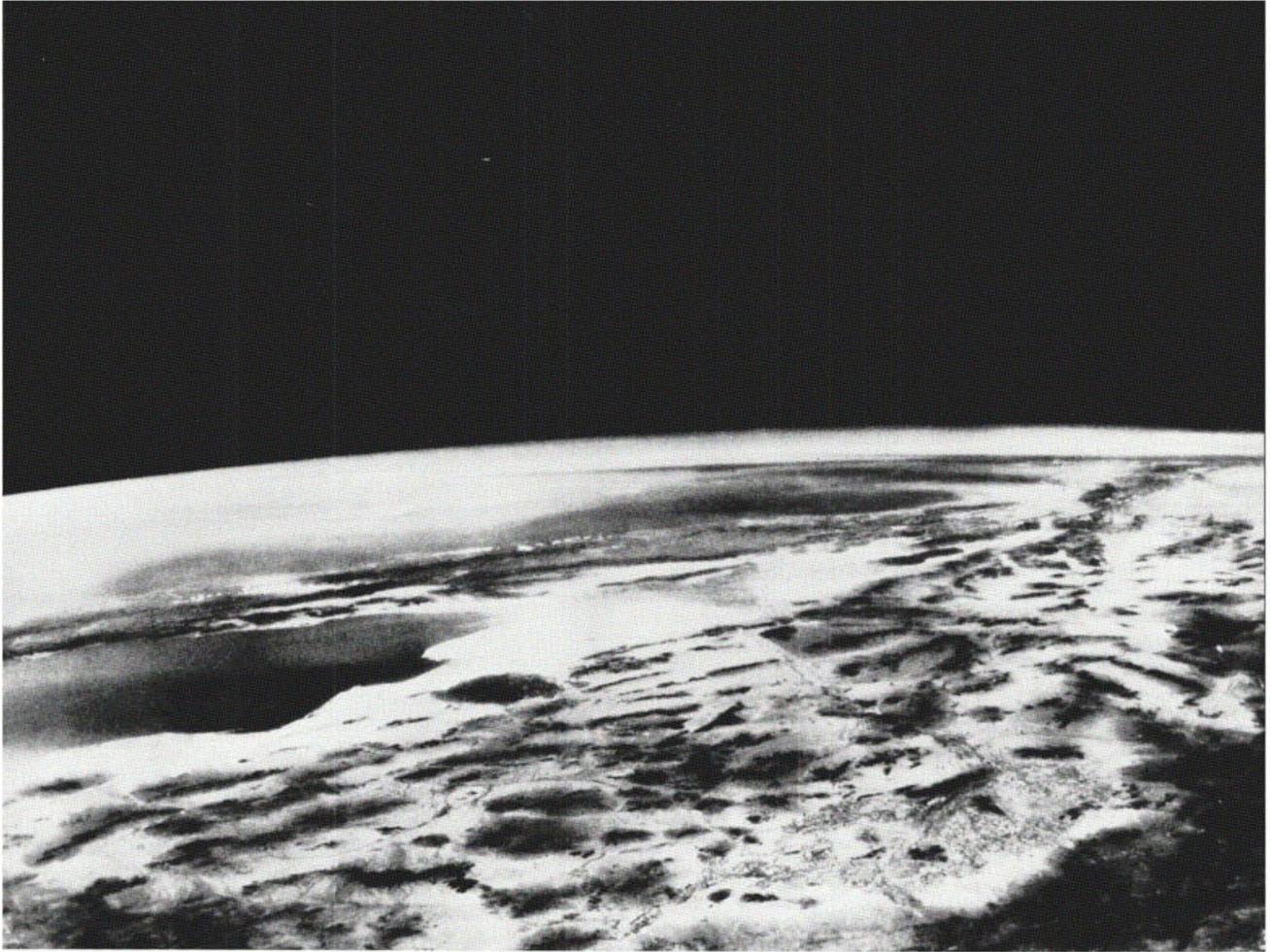


Abb. 3.1. Photographie der Erde, aufgenommen von einer Navy Viking-Rakete aus über dem White Sands-Erprobungsgelände in New Mexiko aus einer Höhe von 143 Meilen. Man beachte die Krümmung der Erde, die sich am etwas unscharfen Rand der Atmosphäre deutlich erkennen läßt. Die große Wasserfläche links ist der Golf von Kalifornien. Dahinter liegen Nieder-Kalifornien und der Pazifik. Der kleine unregelmäßige dunkle Fleck rechts ist der Salton-See. Am unteren rechten Rand liegt das Gebiet um Phoenix, Arizona. Die von der Photographie überdeckte Fläche beträgt etwa 600 000 Quadratmeilen. Der Horizont ist rund 1 000 Meilen entfernt. (*Amtliche U. S. Navy-Photographie.*)

gelegentlich von Interesse, zum Beispiel in Verbindung mit dem Studium der Meteore; die letzteren sind einfache Kreis- oder Ellipsenbahnen und dienen als Grundlage für die Untersuchung der Kräfte, die im Sonnensystem wirksam sind.

3.2 Koordinaten auf der Erde

Die Lage eines Punktes auf der Erdoberfläche wird durch zwei Koordinaten festgelegt: Länge (l) und Breite (b). Zwei Großkreise, der Äquator und der Ortsmeridian, werden zu ihrer Messung verwandt. Der Ortsmeridian geht durch den Beobachtungsort und die beiden Pole. Die Länge des Orts wird auf dem Äquator gemessen von einem willkürlichen Nullpunkt aus bis zum Schnittpunkt des Ortsmeridians mit dem Äquator. Den Nullpunkt der Längenzählung hat man durch internationales Übereinkommen in den Schnittpunkt des Äquators mit dem durch die Sternwarte Greenwich, England, gehenden Meridian gelegt; dieser ist der Nullmeridian. Der Meridian, der durch das Zentrum des Uhrenhauses des U. S. Naval Obser-

vatoriums in Washington, D. C., geht, liegt $77^{\circ}3'56''{,}7$ westlich vom Nullmeridian. Da die wirklichen Längenmessungen von der Erdrotation abhängen (Abschnitt 3.5), wird die Länge eines Punkts gewöhnlich in Zeiteinheiten statt in Winkleinheiten ausgedrückt. Die Erde dreht sich um 360° in 24 Stunden, daher ist

$$\begin{aligned} 15^{\circ} &= 1^{\text{h}} = 60^{\text{m}} \\ \text{oder } 1^{\circ} &= 4^{\text{m}}. \end{aligned}$$

Somit beträgt die Länge von Washington $5^{\text{h}} 8^{\text{m}} 15^{\text{s}}{,}78$ westlich Greenwich (Abb. 3.2). Die Länge wird gemessen von 0^{h} bis 12^{h} östlich und westlich von Greenwich.

Die Breite eines Punktes ist der nördliche oder südliche Winkelabstand vom Äquator gemessen auf dem Ortsmeridian. Zum Beispiel beträgt die Breite von Washington $+ 38^{\circ}55'14''{,}0$, wobei das Plus-Zeichen anzeigt, daß es nördlich des Äquators liegt (Abb. 3.2).

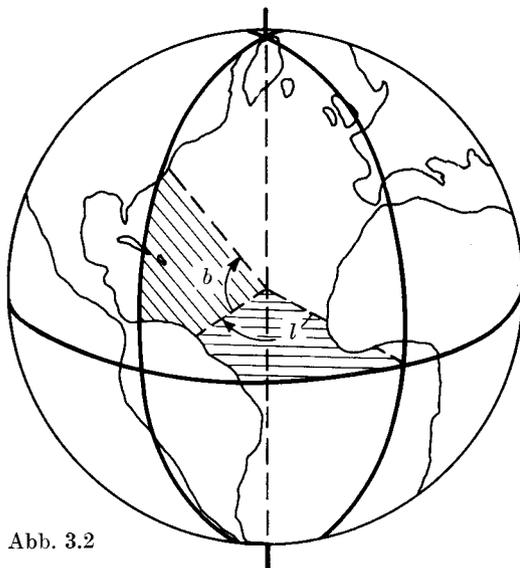


Abb. 3.2

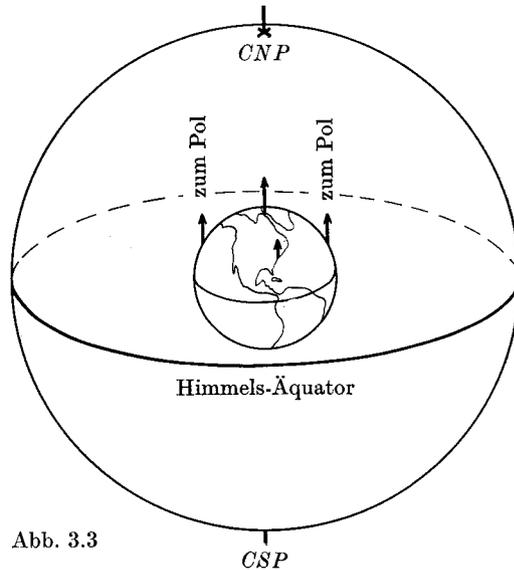


Abb. 3.3

Abb. 3.2. Koordinaten auf der Erde. Die gestrichelte Senkrechte stellt die Rotationsachse der Erde dar. Die ausgezogene gekrümmte Linie rechts ist der Nullmeridian durch die Sternwarte Greenwich. Die ausgezogene gekrümmte Linie links ist der Meridian von Washington. Die horizontale gekrümmte Linie ist der Erdäquator. Der Winkel l ist die Länge, der Winkel b die Breite von Washington.

Abb. 3.3. Die Himmelskugel. CNP und CSP stellen den Himmelsnordpol bzw. -südpol dar. Der Himmelsäquator ist die Schnittlinie der Ebene des Erdäquators mit der Himmelskugel.

