

G. Lotz-Grütz, M. Grütz

Unser Kosmos

Einführung in die Astrophysik

G. Lotz-Grütz / M. Grütz

Unser Kosmos

Einführung in die Astrophysik

Vorwort

Das griechische Wort Kosmos (κόσμος) bedeutet Ordnung, Weltordnung, aber auch Schmuck. Der Kosmos der Astronomie umfasst die ganze Welt, in der wir leben. Mit dem Wort Kosmos ist auch die Schönheit des ganzen Universums beschrieben. In diesem Sinn ist das vorliegende Buch für alle gedacht, die sich für Astronomie interessieren und sich ein Grundwissen über die elementaren Zusammenhänge der Kosmologie aneignen wollen.

Das Buch bietet einen Überblick über das Universum: Es ist ein Buch über unseren Blick auf die Sterne. Es erklärt die physikalischen Grundbegriffe der Planetenbewegungen, beschreibt die Energieprozesse in der Sonne sowie die Entstehung von Sternen und Galaxien und lenkt den Blick bis an die Grenzen unserer Welt. Ausgehend von unserem Sonnensystem befasst es sich mit dem Werden und Vergehen der entferntesten Regionen des Universums und unseren Vorstellungen der vierdimensionalen Raumzeit.

Aber ein Buch über den Kosmos der Astronomie kann nur unvollständig bleiben. Viele Theorien sind angedeutet, manches ist nur vorläufig und wird durch die Ergebnisse künftiger Forschung zu revidieren sein.

Das vorliegende Buch soll Interesse an der Astronomie und Neugierde auf weitere Erkenntnisse wecken sowie die Begeisterung an der eigenen Beobachtung fördern. Dafür soll der derzeitige Stand der Astrophysik überblicksmäßig und allgemeinverständlich vermittelt werden. Im Wesentlichen werden dafür nur Grundkenntnisse der Schulphysik vorausgesetzt. Nicht berücksichtigt sind hingegen die verschiedenen astrometrischen Instrumente wie die speziellen Spiegelteleskope und ihre optischen Systeme, die Fernrohrtechnik sowie die Methoden der Astrofotografie.

Das Buch ist in zwei Bereiche geteilt, die unabhängig zu verstehen sind: einen reinen Textteil, der weitestgehend ohne Formeln und mathematische Darstellungen auskommt, sowie

kompakte Exkurse, die knappe Erläuterungen zu den einzelnen Themen bieten. Diese Exkurse können durchaus als eigenständiges Buch gelesen werden, wenngleich sie sich inhaltlich an die leichter lesbaren Textteile anschließen. Die Exkurse sind optisch durch eine Umrahmung und in kleinerer Schrift vom Textteil abgetrennt und leicht aufzusuchen.

Auf den Abdruck von Fotografien wurde bewusst verzichtet: Die zahlreichen großartigen Aufnahmen, die beispielsweise das Hubble-Teleskop und ähnliche Systeme erstellt haben, die oberhalb der Erdatmosphäre unter optimalen Bedingungen die schönsten Himmelsobjekte abgelichtet haben, lassen sich nicht übertreffen. Die Bildbände, die am Schluss des Literaturverzeichnisses als weiterführende Buchempfehlungen aufgelistet sind, beinhalten allesamt Sammlungen zahlreicher beeindruckender Bilder. Auch das Internet ist voll von Bildern der wichtigsten astronomischen Objekte. Das tatsächliche Entdecken, die eigene Beobachtung des Sternenhimmels, das Erlebnis der Wirklichkeit ist jedoch durch nichts zu ersetzen.

Je mehr man über einzelne Himmelsobjekte weiß, um so mehr kann der Blick in den Himmel erzählen und die Schönheit des Kosmos erstrahlen.

Schon mit einem Feldstecher oder mit einem kleinen Teleskop ist es möglich, bedeutende Objekte selbst zu sehen. Doch auch ohne eigenes Instrument kann man die Beobachtung des Himmels erleben, wenn man öffentliche Observatorien besucht, wie sie viele Volkssternwarten anbieten. Das Staunen über die Welt, über den Kosmos mit seinen unvorstellbaren Größenverhältnissen, wird mit jeder Entdeckungsreise zu den Sternen größer.

Möge der Leser sich begeistern lassen von der unbeschreiblichen Schönheit des Kosmos – unseres Kosmos!

München, den 6.12.22

Günter Lotz-Grütz,
Moritz Grütz

Inhalt

1. Unser Platz im Universum	9
2. Unser geozentrischer Blick	24
3. Die Bewegungen der Erde	43
4. Das Planetensystem	54
5. Die Titius-Bode-Reihe	66
6. Die Vermessung des Planetensystems	81
7. Die Vermessung der Erde	88
8. Die Sonne	94
9. Sterne	106
10. Lebenswege	122
11. Sternenende	133
12. Galaxien	141
13. Die Expansion des Universums	153
14. Der Urknall	162
15. Die vierdimensionale Raumzeitwelt	179
16. Gravitation	186
17. Gravitationswellen	191
18. Schwarze Löcher	195
19. Grenzen	201
20. Was wird	219
Anhang I, II, III	231

Exkurse

<i>Orientierung am Himmel</i>	13
<i>Unser Universum</i>	23
<i>Mondfinsternis</i>	28
<i>Geschwindigkeiten (Erde, Mond)</i>	44
<i>Das System Erde-Monde</i>	52
<i>Die Keplerschen Gesetze</i>	59
<i>Planeten und Satelliten</i>	65
<i>Titius-Bode-Reihe</i>	80
<i>Aristarch</i>	84
<i>Kernfusion</i>	98
<i>Sonne (I)</i>	104
<i>Sonne (II): Die Zustandsgrößen der Sonne</i>	105
<i>Entfernungsmodul</i>	110
<i>Wasserstoffspektrum</i>	115
<i>Sternberechnungen</i>	121
<i>Hertzsprung-Russell-Diagramm</i>	132
<i>Rotverschiebung</i>	161
<i>Mikrowellen-Hintergrund</i>	175
<i>Quasare</i>	200
<i>Relativitätstheorie</i>	211

1. Unser Platz im Universum

*Weißt du, wie viel Sternlein stehen,
an dem großen Himmelszelt?
Keiner hat sie je gezählet,
ob denn auch nicht eines fehlet...
(altes Wiegenlied)*

Ein Blick in den Sternenhimmel zeigt uns ein vorbeiziehendes, quasi unveränderliches Muster kleinster Lichtpunkte unterschiedlicher Helligkeit. Gemeinhin stellt man sich vor, das „Himmelszelt“ wäre eine über die Erde gestülpte, sehr große Kugel, die durch die Horizontebene in zwei Halbkugeln geteilt ist.