3.3 Koordinaten auf der Himmelskugel

Ebenso wie jeder Ort auf der Erdoberfläche durch zwei Koordinaten, Länge und Breite, festgelegt wird, kann auch jedes Himmelsobjekt in ähnlicher Weise identifiziert werden. Die beiden Koordinaten werden auf einer gedachten Himmelskugel gemessen, von der angenommen wird, daß sie die Erde in unendlicher Entfernung umgibt. Weil diese Entfernung unendlich ist, konvergieren alle parallelen Linien nach einem Punkt auf der Kugel. Zum Beispiel würde eine Linie, die parallel zur Erdachse durch einen auf der Erdoberfläche gegebenen Punkt geht, die Himmelskugel im gleichen Punkt schneiden wie die Verlängerung der Erdachse. Dies kann nicht in einer Zeichnung dargestellt werden, die notwendigerweise die Himmelskugel in endlicher Entfernung im Vergleich zur Größe der Erde zeigt. Die Schnittpunkte der Rotations-

achse der Erde mit der Himmelskugel sind der Himmelsnord- und -südpol (CNP und CSP). Die Äquatorebene der Erde schneidet die Himmelskugel in einem Großkreis, dem Himmelsäquator, der 90° von den Polen entfernt ist, wie Abb. 3.3 zeigt.

Auch die Ebene, welche die Bahn der Erde um die Sonne enthält, trifft die Himmelskugel in einem größten Kreis, der Ekliptik. Von der Erde aus gesehen scheint die Sonne unter den Sternen längs der Ekliptik ostwärts zu wandern im Laufe eines Jahres. Weil die Äquatorebene gegen die Bahnebene um $23\frac{1}{2}^\circ$ geneigt ist, bildet auch der Himmelsäquator mit der Ekliptik einen Winkel von $23\frac{1}{2}^\circ$, wie Abb. 3.4 zeigt. Die beiden Großkreise schneiden sich in zwei Punkten, dem Frühlingsäquinoktialpunkt (Υ) und dem Herbstäquinoktialpunkt (\varOmega).

Für unseren gegenwärtigen Zweck werden die Sterne in unendlicher Entfernung von der Erde und daher auf der Himmelskugel angenommen. Die Position eines Sterns an der Himmelsphäre wird durch zwei Koordinaten festgelegt, die Rektaszension α und die Deklination δ .

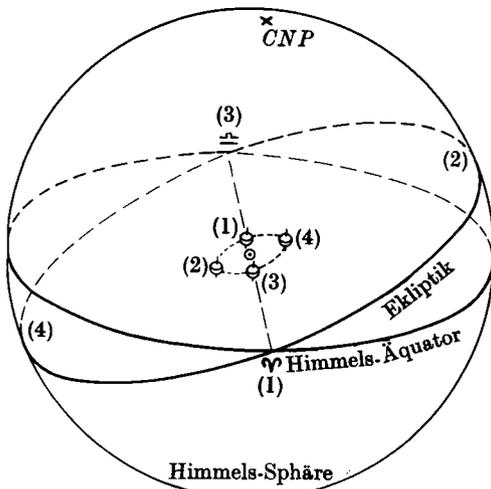


Abb. 3.4

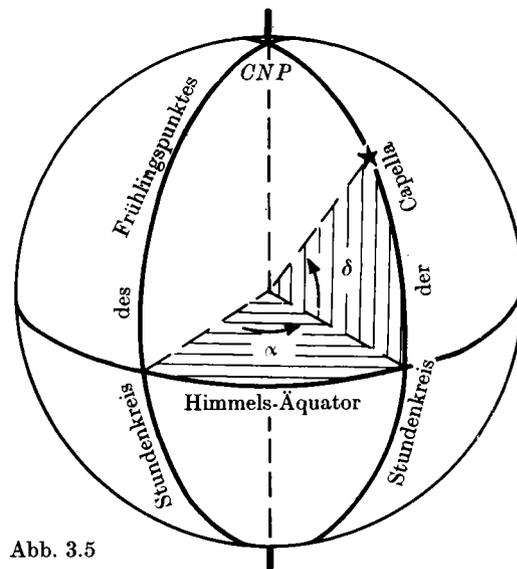


Abb. 3.5

Abb. 3.4. Himmelsäquator und Ekliptik. Der Punkt in der Mitte stellt die Sonne dar. Die Stellung der Erde in vier Punkten ihrer Bahn ist angedeutet. Die Schnittlinie der Bahnebene mit der Himmelskugel ist die Ekliptik. Die Schnittpunkte der Ekliptik mit dem Himmelsäquator sind Υ , das Frühlingsäquinox, und \varOmega , das Herbstäquinox. Die Rotationsachse der Erde ist um $66\frac{1}{2}^\circ$ gegen die Bahnebene oder um $23\frac{1}{2}^\circ$ gegen die Normale auf dieser Ebene geneigt, folglich bildet die Ekliptik mit dem Himmelsäquator ebenfalls einen Winkel von $23\frac{1}{2}^\circ$.

Abb. 3.5. Koordinaten an der Himmelskugel. Der Stundenkreis des Frühlingsäquinoktiums dient als Beginn für die Rektaszension so wie der Nullmeridian auf der Erde für die Länge. Der Schnittpunkt dieses Stundenkreises mit dem Himmelsäquator ist der Frühlingspunkt. Die Rektaszension α des Sterns Capella wird ostwärts längs des Himmelsäquators vom Frühlingspunkt bis zum Schnittpunkt des Stundenkreises der Capella mit dem Himmelsäquator gemessen. Die Deklination δ der Capella wird vom Himmelsäquator aus auf dem Stundenkreis des Sterns gemessen.

Das System, das diese Koordinaten verwendet, wird als Äquatorialsystem bezeichnet. Zwei Großkreise an der Himmelskugel, der Himmelsäquator und der Stundenkreis des Sterns, werden zur Messung der äquatorialen Koordinaten benützt. Der Stundenkreis eines Sterns ist der größte Kreis, der durch den Stern und die beiden Himmelspole geht. Die Rektaszension eines Sterns wird auf dem Himmelsäquator gemessen, von einem willkürlichen Nullpunkt, dem Frühlingspunkt, aus bis zum Schnittpunkt des Himmelsäquators mit dem Stundenkreis

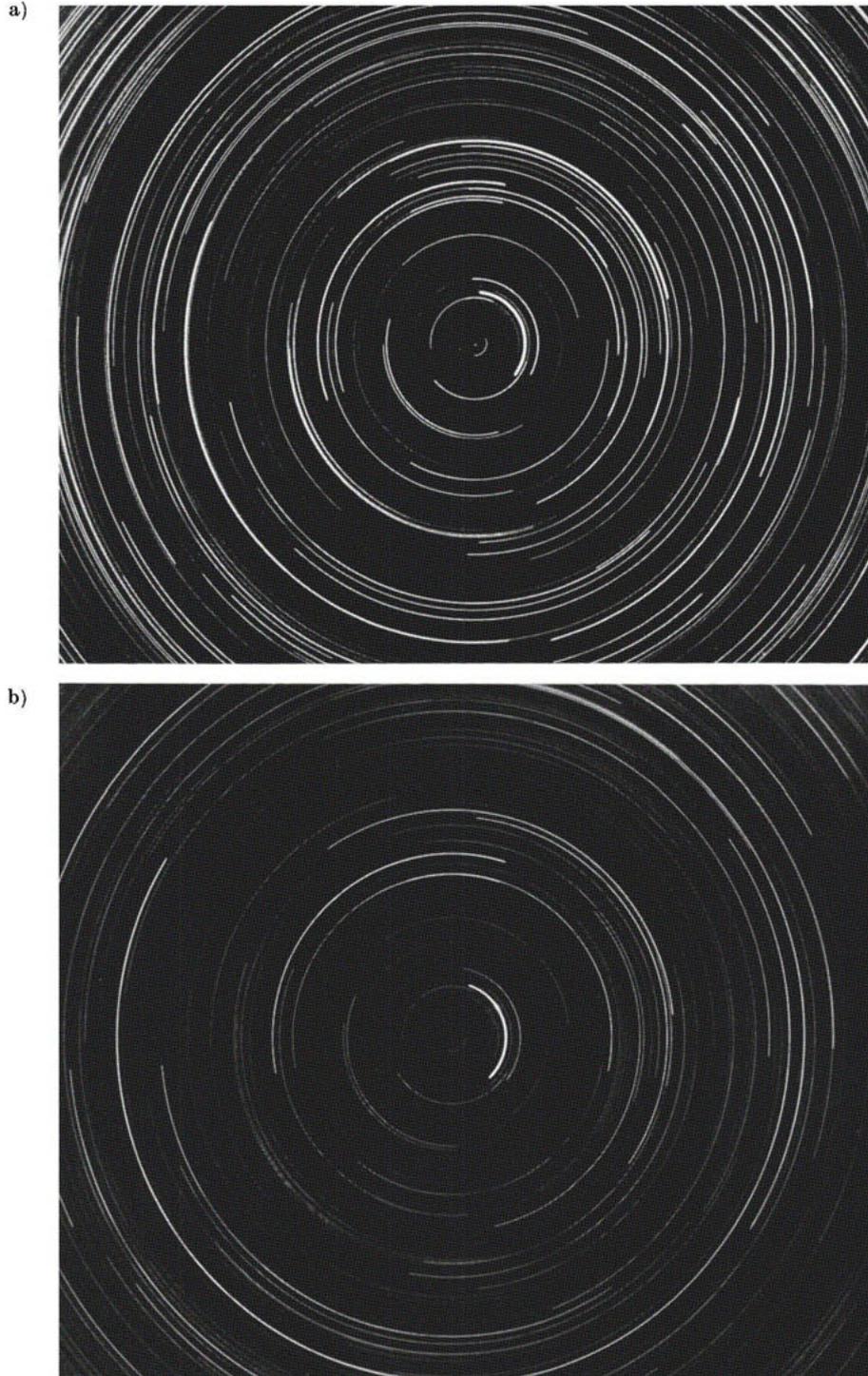


Abb. 3.6 (a). Sternspuren in der Nähe des nördlichen Himmelspols. (Photographiert mit einer ruhenden Kamera am Lick-Observatorium im Jahre 1907, Belichtungszeit 8 Stunden.)
(b). Sternspuren in der Nähe des nördlichen Himmelspols. (Photographiert mit einer ruhenden Kamera am Lick-Observatorium im Jahre 1941, Belichtungszeit 8 Stunden.) Die Differenzen zwischen den Sternspuren auf beiden Photographien rühren von der Präzessionsbewegung der Erde her.

des Sterns. Wie die geographische Länge wird die Rektaszension gewöhnlich in zeitlichen Einheiten ausgedrückt. Analog zur geographischen Breite ist die Deklination der nördliche oder südliche Winkelabstand vom Himmelsäquator gemessen auf dem Stundenkreis des Sterns. Zum Beispiel sind die Koordinaten der Capella

$$\begin{aligned}\alpha &= 5^{\text{h}} 13^{\text{m}} \\ \delta &= +45^{\circ} 57' \quad (\text{Abb. 3.5}).\end{aligned}$$

Ihr Stundenkreis schneidet den Himmelsäquator $5^{\text{h}} 13^{\text{m}}$ vom Frühlingspunkt entfernt. Von der Erde aus gesehen wird die Rektaszension vom Frühlingspunkt aus ostwärts gemessen. Capella liegt dann $+45^{\circ}57'$ nördlich (durch das Pluszeichen angedeutet) des Himmelsäquators gemessen auf ihrem Stundenkreis.

3.4 Die Bestimmung der Breite

Bevor die Koordinaten eines Punkts auf der Erde oder an der Himmelskugel bestimmt werden können, muß die Lage der Himmelspole und des Himmelsäquators festgelegt werden. Da die Erde von Westen nach Osten um ihre Achse rotiert, scheint sich die Himmelskugel von Osten nach Westen zu drehen und alle Sterne an der Himmelskugel scheinen sich in kreisförmigen Bahnen parallel zum Himmelsäquator zu bewegen. Die polnahen Sterne beschreiben kleine Kreise um den Himmelspol. Für die Photographien in Abb. 3.6, die mit acht Stunden Belichtungszeit aufgenommen wurden, hielt man die Kamera in fester Lage in Richtung nach Norden. Obgleich kein Stern genau im Himmelspol steht, kann dessen Lage genau bestimmt werden als Mittelpunkt der konzentrischen Sternspuren, und der Himmelsäquator kann als größter Kreis in 90° Abstand vom Pol gefunden werden.

Um die Lage des Pols an der Himmelskugel zu messen, wird ein lokales Koordinatensystem benutzt, das sich mit der Erde bewegt — das Horizontalsystem. Eine Lotlinie, die Vertikale darstellend, wird verlängert und schneidet die Himmelskugel in zwei Punkten, dem Zenit (genau über dem Beobachtungsort) und dem Nadir (genau unter dem Beobachtungsort). Der 90° von diesen Punkten entfernte größte Kreis an der Sphäre ist der Horizont. Die Höhe des Pols wird vom Horizont aus gemessen auf einem Großkreis, der durch Pol, Zenit und Nadir geht. Wenn der Beobachter sich am geographischen Nordpol befände, wo die Breite $+90^{\circ}$ beträgt, würde die Höhe des Himmelspols 90° betragen, d. h. er stände im Zenit, und der Himmelsäquator würde mit dem Horizont zusammenfallen. Am Äquator, wo die Breite 0° ist, würde der Pol im Horizont liegen, seine Höhe würde 0° betragen und der Himmelsäquator durch den Zenit gehen. Durch eine in Abb. 3.7 dargestellte geometrische Konstruktion findet man, daß die Höhe des Himmelspols der Breite des Erdorts gleich ist, von dem aus die Beobachtungen gemacht werden. Die Breite eines Erdorts ist aber sein nördlicher oder südlicher Winkelabstand vom Äquator. Somit ist die Breite von Washington (W in Abb. 3.7) der Winkel ECW. Dieser Winkel ist der gleiche wie der Winkel QCZ, die Deklination des Zenits für Washington. Definitionsgemäß steht die Horizontalebene NCS senkrecht auf der zum Zenit gerichteten Vertikalen CZ, und der Himmelsäquator CQ steht senkrecht auf der Erdachse CP. Also stehen die Schenkel des Winkels QCZ senkrecht auf den entsprechenden Schenkeln des Winkels NCP, der Polhöhe. Somit ist Winkel QCZ = Winkel NCP oder

die Breite eines Erdorts ist gleich der Polhöhe für diesen Ort.

Zum Beispiel liegt in Washington der nördliche Himmelspol $38^{\circ}55'14''.0$ über dem Horizont.

Die Breite eines Beobachtungsortes wird bestimmt, indem man seine Polhöhe oder auch, was damit äquivalent ist, den Winkel zwischen Lotlinie und Pol mißt. Dies geschieht gewöhnlich mit einem sogenannten Meridiankreis, einem Fernrohr, das zwischen zwei Pfeilern montiert ist, deren Verbindungslinie ost-westlich orientiert ist, und das nur in einer Koordinate be-

weglich ist, dem Ortsmeridian. Ein großer mit einer Gradeinteilung versehener Kreis wird dabei zur Bestimmung entweder der Höhe eines Sterns über dem Horizont oder seiner Zenitdistanz benützt. Die mit diesem Instrument erreichbare Genauigkeit liegt bei $0''.1$ oder im Fall von differentiellen Messungen (Differenz in Breite zwischen zwei Stationen) bei $0''.01$. Diese Genauigkeit ist so groß, daß für zwei Punkte auf der Erde, die nur einen Fuß in nord-südlicher Richtung voneinander entfernt sind, die Breitendifferenz sich messen läßt.

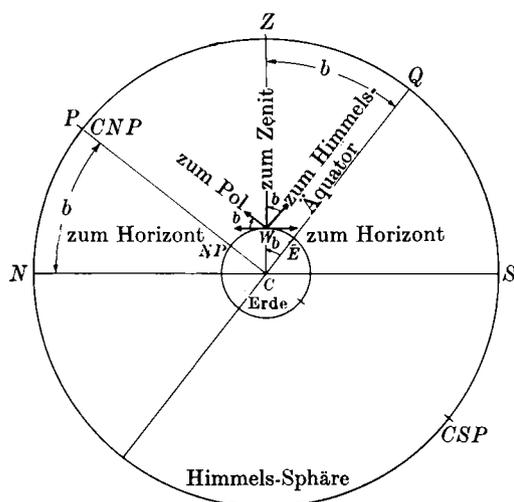


Abb. 3.7

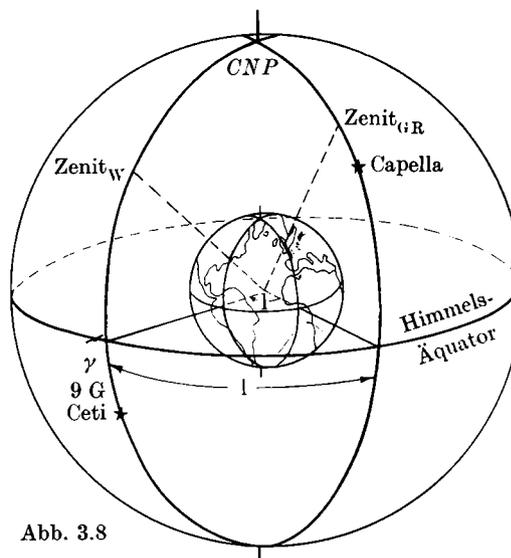


Abb. 3.8

Abb. 3.7. Bestimmung der geographischen Breite. Die Breite des Beobachters ist der Winkel b , gemessen im Erdzentrum vom Äquator zum Zenit. Er ist gleich der Höhe des Himmelsnordpols über dem Horizont.

Abb. 3.8. Bestimmung der geographischen Länge. Wenn der Stern Capella im Meridian von Greenwich beobachtet wird, steht der Stern 9 G Ceti im Meridian von Washington. Die Länge von Washington ist die Differenz der Rektaszensionen beider Sterne.

3.5 Die Bestimmung der Länge

Die Längenbestimmung schließt die Messung der Sternzeit in sich, die auf Beobachtungen der täglichen Bewegungen der Sterne beruht. Der Bezugskreis hierfür ist der Ortsmeridian, der durch Zenit und beide Himmelspole geht — der Großkreis, den man erhält, wenn man die Ebene des geographischen Ortsmeridians sich bis zur Sphäre erstrecken läßt. Der Sterntag ist das Zeitintervall zwischen zwei aufeinanderfolgenden Durchgängen des Frühlingspunktes durch den Ortsmeridian. Eine Sternzeituhr wird auf Null gestellt, wenn der Frühlingspunkt den Ortsmeridian kreuzt, und wird so reguliert, daß sie 24 Stunden später wieder Null zeigt, wenn der Frühlingspunkt durch den Meridian geht. Da der Frühlingspunkt jeden Meridian zu verschiedener Zeit kreuzt, wird die Sternzeit für Orte mit unterschiedlicher Länge verschieden sein. Somit kann dieser Punkt, wenn er im Meridian von Greenwich steht, nicht gleichzeitig im Meridian von Washington stehen, sondern dies wird erst der Fall sein, wenn sich die Erde 77° oder 5^h weiter gedreht hat. Wenn in Washington der Durchgang des Frühlingspunktes eintritt, ist es in Greenwich $5^h 8^m$ Sternzeit und $0^h 0^m$ in Washington. Allgemein ist der Längenunterschied zwischen zwei Orten gleich der Differenz der Ortszeiten dieser Orte. Da die Länge von Greenwich Null ist, folgt, daß

die Länge eines Ortes auf der Erde gleich ist der Differenz zwischen der Sternzeit von Greenwich und der Sternzeit des Beobachtungsortes.