Diese Fixsternsphäre ist eine gedachte kugelförmige, bewegliche Projektionsfläche, auf die alle Himmelsobjekte vom Mittelpunkt aus projiziert werden und die der Beobachter von seinem Standpunkt aus – quasi von innen heraus – betrachtet. Gleich einem Film werden die verschiedenen Bewegungen von Sonne, Mond und den Sternen wahrgenommen: Das ganze Himmelsgewölbe scheint sich Nacht für Nacht um uns zu drehen – mitsamt allen Gestirnen, die sich in einem gemeinsamen Reigen mitdrehen, im Osten auf- und im Westen untergehen.

Die meisten Lichtpunkte sind Sterne, die ihre gegenseitige Lage auf der gedachten Himmelskugel scheinbar nicht ändern. Innerhalb von mehreren tausend Jahren bleiben sie in ihrer Anordnung und bilden von der Erde aus betrachtet denselben Anblick. Ihre Bezeichnung als Fixsterne, als an dieser Himmelssphäre fixierte Sterne, hat deshalb durchaus ihre Berechtigung. Ihre Bewegung im Lauf einer Nacht oder auch im Lauf eines Jahres wird als Drehung der gesamten Fixsternsphäre um die Achse der Erde verstanden.

In Wirklichkeit sind alle Sterne mehr oder weniger große, weit entfernte selbstleuchtende „Sonnen“, die absolut nicht in Ruhe sind; jeder Fixstern bewegt sich deshalb während vieler Jahrhunderte kaum merklich vor der drehenden Fixsternsphäre. Diese Eigenbewegung ist für uns allerdings nicht ohne Weiteres direkt

beobachtbar. Sie kann jedoch gemessen und errechnet werden.

Auffällig sind die unterschiedlichen Helligkeiten der Sterne: Die hellsten sind an klaren Abenden bereits bei Dämmerung erkennbar, dunklere sind nur in klaren Nächten zu sehen, die dunkelsten lassen sich nur mit Hilfsmitteln aufspüren, die auch das Licht entferntester Lichtquellen einfangen.

Dennoch lassen die Helligkeitsunterschiede keinen direkten Schluss auf die Entfernung zu: In vielen Fällen sind helle Sterne wesentlich weiter entfernt als dunklere! So ist zum Beispiel Sirius, der hellste Fixstern am Himmel und Hauptstern im Großen Hund (Canis Major), mehr als doppelt so weit entfernt wie der nächste Fixstern, Proxima Centauri, der dunkler erscheint.

Die wahrgenommene oder scheinbare Helligkeit ist also kein Hinweis auf die Entfernung des Himmelskörpers. Daher wurde in der Astronomie eine absolute Helligkeit eingeführt, die angibt, welche Helligkeit ein Stern haben würde, wenn er in einer Normentfernung stehen würde (Normentf.: 10 parsec = 10 pc = 32,6 Lichtjahre = $3,08 \cdot 10^{14}$ km). Erst die so definierte absolute Helligkeit gestattet Vergleiche zwischen den Sternen hinsichtlich ihrer Eigenschaften wie Abstand, Größe und ihres physikalischen Zustands.

Seit alten Zeiten haben Seefahrer die hellsten Sterne zu Bildern gefügt und mit Geschichten versehen, die oft dem antiken griechischen und altarabischen Sagenkreis entnommen sind. So fiel es leichter, sich die wichtigsten Sterne zu merken und diese als Orientierungshilfe für die Seefahrt nutzen zu können. Die Sternbilder, die entlang der scheinbaren Sonnenbahn aufgereiht sind, markieren den Tierkreis (Zodiakus), auf dem man auch die Planeten sowie Sonne und Mond findet. Sie sind bis heute als die zwölf Tierkreiszeichen bekannt: Widder (Aries), Stier (Taurus), Zwillinge (Gemini), Krebs (Cancer), Löwe (Leo), Jungfrau (Virgo), Waage (Libra), Skorpion (Scorpio), Schütze (Sagittarius), Steinbock (Capricornus), Wassermann (Aquarius) und Fische (Pisces). Sie bilden einen geschlossenen Ring aneinandergereihter Bilder, dessen Mittellinie als Ekliptik bezeichnet wird. Die Ekliptik ist die Kreislinie der scheinbaren Sonnenbahn auf der Himmelskugel. Die Tierkreiszeichen haben keine andere Bedeutung als die, das

Auffinden der scheinbaren Sonnenbahn zu erleichtern. Diese beginnt im Frühlingspunkt auf dem Äquator, verläuft zwischen den Sternhaufen der Plejaden und Hyaden und zieht dann am Stern Aldebaran (Hauptstern im Stier) vorbei und oberhalb des Äquators über den Stern Regulus (im Löwen) hin zu Spica (in der Jungfrau). Zwischen Regulus und Spica liegt der zweite Schnittpunkt der Ekliptik mit dem Himmelsäquator, der Herbstpunkt, in dem die Ekliptik wieder unter den Himmelsäquator taucht.

Sternbilder sind also bloß phantasievolle Figuren, die durch Zusammenfügen mehrerer etwa gleich heller Sterne entstehen, die auffällige Muster auf der Fixsternsphäre bilden. Die Sterne eines Sternbildes haben aber im Allgemeinen keinerlei Gemeinsamkeiten: Sie gehören astronomisch nicht zusammen, sind sogar meistens räumlich in alle Richtungen weit auseinandergezogen.