In der Praxis bestimmt man die Sternzeit durch Beobachtung des Meridiandurchgangs eines Sterns, dessen Koordinaten genau vermessen sind. Da die Rektaszension vom Frühlingspunkt aus ostwärts gerechnet wird, ist die Sternzeit gleich der Rektaszension aller Sterne im lokalen Himmelsmeridian. Zum Beispiel ist die Sternzeit in Washington $0^{\text{h}} 5^{\text{m}}$, wenn dort der Durchgang des Sterns 9 G Ceti ($\alpha = 0^{\text{h}} 5^{\text{m}}$, $\delta = -23^{\circ}22'$) beobachtet wird. Zur gleichen Zeit, wenn in Washington 9 G Ceti den Meridian überschreitet, befindet sich in Greenwich Capella im Durchgang. Daher ist die Sternzeit in Greenwich, wenn in Washington 9 G Ceti im Meridian steht, gleich der Rektaszension der Capella gleich $5^{\text{h}} 13^{\text{m}}$. Die Länge von Washington beträgt dann $5^{\text{h}} 13^{\text{m}} - 0^{\text{h}} 5^{\text{m}}$ oder $5^{\text{h}} 8^{\text{m}}$ westlich von Greenwich. Dies wird durch Abb. 3.8 erläutert.

Die Bestimmung der Sternzeit und folglich die Bestimmung der Länge wird ebenfalls am Meridiankreis durchgeführt, der auf einem sich bewegenden Papierstreifen den genauen Zeitpunkt des Durchgangs eines Sterns durch den Meridian — definiert durch einen vertikalen Faden im Okular — zusammen mit Zeitsignalen von einer Sternzeituhr aufzeichnet. Die mit diesem Instrumententyp erreichbare Genauigkeit beträgt etwa $0^{\circ},01$. Ein genaueres Instrument ist das Prismen-Astrolab, das von A. Danjon in Paris entwickelt wurde, die damit erreichbare Genauigkeit liegt angenähert bei $0^{\circ},001$.

3.6 Die Zeit

Mehrere Arten, die Zeit zu messen, sind in der Astronomie in Gebrauch; eine von ihnen, die Sternzeit, wurde im Abschnitt 3.5 erörtert. Bei allen Arten beruht die Zeitmessung auf der Messung des Winkelabstands zwischen dem lokalen Himmelsmeridian und dem Stundenkreis eines Himmelsobjekts. Dieser in Zeiteinheiten ausgedrückte Winkelabstand ist der Stundenwinkel des Objekts.

Der Stundenwinkel eines Himmelsobjekts ist die Winkeldistanz zwischen dem örtlichen Himmelsmeridian und dem Stundenkreis des Objekts, er wird auf dem Himmelsäquator in westlicher Richtung gemessen.

Sternzeit ist gleich dem Stundenwinkel des Frühlingspunkts. Aus praktischen Gründen wird sie im bürgerlichen Leben nicht benützt. Nehmen wir einmal an, ein Arbeitstag beginne um 6^{h} Sternzeit. Am 23. September scheint die Sonne sich auf dem Himmelsäquator in 180° oder 12^{h} Entfernung vom Frühlingsäquinox zu befinden (Stellung 3 in Abb. 3.4). Um 6^{h} Sternzeit ist der Stundenwinkel des Frühlingspunktes ebenfalls 6^{h} , der Frühlingspunkt geht gerade unter, während die Sonne, 12^{h} davon entfernt, eben aufgeht, so daß der Arbeitstag mit Sonnenaufgang beginnt. Sechs Monate später dagegen steht die Sonne im Frühlingspunkt (Stellung 1 in Abb. 3.4), und um 6^{h} gehen beide, Sonne und Frühlingspunkt, unter; wenn der Beginn des Arbeitstages so festgesetzt wäre, daß er immer zur gleichen Stunde nach Sternzeit anfangen sollte, so würde er bei Sonnenuntergang beginnen. Da dies nicht zweckmäßig wäre, wird im täglichen Leben eine Zeit gebraucht, die sich nach der Sonne richtet und nicht nach den Sternen.

Einer der ältesten Zeitmesser ist die Sonnenuhr, die die wahre Sonnenzeit, gemessen durch den Stundenwinkel der Sonne, aufzeigt. Es ist nicht möglich, eine mechanische Uhr zu konstruieren, die nach wahrer Sonnenzeit geht, weil die Intervalle zwischen aufeinanderfolgenden Durchgängen der Sonne nicht gleich lang sind. Für diese Ungleichheit gibt es zwei Gründe. Der eine ist der, daß die Erdbahn nicht genau kreisförmig ist, sondern von etwas elliptischer Form. Wie wir später sehen werden, ist die Erdbahn eine Ellipse, deren Exzentrizität größer als Null ist (Abschnitt 9.5). Ein Objekt, das in einer Ellipse läuft, bewegt sich während seines Umlaufs nicht mit gleichförmiger Geschwindigkeit. Diese Tatsache wird in dem Abschnitt behandelt werden, der den Keplerschen Gesetzen gewidmet ist. Wenn die Erde den sonnennächsten Punkt ihrer Bahn, das Perihel, durchläuft, bewegt sie sich schneller, als wenn sie sich in größter

Entfernung von der Sonne, dem Aphel, befindet. Somit scheint die Sonne, wenn die Erde in Perihelnähe ist, sich ostwärts in Rektaszension um etwa $1^{\circ}6'.6$ pro Tag zu bewegen, während im Aphel ihre scheinbare Ostbewegung pro Tag nur etwa $1^{\circ}2'.5$ beträgt. Die Differenz von $4'$ entspricht ungefähr 16 Zeitsekunden; dieser Effekt bewirkt, daß der wahre Sonnentag zwischen Januar (Perihel) und Juli (Aphel) um 16 Sekunden schwankt.

Der zweite Grund der Ungleichheit der wahren Sonnentage ist die Neigung von $23\frac{1}{2}^{\circ}$ der Ebene des Erdäquators gegen die Bahnebene, — die Schiefe der Ekliptik. Sogar wenn die Erde mit gleichförmiger Geschwindigkeit die Sonne umkreisen würde, was in einer scheinbaren gleichförmigen Bewegung der Sonne längs der Ekliptik nach Osten zum Ausdruck käme, würden die Intervalle zwischen aufeinanderfolgenden Sonnendurchgängen nicht konstant sein, da die Zeit längs des Himmelsäquators gemessen wird, während die Sonne ihren Ort längs der Ekliptik verändert. Wir nehmen an, die Erde bewege sich in ihrer Bahn mit einer solchen Geschwindigkeit, daß die Sonne sich gleichförmig genau um einen Grad pro Tag in der Ekliptik nach Osten zu bewegen scheint. Am 21. März fällt die Sonne mit dem Frühlingspunkt zu-

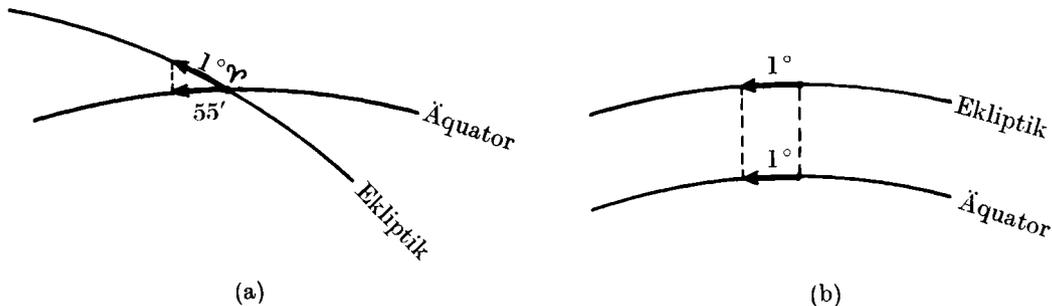


Abb. 3.9. Ostbewegung der Sonne längs der Ekliptik (a) am 21./22. März und (b) am 21./22. Juni. Angenommen ist, daß an beiden Tagen die Sonne sich um 1° längs der Ekliptik bewegt. Am 21./22. März beträgt die auf den Äquator projizierte Bewegung rund $55'$, am 21./22. Juni 1° . Dies hat eine Ungleichheit der Intervalle zwischen aufeinanderfolgenden Durchgängen der Sonne durch den Meridian zur Folge.

sammen (Stellung 1, Abb. 3.4). Einen Tag später wird sich die Sonne in der Ekliptik einen Grad weiterbewegt haben an einen Ort über dem Äquator, die Erde aber wird sich um 360° plus dem Winkelabstand der Sonne vom Frühlingspunkt gedreht haben, gemessen auf dem Äquator. Dieser Abstand ist nicht gleich einem Grad, sondern beträgt $0^{\circ}.9$ oder etwa $55'$, wie sich nach den Regeln der sphärischen Trigonometrie berechnen läßt. Somit wird der wahre Sonnentag am 21./22. März $360^{\circ}55'$ entsprechen (Abb. 3.9a). Drei Monate später, im Sommersolstitium (Stellung 2, Abb. 3.4), wird die Sonnenbewegung von einem Grad pro Tag in der Ekliptik dieselbe sein wie ihre auf den Äquator projizierte Bewegung. Folglich entspricht der wahre Sonnentag dann einer Rotation der Erde um 360° und $60'$. Die Differenz zwischen den beiden wahren Sonnentagen am 21./22. März und 21./22. Juni, verursacht durch die Schiefe der Ekliptik, beträgt $5'$ oder rund 20 Zeitsekunden.

Um eine konstante Zeiteinheit, die sich an die Sonne anschließt, zu erhalten, eliminieren die Astronomen die beiden Ursachen für die Unregelmäßigkeit des wahren Sonnentags mit Hilfe einer fiktiven Sonne, von der angenommen wird, daß sie sich gleichförmig im Himmelsäquator im Laufe eines Jahres bewegt. Ihr Stundenwinkel ist ein Maß für die mittlere Sonnenzeit. Die Länge des mittleren Sonnentags beträgt nach Sternzeit $24^{\text{h}} 3^{\text{m}} 56^{\text{s}},555$. Da es zweckmäßiger ist, einen Tag um Mitternacht beginnen zu lassen als zu Mittag, wird die mittlere Sonnenzeit dem Stundenwinkel der mittleren Sonne plus 12^{h} gleichgesetzt. Daher ist es 12^{h} mittlerer Sonnenzeit, wenn die mittlere Sonne im Himmelsmeridian steht. Die Differenz zwischen wahrer

und mittlerer Sonnenzeit heißt Zeitgleichung. Ein ernstlicher Nachteil für die Praxis bei Verwendung mittlerer Sonnenzeit im bürgerlichen Leben besteht darin, daß Orte, die nicht auf demselben Meridian liegen, verschiedene Zeiten haben. Wenn die mittlere Sonnenzeit von Washington $12^{\text{h}} 00^{\text{m}}$ beträgt, ist es in New York $12^{\text{h}} 12^{\text{m}}$. Um solche Differenzen zwischen nahe beieinander gelegenen Orten zu vermeiden, wurde durch internationale Abmachung eine Modifikation der mittleren Sonnenzeit eingeführt. Die mittlere Sonnenzeit von Greenwich, England, dient als Grundlage für alle Zeitmessungen und wird Weltzeit genannt. Die Erde wird in Zonen eingeteilt, von denen jede einem zentralen Standardmeridian zugeordnet ist, der in 1, 2, 3, . . . 12 Stunden Abstand östlich oder westlich vom Nullmeridian verläuft. Zonenzeit ist die mittlere Sonnenzeit jedes Streifens, $-\frac{1}{2}$ bis $+\frac{1}{2}$, $\frac{1}{2}$ bis $1\frac{1}{2}$ usw. Stunden in Länge. Zwischen den Längen $0^{\text{h}} 30^{\text{m}}$ westlich und $0^{\text{h}} 30^{\text{m}}$ östlich von Greenwich wird nach Weltzeit gerechnet. Zwischen $0^{\text{h}} 30^{\text{m}}$ und $1^{\text{h}} 30^{\text{m}}$ östlich Greenwich gilt die Mitteleuropäische Zeit (Weltzeit $+ 1^{\text{h}}$). Washington und New York, die beide weniger als $\frac{1}{2}^{\text{h}}$ vom 5^h-Meridian westlich Greenwich entfernt gelegen sind, ziehen 5 Stunden von der Weltzeit ab und verwenden diese Zeit als Östliche Standard-Zeit.

Im Prinzip ist dies das Zeitsystem, nach dem man sich im bürgerlichen Leben richtet, doch hat man die gleichförmige Einteilung in Zonen etwas den örtlichen Gegebenheiten angepaßt.

Wenn in Greenwich am 19. Juni Mittag ist, zeigen alle Punkte westlich Greenwich Morgenstunden des 19. Juni an, während östlich Greenwich die Stunden auf den Nachmittag desselben Datums fallen. An einem 180° oder 12^{h} von Greenwich entfernten Punkt beginnt der 19. Juni, wenn man von Greenwich westwärts rechnet, und endet der 19. Juni oder beginnt der 20. Juni, wenn ostwärts gemessen wird. Diese Diskontinuität bei der Länge 12^{h} wird als internationale Datumgrenze bezeichnet. Wenn ein Schiff von Kalifornien nach Japan fährt und die Datumgrenze am Abend des 24. Dezember erreicht, springt das Datum auf den 25. Dezember beim Überqueren der Linie und den Passagieren ist der Weihnachtstag entgangen. Ähnlich springt das Datum, wenn ein Schiff von Japan nach Kalifornien fährt und die internationale Datumgrenze am 26. Dezember morgens erreicht, auf den 25. Dezember und die Passagiere können zweimal Weihnachten feiern.

Wie wir gesehen haben, beruht die Messung der astronomischen Zeit auf der Rotation der Erde um ihre Achse. Bis vor kurzem noch hielt man diese Periode für streng konstant. Daher verlangte man von astronomischen Uhren, daß sie genau richtig gehen sollten zwischen Beobachtungen von Sterndurchgängen in aufeinander folgenden Nächten. Da die Beobachtungen die Zeit mit einer Genauigkeit von rund 0,01 Sekunden geben, braucht sich die Uhr nur unter einer Fehlergrenze von 0,01 Sekunden in 24 Stunden oder 86 400 Sekunden zu halten — einer Genauigkeit von 1 zu etwa 10^7 . Die besten mechanischen Uhren beruhen auf der Konstanz der Schwingungsperiode eines freien Pendels. Um die gewünschte Genauigkeit zu erhalten, muß die Pendellänge konstant gehalten werden: Thermische Ausdehnung des Pendels kann durch die Verwendung von Invar-Metall, einer Nickelstahllegierung mit sehr kleinem Wärmeausdehnungskoeffizienten, verhindert werden, ferner dadurch, daß man die Uhr in einem thermostatisch kontrollierten luftdichten Keller unterbringt, wo der Druck konstant gehalten werden kann.

Wir werden in Abschnitt 6.2 sehen, daß die Geschwindigkeit der Erdrotation nicht absolut konstant ist. Astronomische Beobachtungen, gleichgültig wie genau, weichen von gleichförmiger Zeit um unregelmäßige Schwankungen von der Größenordnung 1 zu etwa $2 \cdot 10^7$ ab. Daher müssen wir, wenn wir die Zeit mit größerer Genauigkeit zu messen wünschen, die Annahme fallen lassen, die Erde selbst sei eine vollkommene Uhr. Dafür müssen wir auf irgendein anderes periodisches Phänomen zurückgreifen, dessen Gleichförmigkeit die der rotierenden Erde übersteigt. Eine solche Erscheinung hat man in den Schwingungen von Molekülen

(Ammoniak) und Atomen (Cäsium) gefunden, die es ermöglichen, die Zeit mit einer Genauigkeit von $1:10^9$ zu registrieren und wovon für die Zukunft eine Steigerung der Genauigkeit bis $1:10^{10}$ erwartet werden darf. Eine solche Uhr, einmal in Gang gesetzt, würde erst in 300 Jahren den Fehler bis zum Betrag von nur einer Sekunde auflaufen lassen! Die wissenschaftlichen Möglichkeiten, die durch die Erfindung der Atom-Uhren eröffnet wurden, sind wahrhaft atemberaubend. Sie schließen nicht nur die Umkehr des gewöhnlichen Verfahrens zur Regulierung einer Uhr nach der Rotationsgeschwindigkeit der Erde ein, sondern sie sollten es auch ermöglichen, die Zeitskala des Sonnensystems und der veränderlichen Sterne zu prüfen, und weiterhin auch, die Energieabnahme der Lichtwellen zu messen, wenn sie aus dem starken Schwerefeld der Erde herauswandern, ein Effekt, der schon vor längerer Zeit von der Relativitätstheorie vorhergesagt wurde und der bisher nur an Lichtwellen untersucht werden konnte, die von der Sonne und bestimmten Sternen ausgestrahlt wurden. Es werden jetzt Experimente geplant, eine Atomuhr in einem künstlichen Satelliten zur Messung des Relativitätseffekts zu verwenden.

Aufgaben

1. Der Stern Capella ist in Berkeley, Kalifornien, zur gleichen Zeit im Durchgang, zu der in Greenwich Spika (α Virginis, $\alpha = 13^{\text{h}} 22^{\text{m}}$, $\delta = -11^\circ$) den Meridian passiert. Bestimme die Länge von Berkeley.
2. Welche Sternzeit ist auf dem Mount Palomar, wenn dort Capella den Meridian kreuzt?
3. Für den Himmelsnordpol wird in New York eine Höhe von $+40^\circ 49'$ beobachtet und in Greenwich eine Höhe von $+51^\circ 29'$. Welche dieser Städte liegt nördlicher und um wieviel?
4. Am 20. Februar um 20^{h} mittl. Ortszeit beträgt der Stundenwinkel der Capella ungefähr eine Stunde westlich. Leite die Beziehung zwischen dem Stundenwinkel der Capella, ihrer Rektaszension und der Sternzeit ab.
5. Um Mitternacht des 20. Februar beträgt der Stundenwinkel der Capella 5 Stunden westlich. Gilt die in der vorstehenden Aufgabe abgeleitete Gleichung auch dann noch?

4. DAS GRAVITATIONSGESETZ

4.1 Geschwindigkeit und Beschleunigung

Die Geschwindigkeit eines Körpers ist das Maß für die Änderung seiner Position. Zum Beispiel (Abb. 4.1) fährt ein Automobil die Strecke zwischen zwei 500 m voneinander entfernten Zeichen in 5 Sekunden. Daher ist seine

$$\text{Geschwindigkeit} = \frac{500 \text{ Meter}}{5 \text{ Sekunden}} = 100 \frac{\text{Meter}}{\text{Sekunde}}.$$

Somit

$$\text{Geschwindigkeit} = \frac{\text{Entfernung}}{\text{Zeit}}$$

oder in Symbolen,

$$v = \frac{d}{t}.$$

Abb. 4.1. Gradlinige Bewegung. Die Geschwindigkeit ist die Entfernung dividiert durch die Zeit.