Manche Sternbilder stehen so nah beieinander, dass der Eindruck entsteht, sie würden eine zusammengehörende Gruppe bilden. Tatsächlich gibt es aber keine Sternbilder, die als Sternhaufen eine tatsächliche Einheit bilden. Auch direkt nebeneinander leuchtende Sterne, die als Doppelstern oder Tripel erscheinen, liegen in Wirklichkeit meist räumlich weit hintereinander und haben sehr unterschiedliche Entfernungen von der Erde. Solche „optischen“ Doppelsterne haben für die Astronomie keine weitere Bedeutung.

Die echten oder „physischen“ Doppelsterne sind tatsächlich eng zusammengehörig und umkreisen einander. Vielfach lassen sich solche zusammengehörigen Systeme im Fernrohr als zwei getrennte Lichtpunkte erkennen, gelegentlich sogar mit bloßem Auge. In diesem Fall nennt man sie „visuelle“ Doppelsterne.

Ein bekanntes Beispiel für einen visuellen Doppelstern sind Alkor und Mizar (ζ ursae maioris), die den mittleren Deichselstern im großen Wagen bilden. Da man Alkor nur mit scharfem Auge getrennt vom helleren Mizar erkennen kann, wird dieses Sternenpaar auch „Augenprüfer“ genannt. Wenn ein Partner eines echten Doppelsternsystems in seinem Umlauf den anderen von der Erde aus betrachtet regelmäßig verdeckt, lässt sich das Doppelsternsystem an seiner periodischen Lichtveränderung erkennen. Solche Sterne nennt man Bedeckungsveränderliche.

Ein Doppelsternsystem lässt sich mit dem Modell einer Hantel beschreiben, bei der unterschiedlich große Gewichte an den Hantelenden die unterschiedlich großen Sterne eines solchen Sternpaares repräsentieren. Das Zentrum der gemeinsamen Umlaufbewegung ist der Schwerpunkt der Hantel, in dem man die drehbar gelagerte Stange aufhängen oder unterlegen kann. Um diesen Drehpunkt kreisen die Komponenten in Abständen, die sich umgekehrt wie ihre unterschiedlichen Massen verhalten. Bei geringen Abständen kann es zu einem Materiefluss zwischen den Partnern eines Doppelsterns kommen, die dann quasi einen Stern bilden und wechselseitig Masse austauschen.

Es gibt aber auch größere Verbände von Sternen, teils lose, teils enger zusammengehörige Strukturen, sogenannte Sternhaufen, die aus einzelnen Sternen bestehen, die sich tatsächlich in gewisser räumlicher Nähe zueinander befinden. Man unterscheidet offene und geschlossene Sternhaufen.

Beispiele für offene Sternhaufen sind die auffälligen Strukturen der Plejaden (Messier-Katalog M 45), auch Siebengestirn genannt, und die Hyaden, beide im Sternbild Stier.

Geschlossene Sternhaufen sind Kugelhaufen, in denen sich die Sterne in einer Kugel radialsymmetrisch um ein Zentrum gruppieren. Kugelhaufen bestehen aus sehr alten Sternen aus einer älteren Sternengeneration. Ein Kugelsternhaufen besteht aus 10.000 bis 10 Mio. Sternen. „Die Sterndichte im Zentrum ist so hoch, dass Kugelsternhaufen dort nicht mehr in Einzelsterne aufgelöst erscheinen“ (R. H. Giese, 1981, S. 252). Ungefähr 150 Kugelsternhaufen bilden einen kugelförmigen Hof („Halo“) um die Scheibe unseres Milchstraßensystems. Zu diesen geschlossenen Sternhaufen gehört der bekannte Kugelhaufen M13 im Sternbild Herkules.

Sterne sind mehr oder weniger große, weit entfernte, leuchtende und extrem heiße Gasbälle, die im Innern mittels atomarer Prozesse riesige Energiemengen freisetzen. Diese Energie wird über lange Zeit gleichbleibend in alle Richtungen im Wesentlichen als Licht, allgemeiner als elektromagnetische Strahlung abgestrahlt, begleitet von teilweise heftigen Ausbrüchen heißen Plasmas.

Exkurs Orientierung am Himmel

Ursa major: Das Sternbild Großer Bär oder Wagen am Nordhimmel hat sieben Hauptsterne (vier für das Rechteck Wagenkasten und drei Deichselsterne). Der mittlere Deichselstern ist ein Doppelstern: Alkor und Mizar. Verlängert man die Verbindungslinie der beiden rückwärtigen Sterne des Wagenkastens um das Fünffache ihres Abstandes nach oben, so gelangt man zum Polarstern, der den Himmelsnordpol markiert.

Am Polarstern hängt der Kleine Wagen (U.minor), geneigt zum Großen Wagen. Um den Kleinen Wagen windet sich der Drache (Draco) wie ein Sternenkranz. Die Deichsel des Großen Wagens zeigt auf den hellen Stern Arktur im Bootes, der Fußpunkt eines Drachenvierecks ist, gefolgt vom Sternbild Herkules mit dem Kugelsternhaufen M13. Dazwischen fast kreisrund die nördliche Krone Corona borealis. Tief im Süden unter dem Herkules steht der Skorpion mit seinen drei Zangen und dem roten Hauptstern Antares.

Die drei hellsten Sterne des Sommerhimmels bilden das „Sommerdreieck“: Wega in der Leier, Altair im Adler und Deneb im Schwan. Die dazugehörigen Sternbilder sind die Raute der Leier, die weiten Flügel des Adlers und das Kreuz des Nordens (Schwan). Altair liegt etwas über dem Himmelsäquator. An der Unterkante der Leier (gegenüber von Wega), findet man mit einem Fernrohr den berühmten Ringnebel in der Leier.

Es folgen Pegasus und Andromeda, dort ein schwacher Lichtfleck, die Andromeda-Galaxie; nördlich der Andromeda findet man das W der Cassiopeia, östlich dann Perseus, an dessen unterem Ende der Sternhaufen der Plejaden („Siebengestirn“), darunter im Stier die Hyaden, die in V-Form am Hauptstern des Stiers, Aldebaran hängen.