Umgekehrt, wenn die Geschwindigkeit und die Zeit bekannt sind, kann die zurückgelegte Strecke gefunden werden aus der Beziehung

$$\text{Geschwindigkeit} \cdot \text{Zeit} = \text{Entfernung}$$

oder

$$v \cdot t = d.$$

Wenn das Automobil mit einer Geschwindigkeit von 100 Meter pro Sekunde fünf Sekunden lang fuhr, war die zurückgelegte Entfernung

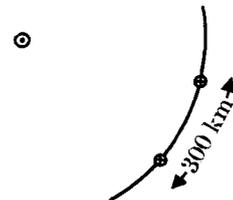
$$100 \frac{\text{Meter}}{\text{Sekunde}} \cdot 5 \text{ Sekunden} = 500 \text{ Meter}.$$

Nun betrachten wir den Fall der die Sonne umlaufenden Erde. Die Erde legt in ihrer Bahn eine Entfernung von 300 Kilometern in zehn Sekunden zurück (Abb. 4.2). Ihre Bahngeschwindigkeit beträgt dann

$$v = \frac{300 \text{ Kilometer}}{10 \text{ Sekunden}} = 30 \frac{\text{km}}{\text{sec}}.$$

Die Geschwindigkeit der Erde in ihrer Bahn beträgt also 30 km/sec oder 18,6 Meilen/sec oder $6,7 \cdot 10^4$ Meilen pro Stunde. Unter der Voraussetzung, daß die Erde sich mit dieser Geschwindigkeit

Abb. 4.2. Bewegung in einem Kreis. Die Bahngeschwindigkeit ist die Entfernung, gemessen längs des Kreises, dividiert durch die Zeit.



gleichförmig in ihrer Bahn bewegt, ist die gesamte, von der Erde in einem Jahr zurückgelegte Strecke, da

$$1 \text{ Jahr} = 365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 = 3,2 \cdot 10^7 \text{ Sekunden,}$$

$$30 \frac{\text{km}}{\text{sec}} \cdot 3,2 \cdot 10^7 \text{ sec} = 9,6 \cdot 10^8 \text{ km.}$$

Wenn das Jahr in Sekunden ausgedrückt wird, fallen die Zeiteinheiten heraus, und es ergibt sich das numerische Resultat in Kilometern:

$$\text{Entfernung} = \frac{\text{Kilometer}}{\text{Sekunden}} \cdot \text{Sekunden} = \text{Kilometer.}$$

Die Geschwindigkeit eines Objekts besitzt nicht nur einen Zahlenwert, sondern auch eine Richtung. Wenn einer Größe ein bestimmter Betrag und eine Richtung zukommt, so wird sie ein Vektor genannt. Der Geschwindigkeitsvektor wird gewöhnlich durch einen Pfeil dargestellt, dessen Länge den Betrag der Geschwindigkeit und dessen Orientierung die Bewegungsrichtung anzeigt. Wenn die Zeichen im ersten Beispiel in nord-südlicher Richtung aufgestellt wären (Abb. 4.3), dann würde der Geschwindigkeitsvektor des Automobils nach Norden oder Süden

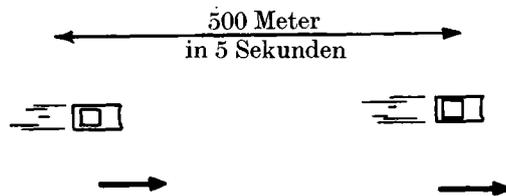


Abb. 4.3

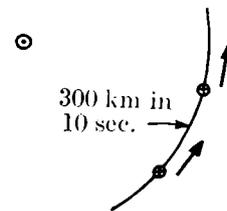


Abb. 4.4

Abb. 4.3. Geradlinige Geschwindigkeit. Die Geschwindigkeit wird nicht nur durch einen Zahlenwert, sondern auch durch eine Richtung charakterisiert, wie durch die fettgedruckten Pfeile dargestellt wird.

Abb. 4.4. Geschwindigkeit in einer Kreisbahn. Obgleich der Zahlenwert der Geschwindigkeit konstant ist, ändert sich die Richtung.

zeigen, je nach der Richtung, in der das Automobil fährt. Im Fall der Erdbewegung ändert sich der Geschwindigkeitsvektor in jedem Augenblick, da die Bewegung längs einer gekrümmten Kurve und nicht längs einer Geraden erfolgt (Abb. 4.4). Wenn daher auch die Geschwindigkeit der Erde in ihrer Bahn angenähert konstant bleibt, ändert sich der Geschwindigkeitsvektor kontinuierlich.

Die Beschleunigung ist definiert als Maß der Geschwindigkeitsänderung. Wenn ein Automobil mit einer Geschwindigkeit von 100 m/sec fährt und sie allmählich auf 150 m/sec steigert, ist seine

$$\begin{aligned} \text{Beschleunigung} &= \frac{\text{Geschwindigkeitsänderung}}{\text{Zeit}} \\ &= \frac{150 \text{ m/sec} - 100 \text{ m/sec}}{5 \text{ sec}} \\ \text{Beschleunigung} &= \frac{50 \text{ m/sec}}{5 \text{ sec}} = 10 \frac{\text{m}}{\text{sec}^2}. \end{aligned}$$

Umgekehrt kann, wenn die Beschleunigung und die Zeit, während der die Beschleunigung andauert, bekannt sind, die Änderung der Geschwindigkeit aus der Beziehung

$$\text{Geschwindigkeitsänderung} = \text{Beschleunigung} \cdot \text{Zeit}$$

gefunden werden. Wenn das Automobil anfangs die Geschwindigkeit 100 m/sec besitzt und seine Beschleunigung 5 Sekunden lang 10 m/sec^2 beträgt, wird die Endgeschwindigkeit in folgender Weise errechnet:

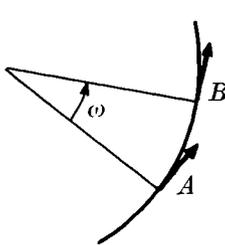
$$\begin{aligned} \text{Geschwindigkeitsänderung} &= 10 \frac{\text{m}}{\text{sec}^2} \cdot 5 \text{ sec} \quad \text{oder} \\ &= 50 \frac{\text{m}}{\text{sec}}. \end{aligned}$$

$$\text{Endgeschwindigkeit} = \text{Anfangsgeschwindigkeit} + \text{Geschwindigkeitsänderung}$$

$$\begin{aligned} \text{oder} \quad &= 100 \frac{\text{m}}{\text{sec}} + 50 \frac{\text{m}}{\text{sec}} \\ &= 150 \frac{\text{m}}{\text{sec}}. \end{aligned}$$

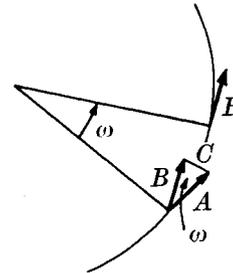
Der Geschwindigkeitsvektor der Erde in ihrer Bahn ändert sich stetig; daher erfährt die Erde eine Beschleunigung, obgleich sich ihre Geschwindigkeit nicht merklich ändert. (Es besteht eine kleine Geschwindigkeitsänderung, die im Abschnitt 9.5 über die Keplerschen Gesetze behandelt werden wird.)

Der Betrag der Beschleunigung kann berechnet werden, wenn man näher betrachtet, wie die Änderung der Geschwindigkeit vor sich geht. In Abb. 4.5 stelle der Vektor A die Erdgeschwindigkeit zu einer gegebenen Zeit dar. Da die Erde 360° in einem Jahr ($3,2 \cdot 10^7 \text{ sec}$) durchläuft, verschiebt sich ihre Stellung in einer Sekunde um einen Winkel von $360/3,2 \cdot 10^7$ Grad. Diese Winkelgeschwindigkeit (stark übertrieben in der Abbildung) wird mit dem Buchstaben ω bezeichnet. Wenn sich die Erde eine Sekunde lang weiterbewegt hat, möge ihr Geschwindigkeitsvektor durch den Pfeil B dargestellt werden, wobei B dieselbe Länge wie A hat, aber dagegen um den Winkel ω gedreht ist. Dabei ist unwesentlich, daß beide Vektoren



←
Abb. 4.5. Winkelgeschwindigkeit der Erde um die Sonne. Der Winkel ω ist derselbe wie der Winkel zwischen den Vektoren A und B.

→
Abb. 4.6. Beschleunigung der Erde in ihrer Kreisbahn um die Sonne. Die Vektordifferenz $A-B$ ist die Änderung des Geschwindigkeitsvektors der Erde in einer Sekunde. Sie ist mit C bezeichnet und ist immer nach der Sonne hin gerichtet. Ihr numerischer Wert beträgt $0,59 \text{ cm/sec}$ pro Sekunde.



verschiedenen Ursprung haben: ihre Eigenschaften sind Größe und Richtung. Daher ist es erlaubt, zur Vereinfachung der Rechnung die Ursprungspunkte der Vektoren zusammenzulegen, ohne aber ihre Größen und Richtungen zu ändern. Dies ist in Abb. 4.6 dargestellt. Die Geschwindigkeitsänderung in einer Sekunde ist die Differenz zwischen A und B, die in der Abbildung mit C bezeichnet ist. Der Wert von C kann gefunden werden, da ja ω , B und A bekannte Größen sind. Da ω klein ist, kann C als Bogen eines Kreises betrachtet werden, dessen Radius gleich der Größe von A und B in Abb. 4.7 ist, und weiter ist das Verhältnis der Bogenlänge C zum Kreisumfang gleich dem Verhältnis des Winkels ω zur Anzahl von Graden des ganzen Kreises, d. h. es ist

$$\frac{C}{2\pi A} = \frac{\omega}{360^\circ}.$$

Der Wert von ω ergibt sich zu $360^\circ/3,2 \cdot 10^7$ und der von A und B ist 30 km/sec oder $30 \cdot 10^5 \text{ cm/sec}$. Daher ist

$$C = \frac{360 \cdot 2 \pi \cdot 30 \cdot 10^5}{3,2 \cdot 10^7 \cdot 360^\circ} = 0,59 \frac{\text{cm}}{\text{sec}}.$$

Und da dieser Wert für die Änderung des Geschwindigkeitsvektors der Erde pro Sekunde gilt, beträgt folglich

$$\text{die Beschleunigung der Erde} = 0,59 \text{ cm/sec}^2.$$

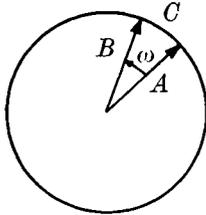


Abb. 4.7. Geometrische Bestimmung der Größe von C in Abb. 4.6. Obgleich C , genau genommen, eine gerade Linie ist, kann es durch einen Bogen ersetzt werden, wenn der Winkel ω klein ist.

Die Beschleunigung der Erde ist immer nach der Sonne hin gerichtet. Darauf ist die Ausdrucksweise begründet, daß „die Erde zur Sonne hin fällt“ mit einer Beschleunigung von $0,59 \text{ cm/sec}^2$. Der Wert von C kann natürlich schneller und genauer mit Hilfe trigonometrischer Tafeln gefunden werden. Doch ist in vielen astronomischen Problemen, wie bei der vorstehenden Berechnung der Erdbeschleunigung, der Winkel ω so klein, daß das Verhältnis des Bogens zum Umfang hinreichend genau ist. Um die Verwendung trigonometrischer Funktionen zu vermeiden, wird diese Methode wiederholt in diesem Buch gewählt werden.

Die Beschleunigung der Erde in ihrer Bahn um die Sonne kann auch berechnet werden, wenn man sich erinnert, daß die von einem Körper aus der Ruhelage durchfallende Strecke pro Sekunde gleich der halben Beschleunigung ist. Zum Beispiel würde in Nähe der Erdoberfläche ein aus der Ruhelage fallender Stein auf einer Filmaufnahme am Ende der ersten Sekunde eine Geschwindigkeit von 980 cm/sec zeigen. Dies ist seine Beschleunigung. Seine Durchschnittsgeschwindigkeit während der ersten Sekunde ist daher $\frac{980 + 0}{2} = 490 \text{ cm/sec}$ und die durchfallene Strecke ist $\text{Geschwindigkeit} \cdot \text{Zeit} = 490 \frac{\text{cm}}{\text{sec}} \cdot 1 \text{ sec} = 490 \text{ cm}$ oder die Hälfte der Beschleunigung. Wenn auf die Erde keine Kraft ausgeübt würde, bewegte sie sich auf einer Geraden, tangential zu ihrer Bahn, pro Sekunde um 30 km . In Wirklichkeit wird sie auf ihrer Bahn um die Strecke X der Sonne näher gefunden. X ist daher die Fallstrecke während einer Sekunde.

Es sei nun ein Dreieck konstruiert, dessen eine Seite der Radius der Erdbahn ist, $1,5 \cdot 10^8 \text{ km}$, der die Sonne und die Anfangsposition der Erde verbindet; die andere Seite, rechtwinklig dazu, ist der 30 km lange Weg, den die Erde in einer Sekunde zurückgelegt hätte, wenn keine Kraft wirken würde. Die Hypotenuse ist die Linie, die die Sonne mit dem Endpunkt der 30-km -Seite verbindet, oder $(1,5 \cdot 10^8 + X) \text{ km}$. Nach dem Lehrsatz des Pythagoras haben wir

$$(1,5 \cdot 10^8)^2 + (30)^2 = (1,5 \cdot 10^8 + X)^2.$$

Da das Quadrat der Summe auf der rechten Seite gleich

$$(1,5 \cdot 10^8)^2 + 2 \cdot 1,5 \cdot 10^8 \cdot X + X^2$$

ist, wo X^2 im Vergleich zu den anderen Gliedern so klein ist, daß es vernachlässigt werden kann, finden wir:

$$30^2 = 2 \cdot 1,5 \cdot 10^8 \cdot X,$$

woraus sich

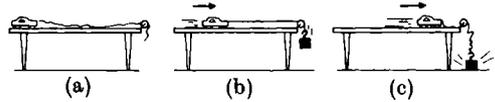
$$X = \frac{900}{3 \cdot 10^8} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ km} = 0,3 \text{ cm}$$

ergibt. Die Beschleunigung ist zweimal so groß, $0,6 \text{ cm/sec}^2$.

4.2 Newtons Bewegungsgesetze

Man stelle ein Spielzeugautomobil an das eine Ende eines Tisches (Abb. 4.8). Es wird ruhig stehen bleiben, bis irgendeine Kraft wirkt, die es dazu veranlaßt, sich zu bewegen. (Für dieses Experiment wird angenommen, daß Reibungseffekte zu vernachlässigen sind.) Nun lasse man

Abb. 4.8. Proportionalität von Kraft und Beschleunigung. Solange die konstante, von dem Gewicht ausgeübte Kraft wirkt, bewegt sich das Automobil mit gleichförmiger Beschleunigung.



auf das Automobil eine konstante Kraft wirken mit Hilfe eines fallenden Gewichts, das mit ihm durch einen Faden verbunden ist, der über eine Rolle läuft. Während die Kraft auf das Automobil wirkt, wird dessen Geschwindigkeit zunehmen — das Automobil wird beschleunigt werden. Wenn das Gewicht den Fußboden erreicht, wird die Kraft aufhören zu wirken und das Automobil wird seine Fahrt mit der Geschwindigkeit fortsetzen, die es zu dem Zeitpunkt erreicht hatte, in dem das Gewicht auf dem Boden auftrat. Dieses Experiment demonstriert Newtons erstes Bewegungsgesetz:

Ein in Ruhe oder gleichförmiger geradliniger Bewegung befindlicher Körper bleibt in Ruhe oder gleichförmiger geradliniger Bewegung, wenn er nicht durch eine äußere Kraft gezwungen wird, diesen Zustand zu ändern.

Das Experiment zeigt auch, daß während der Zeit, in der die Kraft auf ein Objekt wirkt, dieses beschleunigt wird. Um die Beziehung zwischen Kraft und Beschleunigung auf eine quantitative Form zu bringen, muß eine Krafteinheit definiert werden. Wenn das Spielzeugautomobil eine Masse von einem Gramm besitzt und um 1 cm/sec^2 beschleunigt wird, nennt man die Kraft, die die Beschleunigung hervorruft, ein Dyn. Somit ist durch Definition

ein Dyn die Kraft, die erforderlich ist, um einer Masse von einem Gramm eine Beschleunigung von einem Zentimeter pro Sekunde pro Sekunde zu erteilen.

Um die Beschleunigung zu erhöhen, muß man eine größere Kraft wirken lassen: Wenn ein Gramm Masse um 3 cm/sec^2 beschleunigt werden soll, so läßt sich zeigen, daß hierfür eine Kraft von 3 dyn gebraucht wird. Demgemäß ist die Kraft der Beschleunigung proportional, d. h.

$$F \sim a.$$

Wenn die Masse des Objekts vergrößert wird, ist die für eine vorgegebene Beschleunigung benötigte Kraft ebenfalls zu vergrößern. Um eine Masse von 5 g um 1 cm/sec^2 zu beschleunigen, ist eine Kraft von 5 dyn aufzuwenden. Daher ist

$$F \sim m.$$

Newtons zweites Bewegungsgesetz vereinigt diese beiden Proportionalitäten und wird in der Form ausgesprochen

$$F = m \cdot a,$$

worin F die Kraft in Dyn, die auf ein Objekt der Masse m in Gramm wirkt, und a die Beschleunigung in cm/sec^2 bedeuten. Aus dieser Beziehung ersieht man, daß das Dyn eine Kombination der drei Fundamenteinheiten ist:

$$\text{Dyn} = \frac{\text{Gramm} \cdot \text{Zentimeter}}{\text{Sekunde} \cdot \text{Sekunde}} = \frac{\text{Masse} \cdot \text{Länge}}{\text{Zeit} \cdot \text{Zeit}}.$$

Es soll noch erwähnt werden, daß die Beschleunigung eine Vektorgröße ist, die einen Betrag und eine Richtung besitzt, und auch die Kraft ist eine Vektorgröße. Die obige Gleichung besagt nicht nur, daß die Kraft dem Zahlenwert nach gleich dem Produkt aus Masse und Beschleunigung, sondern auch, daß die Richtung von Kraft und Beschleunigung die gleiche ist. Immer wenn ein Körper beschleunigt ist, wirkt eine Kraft auf ihn. Zum Beispiel ist die Erde, da sie um die Sonne läuft, zur Sonne hin beschleunigt (Abschnitt 4.1), daher muß eine Kraft existieren, die die Erde zur Sonne hin zieht. Diese Kraft ist die Schwerkraft oder Gravitation. Die Sonne zieht die Erde mit einer Kraft an, welche diese um $0,59 \text{ cm/sec}^2$ beschleunigt. Die Masse der Erde beträgt $6 \cdot 10^{27} \text{ g}$ (Abschnitt 5.2); daher ist der numerische Wert der Kraft, die die Sonne auf die Erde ausübt

$$F = m \cdot a = 6 \cdot 10^{27} \cdot 0,59 = 3,5 \cdot 10^{27} \text{ dyn.}$$

Die Erde zieht andererseits die Sonne mit der gleichen Kraft in entgegengesetzter Richtung an. Da die Kraft dieselbe ist, kann man die durch die Schwerkraft zwischen Sonne und Erde der ersteren erteilte Beschleunigung berechnen, indem man von der Tatsache Gebrauch macht, daß die Sonnenmasse $2 \cdot 10^{33} \text{ g}$ beträgt (Abschnitt 15.1).

$$F = m \cdot a$$

oder

$$a = F/m.$$

Daher ist die

$$\text{Beschleunigung der Sonne} = 3,5 \cdot 10^{27} / 2 \cdot 10^{33}$$

oder angenähert

$$\text{Beschleunigung der Sonne} = 10^{-6} \text{ cm/sec}^2.$$

Somit ist die Sonne wegen ihrer größeren Masse weniger beschleunigt als die Erde. Die Existenz entgegengesetzter Kräfte wird in Newtons drittem Bewegungsgesetz ausgesprochen, das auf alle Kräfte anwendbar ist:

Zu jeder Kraft gibt es eine gleiche Kraft, die in entgegengesetzter Richtung wirkt.