Im Winter findet man den Himmelsjäger Orion: Dieser ist vor allem wegen seines aus drei in einer Linie liegenden Sternen bestehenden Gürtels berühmt und leicht zu finden. Der rechte Gürtelstern liegt auf dem Himmelsäquator, fährt also in einer Nacht genau über den Himmelsäquator. Unter dem Gürtel hängt das Schwert des Jägers mit dem berühmten Orionnebel. Der Gürtel sitzt mittig, der rote Riesenstern Beteigeuze ist der linke (rote) Schulterstern, der rechte (weiß-bläuliche) Fußstern, Rigel, ist der hellste Stern im Orion.

Nicht zu übersehen ist der absolut hellste Stern am Himmel, Sirius, als Hauptstern im Großen Hund, darunter, relativ schwach, der Kleine Hund.

Ab Februar geht der Löwe auf: ein großes Trapez mit dem Hauptstern Regulus (rechtes unteres Trapez-Eck = eine vordere Tatze des Löwen).

Der für uns Erdenbewohner wichtigste Stern ist die Sonne. Da wir die Sonne sehr gut kennen, sind uns von ihr viele grundsätzliche Prozesse bekannt, die in allen Sternen ablaufen.

Unsere Sonne ist mit einem Radius von ca. 100 Erdradien ein durchschnittlicher Zwergstern. Sie gehört also zu den eher kleineren Sternen. Die Sonne ist der einzige Stern, dessen Oberflächenstruktur gut beobachtbar ist. Alle anderen Sterne lassen sich mit optischen Geräten nicht vergrößern: Selbst im besten Fernrohr bleiben sie punktförmig. Erst mithilfe computergestützter Analysen können Oberflächenbilder von Sternen hergestellt werden. Mit zunehmender Vergrößerung des Fernrohrs wird jedoch die Anzahl der beobachtbaren Sterne größer.

Die mittlere Entfernung der Sonne von der Erde ist die „Astronomische Einheit“ (1 AE). Eine Astronomische Einheit ist heute auf 149.597.870.700 Meter festgelegt und ist für die Bestimmung der Entfernungen im Sonnensystem von größter Bedeutung. Im Allgemeinen genügt die gerundete Zahlenangabe in der Zehnerpotenzdarstellung:

$$1 \text{ AE} = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ m} = 1,5 \cdot 10^8 \text{ km}$$

Alle anderen Sterne unserer näheren Umgebung sind im Mittel mehr als 250.000 AE – also circa vier Lichtjahre – von der Sonne entfernt. Das entspricht etwa dem mittleren Abstand der Sterne voneinander (in allen räumlichen Richtungen) in Sternsystemen. Unser Sonnensystem wäre damit vom uns am nächsten gelegenen Stern aus betrachtet lediglich als ein schwacher Lichtpunkt zu sehen, unser Planetensystem – einschließlich der Erde – wäre nicht erkennbar.

Alle für uns sichtbaren Sterne gehören zu einem großen Sternsystem, dem Milchstraßensystem – unserer Heimatgalaxie. Diese besteht aus circa 100 Mrd. Sternen, die trotz ihrer großen Abstände voneinander eine Sterneninsel bilden. Die Anzahl der Sterne und damit auch die Gesamtmasse unserer Galaxie kann nur basierend auf Berechnungen und Beobachtungen geschätzt werden, woraus sich ein relativ großer Unsicherheitsbereich der Zahlen ergibt.

Wie die meisten Sternsysteme hat unsere Galaxie die Form einer flachen Scheibe mit spiralförmiger Struktur; man spricht darum von einer Scheibengalaxie. Das von unserem Beobachtungspunkt Erde aus bei klarem Himmel sichtbare Band der Milchstraße entsteht durch den Blick von innen in die Ebene der Galaxienseibe (Blick in ihre Äquatorialebene). Wir schauen dabei in Richtung des Zentrums unserer Galaxie, das sich im Sternbild Schütze verorten lässt. Dort ist die Sternendichte wesentlich höher als in den Randgebieten der Scheibe: Die Sternendichte ist hier so groß, dass die Milchstraße ohne Teleskop nicht mehr in einzelne Sterne aufgelöst werden kann. Nur bei starker Vergrößerung ist zu erkennen, dass das milchige Band, das sich über den Himmel zieht, durch das Licht zahlloser Sterne aus weit entfernten Regionen unseres Sternensystems zustande kommt. Dieses Band der Milchstraße zeigt jedoch nur einen Ausschnitt unserer Galaxie – den weitaus größeren Teil können wir grundsätzlich nicht sehen, da wir uns innerhalb dieses Systems befinden.

Blickt man quer durch die dünne Scheibe, schaut man durch die äußeren Gebiete der Galaxie, die dort quasi durchsichtig ist, weil vergleichsweise wenig Sterne sichtbar sind. Tatsächlich gehören jedoch alle Sterne des Nachthimmels, die im Allgemeinen mit bloßem Auge erkennbar sind, noch zu unserer Galaxie.

Der mittlere Abstand der einzelnen Sterne voneinander beträgt in den Randgebieten mehrere Lichtjahre, zum Galaxienzentrum hin werden die Abstände kleiner, die Sternendichte nimmt zu. Erst ihre riesige Anzahl lässt sie trotz der großen Abstände untereinander zu einem zusammengehörigen System werden.