4.3 Das Gravitationsgesetz

Im Abschnitt 4.2 wurde die gegenseitige Anziehung der Sonne und der Erde durch die Schwerkraft erklärt. Diese Kraft ist nicht auf Himmelskörper beschränkt, sondern wirkt auf jedes Objekt im Weltall. Die Anziehung zwischen zwei Körpern auf der Erdoberfläche ist im Laboratorium mit Hilfe empfindlicher Instrumente gemessen worden. Das hypothetische Experiment, das in diesem Abschnitt beschrieben wird, kann zwar nicht mit den vorhandenen Instrumenten durchgeführt werden, weil die Kräfte sehr klein sind, aber es dient dazu, das Gravitationsgesetz zu erläutern.

Man betrachte zwei kugelförmige Körper, *A* und *B*, die beide je ein Gramm wiegen und deren Abstand voneinander einen Zentimeter beträgt (Abb. 4.9). Von diesen beiden Massen zieht

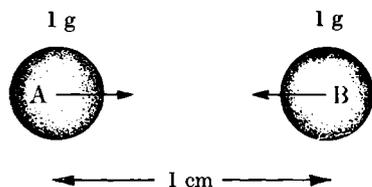


Abb. 4.9. Gravitationsanziehung von zwei Körpern. Die Kraft beträgt $6,7 \cdot 10^{-8} \text{ dyn}$.

jede die andere an auf Grund ihrer gegenseitigen Gravitation: Es besteht eine Anziehungskraft zwischen ihnen. Wenn die Anziehung, die die Erde auf die beiden Objekte ausübt, ausgeschaltet werden könnte und wenn es den beiden Objekten möglich wäre, von einem stationären Zustand aus sich gegeneinander zu bewegen, so würde das Experiment zeigen, daß jedes von ihnen nach Ablauf einer Sekunde eine Geschwindigkeit von $6,7 \cdot 10^{-8}$ cm/sec erhalten haben würde. Folglich beträgt die Beschleunigung jedes Objekts $6,7 \cdot 10^{-8}$ cm/sec². Nach Newtons 2. Bewegungsgesetz ist die Kraft das Produkt aus Masse, 1 g, und Beschleunigung, $6,7 \cdot 10^{-8}$ cm/sec². Somit zieht jedes der beiden Objekte das andere mit derselben Kraft, $6,7 \cdot 10^{-8}$ dyn, an und nach Newtons 3. Gesetz sind beide Kräfte entgegengesetzt gerichtet.

Wenn die Masse von *A* auf 3 g erhöht wird, während die Masse von *B* 1 g bleibt, so wird die Kraft von *A* auf *B* dreimal so groß sein wie die im ursprünglichen Experiment, und die Kraft von *B* auf *A* wird ebenfalls dreimal $6,7 \cdot 10^{-8}$ dyn betragen. Wenn beide, *B* und *A*, eine Masse von 3 g haben, findet man, daß die Kraft gegenüber dem ursprünglichen Experiment um einen Faktor 9 vergrößert ist. Daher ist die Schwerkraft proportional dem Produkt der Massen beider Körper. Wenn die ursprünglichen 1-Gramm-Massen um zwei Zentimeter voneinander entfernt wären, würde man für die Kraft ein Viertel des ursprünglichen Wertes finden, und bei einer Entfernung von drei Zentimetern ergäbe sich für die Kraft ein Neuntel des ursprünglichen Wertes. Wenn man also die Entfernung verändert, so sieht man, daß die Kraft dem Quadrat der Entfernung umgekehrt proportional ist. Durch Kombination beider Resultate ergibt sich

$$F \sim \frac{m_A \cdot m_B}{d^2}.$$

Die Proportionalität kann in Gleichheit verwandelt werden, wenn ein konstanter Faktor eingeführt wird, so daß

$$F = G \frac{m_A \cdot m_B}{d^2}. \quad (\text{Gleichung 4.1})$$

ist. *G* ist die Newtonsche Gravitationskonstante. Da $F = 6,7 \cdot 10^{-8}$ dyn, wenn $m_A = m_B = 1$ g und $d = 1$ cm, beträgt der Wert von *G* in cgs-Einheiten

$$G = 6,7 \cdot 10^{-8}.$$

Gleichung 4.1 ist das Newtonsche Gravitationsgesetz. Es erklärt die Bewegungen der Erde, der anderen Planeten und der Satelliten ebenso wie die Bewegungen von Doppelsternen und sogar von Doppelgalaxien. Alle Massenbestimmungen astronomischer Körper beruhen auf ihm.

Aufgaben

1. Für einen fallenden Körper auf der Erde liefert die Beobachtung für dessen Geschwindigkeit die Werte

Geschwindigkeit	am Ende der Sekunde
0 km/sec	0
980	1
1960	2
2940	3
3920	4
4900	5

Ist die Beschleunigung des fallenden Körpers veränderlich oder konstant? Bestimme den Wert der Beschleunigung in cm/sec². Man beachte, daß die Fallstrecke am Ende der ersten Sekunde

$$\text{Durchschnittsgeschwindigkeit} \cdot \text{Zeit} = \frac{1}{2} \left(980 \frac{\text{cm}}{\text{sec}} + 0 \frac{\text{cm}}{\text{sec}} \right) \cdot 1 \text{ sec} = 490 \text{ cm},$$

am Ende der zweiten Sekunde

$$490 \text{ cm} + \frac{1960 + 980}{2} \cdot 1 \text{ sec} = 490 + 1470 = 1960 \text{ cm}$$

usw. beträgt. Allgemein ist $s = \frac{1}{2} a \cdot t^2$.

2. Welche Kraft übt die Erdatmosphäre auf ein Meteor aus, das 0,001 g wiegt, wenn sie das Meteor um $1,000 \text{ cm/sec}^2$ verzögert? (Vernachlässige die Anziehung der Erde auf das Meteor.)
3. Der Planet Jupiter läuft mit einer Periode von rund 12 Jahren in einer mittleren Entfernung von $7,8 \cdot 10^8 \text{ km}$ um die Sonne. Die Jupiterbahn sei ein Kreis. Man berechne die lineare Geschwindigkeit v Jupiters in km/sec und in cm/sec , ferner seine Winkelgeschwindigkeit ω in Grad/sec .
4. Unter Verwendung des Ergebnisses der vorstehenden Aufgabe ist die Beschleunigung Jupiters durch die Sonne zu finden.
5. Die Sonnenmasse beträgt $2 \cdot 10^{33} \text{ g}$, die mittlere Entfernung Jupiters von der Sonne $7,8 \cdot 10^8 \text{ km}$. Auf Grund des Newtonschen Gravitationsgesetzes ist die Beschleunigung Jupiters durch die Sonne zu berechnen.

5. DIE ERDE ALS PHYSIKALISCHER KÖRPER

5.1 Größe und Gestalt der Erde

Während einer Mondfinsternis (Abb. 5.1) sieht man die Mondoberfläche innerhalb des von der Sonne geworfenen Erdschattens. Die kreisförmige Begrenzung dieses Schattens läßt sich nur folgerichtig erklären, wenn die Erde eine angenähert sphärische Gestalt besitzt.

Da die Erde zu groß ist, um direkt gemessen werden zu können, muß eine indirekte Methode zur Bestimmung ihrer Größe angewandt werden. Ein kleiner Bogen ihres Umfangs könnte mit einem Meßband ausgemessen werden zwischen zwei Orten, die auf demselben Meridian liegen, deren Breite aber um 1 Grad differiert. Wenn die Erde eine vollkommene Kugel wäre, würde überall die Entfernung zwischen zwei Punkten, deren Breitenunterschied einen Grad beträgt und die auf dem gleichen Meridian liegen, dieselbe sein. Aus einer Messung dieser Entfernung ließe sich dann der Erdumfang berechnen. Ist d die gemessene Entfernung und c der gesuchte Erdumfang, so gilt

$$\frac{d}{c} = \frac{1^\circ}{360^\circ}.$$

Wenn c gefunden ist, kann der Erdradius R_\oplus aus der Beziehung

$$c = 2 \pi R_\oplus = 2 \cdot 3,142 \cdot R_\oplus$$

berechnet werden.

Direkte Messungen ergeben, daß der Abstand zweier Punkte, die in Breite 1° voneinander entfernt sind, durchschnittlich 111 km beträgt. Hieraus folgt der Erdumfang

$$c = 111 \cdot 360 = 39\,960 \text{ km},$$

und weiter erhält man für den Radius der Erde

$$R_\oplus = 6\,400 \text{ km (3\,900 Meilen)}.$$

Wenn jedoch längs eines Erdmeridians eine Reihe von Punktepaaren ausgewählt wird — jedes Paar mit einem Grad Breitendifferenz —, so führen die Messungen mit dem Maßband nicht überall auf dasselbe Ergebnis. Tafel 5.1 zeigt, daß solche Punkte in Äquaturnähe etwas dichter beieinander liegen als solche in Nähe der Pole.

Tafel 5.1. Längen von 1 Grad-Bogen

Lage	Breite	1° Breite entsprechende Entfernung	Radius
Nordpol	+ 90°	111,68 km	6356,912 km
Washington	+ 39°	111,39 km	6365,8 km
Äquator	0°	111,12 km	6378,388 km
Mittel	—	—	6370 km