Der griechische Name Galaxis (γάλα [gala] = Milch) wurde zur allgemeinen Bezeichnung für ähnliche Sternsysteme, deren Anzahl im gesamten Universum nach neueren Schätzungen weit mehr als 1.000 Mrd. (10^{12}) betragen dürfte. Andere Galaxien sind unvorstellbar weit entfernt und daher zumeist nur mit großen Teleskopen zu finden. Lediglich unsere große Nachbargalaxie, der Andromedanebel, ist bei guten Sichtverhältnissen mit bloßem Auge am Nordhimmel als verwaschener Fleck im Sternbild der Andromeda erkennbar (Entfernung: 2,5 Mio. Lichtjahre). Der Begriff „Nebel“ ist

allerdings irreführend, da es sich hier nicht um diffuse Gaswolken handelt, sondern um „Sterneninseln“ – also Galaxien, aus zumeist mehreren hundert Milliarden Sternen. Die Andromeda-Galaxie, wie man also besser sagen sollte, hat wie unsere Heimatgalaxie die Form einer flachen Scheibe mit spiralförmiger Struktur. Mit stark vergrößernden Fernrohren ist nicht nur die Spiralstruktur erkennbar, sondern es können sogar einzelne Sterne aufgelöst werden.

Tatsächlich gibt es am Nachthimmel auch leuchtende „Nebel“ zu sehen, die zu Recht so bezeichnet werden. Das sind dann dünne Gaswolken, die teilweise von dahinterliegenden Sternen zum Leuchten angeregt werden oder als Dunkelwolken das Licht dahinterstehender Sterne absorbieren. Derartige Gaswolken sind oft Brutstätten neuer Sterne – etwa der wegen seiner Schönheit berühmte Orionnebel. Dieser ist bereits mit kleinen Fernrohren ziemlich genau in der Mitte des Schwertes des Orion zu finden.

Andere Gaswolken wiederum zeugen vom Ende eines Sterns. Sie sind Reste einer Sternexplosion, wie der relativ bekannte Crab-Nebel im Sternbild Stier (Entfernung: 6000 Lj., Durchmesser: 77 Lj) oder der Ringnebel in der Leier, der die abgesprengte Hülle eines sterbenden Sterns zeigt (Entfernung: 2000 Lj, Durchmesser: 1,5 Lj).

Alle bislang genannten Objekte – die Fixsterne, die Galaxien und die Gasnebel – ändern ihre gegenseitige Lage am Himmel innerhalb von Jahrtausenden nicht merklich. Daher lässt sich auch jedes dieser Objekte mit Koordinaten versehen, katalogisieren und wieder auffinden. Exakte Sternkarten müssen allerdings die säkularen Veränderungen der Sternörter berücksichtigen, die vor allem auf Störungen der Erdbahn zurückzuführen sind. Solche Störungen haben eine langsame Verschiebung aller Sternkoordinaten auf der ansonsten festen Fixsternsphäre zur Folge. Berücksichtigt man die wechselseitigen Einflüsse mehrerer Planeten aufeinander, können auch Bahnstörungen auftreten, die im Allgemeinen ohne Folgen bleiben. Für möglichst exakte Messungen in der Satellitentechnik müssen solche Störungen natürlich berücksichtigt werden.

Vor dieser kaum veränderlichen Kulisse gibt es aber auch Objekte, die ihren Ort vor dem Fixsternhimmel erkennbar wechseln, sich also

vor den Sternbilder bewegen und daher schon im Altertum Planeten, das heißt Wandelsterne, genannt wurden. Sie verändern ihre Lage im Laufe mehrerer Tage merklich. Planeten sind grundsätzlich von den Sternen unterschiedene Objekte am Himmel, sowohl was ihren Lauf vor der Fixsternsphäre betrifft, als auch ihre Entfernung vom Beobachter und ihre gesamte physikalische Beschaffenheit.

Planeten sind erkaltete, weitgehend feste Körper, mit fester oder flüssiger Oberfläche, bei den sonnennahen (erdähnlichen) Planeten oft aus Gestein oder Sand. Auf einigen Nachbarplaneten wurden auch schon Satelliten abgesetzt, die sehr genaue Details der jeweiligen Oberflächen untersuchen konnten. Da sich die meisten Planeten – im Gegensatz zu den Sternen – mit dem Fernrohr gut vergrößern lassen, sind selbst hier schon Oberflächenstrukturen erkennbar: Deutlich leuchten die vereisten Polkappen des Mars, die jahreszeitlich unterschiedliche Ausmaße einnehmen und daher früher zu Spekulationen über außerirdisches Leben Anlass gaben. Dichte Wolken verhindern hingegen die Sicht auf die Venusoberfläche. Auf den großen Gasplaneten wiederum müssen, etwa im Großen Roten Fleck auf dem Jupiter, heftige Wirbelstürme toben.

Planeten können nicht selbst leuchten, sie werden lediglich von der Sonne angestrahlt, wie wir dies am Erdmond beobachten können. Wir sehen also nur das von den Planeten und ihren Monden reflektierte Sonnenlicht. Die Eigenschaft der Rückstrahlungsfähigkeit einer Planetenoberfläche nennt man Albedo.

Der sonnennächste Planet ist Merkur, der vor der Sonne nur in den Morgen- oder Abendstunden sichtbar ist. Auch die Venus, die zwischen Merkur und Erde ihre Bahn um die Sonne zieht, ist nur vor Sonnenaufgang oder nach Sonnenuntergang sichtbar. Daher wird sie seit dem frühen Altertum auch Morgen- beziehungsweise Abendstern genannt. Die Venus weist, ähnlich dem Erdmond, Phasen auf. Das bedeutet, dass sie bisweilen nur als Sichel oder Halbvenus sichtbar ist. Dennoch leuchtet sie als hellstes Objekt am Himmel. Mit zunehmender Entfernung von der Sonne folgen der Reihe nach die Erde, sowie außerhalb der Erdbahn der Mars, die Riesenplaneten Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun, sowie der wiederum kleine, im Wesentlichen feste Pluto, der heute zu den Zwergplaneten gezählt

wird. Ein alter Merksatz für die Reihenfolge der Planeten, von der Sonne ausgehend, lautet:

*Mein Vater Erklärt Mir Jeden Sonntag Unsere Neun Planeten.
Merkur Venus Erde Mars Jupiter Saturn Uranus Neptun Pluto.*

Weitere sich bewegende, allerdings eher selten beobachtbare Objekte sind die Kometen. Dabei handelt es sich um kleinere Körper unseres Planetensystems von unterschiedlicher Zusammensetzung. Viele Kometen ähneln schmutzigen Eisbällen, die aus einer unser Planetensystem umgebenden Wolke interplanetarer Materie stammen – der sogenannten Oortschen Wolke. Kometen umlaufen die Sonne auf teilweise extrem elliptischen, fast parabolischen Bahnen und erscheinen daher nur in größeren Zeitabständen, die mehrere Jahrhunderte dauern können. „Hyperbolische Bahnen, also Objekte, die aus dem Weltraum in das Planetensystem eindringen, sind weder unter den Kometen noch unter den Meteoriten gefunden worden“ (A. Unsöld, 1967, S. 30). Solche aperiodischen Kometen können vermutlich nicht aus der Oortschen Wolke stammen, sondern von außerhalb des Planetensystems kommen und könnten nur ein einziges Mal um die Sonne laufen und niemals wiederkehren.

Kometen stammen aus der frühesten Zeit des Planetensystems und werden schätzungsweise ein Alter von 3 bis 5 Mrd. Jahre erreichen. Der Kopf eines Kometen besteht zum großen Teil aus Eispartikeln, die im Sonnenlicht verdampfen. Auf diese Weise wird der Kometenkopf mit jeder Sonnenumrundung kleiner. Der Halleysche Komet (Periode: 75,3 Jahre) ist Messungen von Satelliten (Giotto, 1986) zufolge etwa 16 km lang und 8 km dick. Sein Materieverlust beläuft sich auf 200 Tonnen pro Sekunde bei jeder Sonnenumrundung, das sind wenige Promille seiner Masse. Vermutlich kann er noch mehr als hundert Umläufe überstehen.

Die verdampfenden Partikel wiederum bilden einen mehr oder weniger ausgeprägten Schweif. Daher kommt auch der Name „Haarstern“ (griech. „Koma“: Haar). Der Kometenschweif ist um so deutlicher, je näher der Komet der Sonne kommt, zeigt jedoch stets von dieser weg: Beim Weg zur Sonne zieht der Komet seinen den Schweif hinter sich her, nach dem Passieren des sonnennächsten Punktes fliegt der Komet hingegen mit seinem Schweif voraus. Dies

ist nicht weiter erstaunlich, wenn man weiß, dass der interplanetare Raum quasi ein Hochvakuum ist, in dem die auf der Erde bekannten Reibungseffekte nicht auftreten, wohl aber der Sonnenwind den Schweif stets von der Sonne wegdrückt.

Jedesmal, wenn vagabundierende Kleinteile mit der Erde zusammenstoßen, werden sie beim Eintritt in die Atmosphäre – also in direkter Erdumgebung – durch die dort auftretende Reibung erhitzt und glühen mehr oder weniger hell leuchtend kurz auf.

Bei der häufig beobachtbaren Erscheinung von Sternschnuppen handelt es sich um unterschiedlich kleine Teilchen, die beim Eintritt in die Erdatmosphäre komplett verglühen. Dabei leuchten sie kurz auf und sind von der Erde aus als Sternschnuppen zu beobachten. Häufig treten solche Teilchen in Form eines Schwarms auf. Quert die Erde diesen Meteorschwarm regelmäßig auf ihrer Bahn, werden die entsprechend regelmäßig vorkommenden Häufungen von Sternschnuppen nach den Sternbildern benannt, in denen der Bereich der Querung liegt. Es gibt die Perseiden (sprich: Perse-iden), benannt nach dem Sternbild Perseus, die Leoniden (Sternbild Löwe) und noch rund zehn weitere Meteorströme, die die Erdbahn kreuzen.

Größere, langsamer verglühende Objekte, die einen helleren Streifen aufleuchten lassen, nennt man auch Feuerkugeln. Sind die ursprünglichen Teile so groß, dass sie in der Erdatmosphäre nicht ganz verglühen, dann kann ein Restkern sogar auf die Erde stürzen und wird dann Meteorit, im Fall besonders großer Masse Meteor genannt.

Die Erdatmosphäre fungiert also als Schutzhülle, die die Wahrscheinlichkeit eines Meteoreinschlages auf der Erde minimiert. Dies macht sich der Mensch auch zu Nutze: Reste von Trägerraketen und ausgediente Satelliten werden in ähnlicher Weise, meist kontrolliert, in der Atmosphäre zum Verglühen gebracht.

Manchmal lassen sich auch die direkt um die Erde laufenden künstlichen Satelliten beobachten, die in den Abendstunden noch von der Sonne angestrahlt leuchten. Zumeist umrunden sie die Erde in Höhen von wenigen 100 km innerhalb einer Umlaufzeit von ein bis zwei Stunden.

So umrundet etwa die internationale Raumstation ISS die Erde in 400 km Höhe in ungefähr eineinhalb Stunden. Ihr Weg über den Abendhimmel ist durch die rasche Bewegung meist gut erkenntlich.

Ebenfalls in den oberen Schichten der Erdatmosphäre entstehen die Polarlichter, die in Regionen höherer geografischer Breiten bei Dunkelheit und klarem Wetter häufig zu beobachten sind. Schnelle Teilchen des Sonnenwindes regen dabei Atome beziehungsweise Moleküle der äußeren Erdatmosphäre zum Leuchten in zumeist grünlichem Licht an. Daraus ergibt sich ein wilder Tanz schnell wechselnder Lichterscheinungen, die über den ganzen Himmel der Polregion fliegend ein beeindruckendes Schauspiel geben.

Dagegen ist das Zodiakallicht (Tierkreislicht) eine im Allgemeinen gering leuchtende, ruhige Erscheinung in der Dämmerung längs der Ekliptik (= die jährliche scheinbare Bahn der Sonne an der Himmelskugel), die die Helligkeit des Milchstraßenbandes erreichen kann und nur in Gegenden ohne Lichtsmog bei Einbruch der Nacht beobachtbar ist. „Das Zodiakallicht ist eine schwache Lichterscheinung, die sich in der Tierkreiszone hinzieht. [...] Es entsteht hauptsächlich durch Streuung des Sonnenlichts an Staubteilchen der interplanetaren Materie“ (A.Weigert/H.Zimmermann, 1962, S. 396).

Unser gesamtes Planetensystem wird von einem einzigen Stern beherrscht, der Sonne. Sie hält alle Objekte ihrer Umgebung, unseres Sonnensystems, zusammen. Die Sonne enthält praktisch die gesamte Masse des Sonnensystems, nämlich 99,86 % der gesamten Materie. Das heißt alle Planeten, Monde, Kometen und ähnliche Kleinkörper zusammengenommen haben nur 0,14 % der Gesamtmasse unseres Sonnensystems. 71 % von diesen restlichen 0,14 % macht die Masse von Jupiter aus, des größten Planeten unseres Sonnensystems. Für die Erde bleibt letztlich ein Anteil von drei Millionstel der Gesamtmasse des Sonnensystems.

Alle Objekte des Sonnensystems umrunden die Sonne gleichsinnig, das heißt gegen den Uhrzeigersinn, wenn man das Planetensystem vom Himmelsnordpol aus betrachtet. Die meisten Objekte drehen sich selbst im gleichen Drehsinn. Dies gilt für alle

Planeten mit Ausnahme der Venus, die im Uhrzeigersinn rotiert. Es gilt auch für Planeten, die sich vor dem Fixsternhimmel mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten bewegen, weshalb sie auch Wandelsterne heißen, aber auch für die Kometen, die sich auf teilweise sehr langgezogenen Ellipsenbahnen der Sonne meist nur selten nähern und nach rascher Umkehr wieder in den Weiten des Alls verschwinden. Dies gilt aber auch für alle Monde oder Trabanten, die um ihre Planeten kreisen und somit jeweils eigene Systeme darstellen.

Die meisten Planeten haben – im Gegensatz zur Erde – mehrere Monde, die sie umkreisen. So hat etwa der Riesenplanet Jupiter über 70 Monde, deren vier bekannteste, Io, Kallisto, Ganymed und Europa, bereits mit kleinen optischen Instrumenten gut zu beobachten sind. Da sie schon von Galileo Galilei (1564–1642) entdeckt wurden, werden sie die „Galileischen Monde“ des Jupiter genannt.

Jeder Planet bildet mit seinen Monden wiederum ein Kleinsystem, in dem die Monde um den Planeten kreisen und das ganze System die Sonne umrundet. So umläuft auch die Erde im Verbund mit ihrem Mond und begleitet von einem Schwarm künstlicher Satelliten die Sonne.

Dies sind im Wesentlichen alle Objekte und Erscheinungen, die wir von unserm Standpunkt Erde aus beobachten können. Heute ist es jedoch ein Leichtes, mit großen Teleskopen in die Tiefen des Universums zu blicken, sowie mit Radar- und Satellitentechnik weitere Fenster zur Informationsgewinnung zu öffnen, bis hin zu den Gravitationswellendetektoren, die jedes Zittern der Raumzeit „hören“ lassen.

Auch wenn es uns mittlerweile prinzipiell möglich ist, die Erde von außen zu sehen, so bleiben doch die meisten Menschen auf der Erde und können nur von ihrem irdischen Standpunkt aus wenige Teile des sichtbaren Universums beobachten. Die wirklichen Bewegungen lassen sich allerdings nur in wenigen Fällen direkt beobachten. Meistens müssen wir sie uns indirekt aus Berechnungen erschließen, die auf oft langjährige Beobachtungen und Messungen gegründet sind.

Es hat fast die ganze Menschheitsgeschichte gedauert, bis sich das heliozentrische Weltbild durchgesetzt hat. Das ist in der Tatsache begründet, dass in unserer Anschauung die Erde der Mittelpunkt aller beobachtbaren Himmelserscheinungen ist. Die Wahrnehmung aller Bewegungen auf der Himmelssphäre erfolgt vom Beobachterstandpunkt „Erdort“ aus. Wir sehen uns im Mittelpunkt stehend, um uns herum dreht sich der ganze Himmel: alle Gestirne gehen im Osten auf und im Westen unter. Sie verschwinden dort unter dem Horizont, um die angefangenen Bahnen zu vollenden. Die gesamte Fixsternsphäre mit allen Objekten dreht sich um uns – einmal in 24 Stunden und ein weiteres Mal im Lauf eines Jahres.

Unser Platz im Universum ist zudem ziemlich einsam: Die räumlichen Distanzen und die überschaubaren Zeiten sind so groß, dass die menschliche Vorstellungskraft nicht ausreicht, sie wirklich zu erfassen. Stellt man sich das Sonnensystem mit allen Planeten in der Größe eines Fußballfeldes vor, dann wären die nächsten Sonnen mehrere hundert Kilometer voneinander und von uns entfernt. Dazwischen ist praktisch nichts. Der interstellare Raum ist extrem dünn mit einzelnen Atomen oder auch Molekülen besetzt, das interstellare Gas wabert in Wolken unterschiedlicher Dichte zwischen den Sternen. „Die Dichte in diesen Wolken beträgt zehn Wasserstoffatome je cm^3 . Wahrscheinlich sind die Wolken in einem 100fach dünneren Medium eingebettet“ (A. Weigert, H. Zimmermann, 1962, S.129).

Die Welt unserer Erfahrung ist der Mesokosmos, ein winziger raumzeitlicher Bereich zwischen dem Mikrokosmos, der Welt der kleinsten Teilchen, aus denen unsere Materie aufgebaut ist, und dem Makrokosmos, der die größten Dimensionen des Universums umfasst. Die räumlichen Größenordnungen unserer Welt reichen über einen Bereich von etwa 46 Zehnerpotenzen: $10^{-20} \text{ m} < 1 < 10^{26} \text{ m}$. Die kleinste Zeiteinheit, die Planck-Zeit, ist $\Delta t_{\text{Pl}} = 5,4 \cdot 10^{-44} \text{ s}$. Die Zeitskala beginnt mit dem Urknall vor 13,82 Mrd. Jahren.

Exkurs Unser Universum

1. Erde-Mond-System: Abstand E-M: 384.400 km. Durchmesser (messbar) Erde (Äquator): $d_E = 12.756 \text{ km}$, Mond: $d_M = 3.474 \text{ km} \approx 1/4 d_E$ (0,27 d_E).

2. Sonnensystem: Sonne: $d_S \approx 108 d_E$ ($1,39 \cdot 10^6 \text{ km}$).

$A_{E-S} = 1 \text{ AE} \approx 1,5 \cdot 10^8 \text{ km}$

(Typ G2V -Stern, Hauptreihen-Zwergstern), Alter ≈ 5 Mrd. Jahre.

Die Sonne ist der einzige selbstleuchtende Körper des Sonnensystems.

Es gibt acht (neun) Planeten, viele Planetoiden und andere kleinere Objekte (Asteroidengürtel, Kuiper-Gürtel) sowie interplanetare Materie.

Planeten sind nicht selbstleuchtende Körper (reflektieren nur Sonnenlicht).

Fast alle Objekte des Systems umrunden gleichsinnig die Sonne in ungefähr einer Ebene geringer Dicke, deren Mittelebene die ekliptikale Ebene ist.

Der Durchmesser der kreisrunden „Planetenscheibe“ beträgt ca. 200 AE.

Interplanetarer Raum: Raum, der von der Sonne bis zur Grenze des Oortschen Gürtels reicht (Durchm. ca. 100.000 AE $\approx 1,5 \text{ Lj}$).

Der nächste Stern (Proxima Centauri) ist ca. 250.000 AE (4,24 Lj) entfernt.

3. Unser Sternsystem: Typ: scheibenförmige Spiralgalaxie (Durchmesser 100.000 Lj) aus ca. 10^{11} Sonnen (Sternen), Größe: $d_{\text{Gal}} \approx 150.000 \text{ Lj}$., zwei Begleitsysteme (Magellansche Wolken). Alle mit bloßem Auge sichtbaren Sterne gehören zu unserer Galaxie (Sonne im „Orion“-Arm, Abst.vom Zentrum: 25.000 Lj).

Im galaktischen Zentrum befindet sich ein Schwarzes Loch. Ein Umlauf der Sonne um das Zentrum dauert ca. $2,3 \cdot 10^8$ Jahre (galaktisches Jahr). Bisher haben ca. 25 Umrundungen der Sonne um das gal. Zentrum stattgefunden.

100 Kugelsternhaufen bilden Halo um die Milchstraßenscheibe.

Der Interstellare Raum ist von dünn verteilten Gaswolken durchzogen.

4. Die lokale Galaxien-Gruppe: auch: lokaler G-Haufen; ca. 100 kleinere und zwei große Galaxien (Andromeda- und Milchstraßen-Galaxie).

5. Galaxiencluster: mehrere Galaxienhaufen bilden weitere Cluster, mehrere Cluster bilden Super-Haufen.

Räumliche Dimensionen: Grenze des beobachtbaren Universums:

$14 \cdot 10^9 \text{ Lj} \approx 10^{26} \text{ m}$. Räumliche Größenordnungen unserer Welt:

$10^{-20} \text{ m} \quad \leftrightarrow \quad 1 \quad \leftrightarrow \quad 10^{26} \text{ Meter}$

Mikrokosmos (Atomkern 10^{-15} m) – *Mesokosmos* (Erde) – *Makrokosmos*

Zeitliche Dimensionen:

Alter	Universum	$13,8 \cdot 10^9 \text{ a}$	(ca. 13,8 Mrd. Jahre)
	Erde / Sonnensystem	$4,8 \cdot 10 \text{ a}$	(ca. 5 Mrd. Jahre)
	Menschheit	$5 \cdot 10^6 \text{ a}$	(ca. 5 Mio. Jahre)
	Kultur	$5 \cdot 10^4 \text{ a}$	(ca. 50.000 Jahre)
	High-Tech-Zeitalter	$5 \cdot 10 \text{ a}$	(ca. 50 Jahre)

2. Unser geozentrischer Blick

*Die Sonne tönt nach alter Weise
In Brudersphären Wettgesang,
Und ihre vorgeschriebne Reise
Vollendet sie mit Donnergang.*

*J. W. v. Goethe, Faust
(Prolog im Himmel)*

Die Vorstellung eines geozentrischen Weltbilds nimmt die Erde als ruhend an, und deutet den Lauf der Gestirne als Bewegung um die Erde. Die Erde ist der Mittelpunkt der Welt. Alle Gestirne drehen sich um uns. Das ist, was wir sehen.

Die Beobachtung des Nachthimmels zeigt, dass die gesamte Fixsternsphäre sich wie eine Hohlkugel um die Erde dreht, genauer um die Erdachse. Diese tägliche Bewegung der „Himmelskugel“ hat zur Folge, dass alle Sterne im Osten aufgehen, ihre Bahn kreisförmig über Süden nach Westen ziehen und im Westen untergehen, wie wir das auch von der Sonne her kennen, die im Osten aufgeht, über Süden bis zur Mittagslinie (Meridian) läuft, wo sie ihren höchsten Punkt erreicht, um dann im West zu versinken.

Wir beobachten zudem eine weitere scheinbare Drehung der Fixsternsphäre, weil sich die ganze Fixsternsphäre unabhängig von der täglichen Bewegung im Laufe eines Jahres wiederum von Ost nach West zu drehen scheint – nur eben wesentlich langsamer. So erscheinen im Laufe eines Jahres unterschiedliche Sternbilder. Man spricht deshalb von Sommer- oder Wintersternbildern und einem Herbst- beziehungsweise Frühlingssternenhimmel.

Der winterliche Himmel ist dominiert vom hellsten Stern der Fixsternsphäre, nämlich Sirius, dem Hauptstern im 'Großen Hund' (Canis major), dem Begleiter des Himmelsjägers Orion. Orion ist mit seinen berühmten drei Gürtelsternen das vielleicht schönste und bekannteste Wintersternbild. Der rötliche Schulterstern ist Beteigeuze, der hellere Fußstern heißt Rigel.