

DIE GROSSEN FRAGEN

Universum

Stuart Clark

Reihenherausgeber Simon Blackburn

Spektrum
AKADEMISCHER VERLAG
Sachbuch

Die großen Fragen Universum

Stuart Clark ist leitender Redakteur für Weltraumwissenschaft der European Space Agency (ESA) und Autor der erfolgreichen Sachbücher *The Sun Kings*, *Deep Space* und *Galaxy*. Er schreibt für *New Scientist*, *BBC Focus*, *The Times*, *Guardian* und *Economist*.

Die großen Fragen behandeln grundlegende Probleme und Konzepte in Wissenschaft und Philosophie, die Forscher und Denker seit jeher umtreiben. Anspruch der ambitionierten Reihe ist es, die Antworten auf diese Fragen darzustellen und damit die wichtigsten Gedanken der Menschheit in einzigartigen Übersichten zu bündeln.

Der Reihenherausgeber **Simon Blackburn** ist Professor für Philosophie an der Universität Cambridge, an der Universität von North Carolina und einer der angesehensten Philosophen unserer Zeit.

In der Reihe *Die großen Fragen*:

Philosophie

Physik

Universum

Mathematik

Stuart Clark

Die großen Fragen Universum

Reihenherausgeber Simon Blackburn

Aus dem Englischen übersetzt von Anna Schleiter

Spektrum
AKADEMISCHER VERLAG

Inhalt

Einführung	6
<hr/>	
Was ist das Universum?	8
Die immerwährende Frage nach dem, was uns umgibt	
<hr/>	
Wie groß ist das Universum?	18
Kosmologische Maßstäbe	
<hr/>	
Wie alt ist das Universum?	27
Die kosmische Alterskrise	
<hr/>	
Woraus sind die Sterne gemacht?	36
Das kosmische Kochrezept	
<hr/>	
Wie entstand die Erde?	46
Die Geburt unserer Heimat	
<hr/>	
Was hält die Planeten auf ihren Bahnen?	56
Und warum fällt der Mond nicht herunter?	
<hr/>	
Hatte Einstein recht?	66
Gravitation gegen Raumzeit-Krümmung	
<hr/>	
Was ist ein Schwarzes Loch?	77
Gefräßige Monster, verdampfende Nadelstiche und Wollknäuel	
<hr/>	
Wie ist das Universum entstanden?	87
Wie sah der Urknall aus?	
<hr/>	
Welche Himmelskörper erschienen zuerst?	96
Der Anfang des Universums, wie es uns vertraut ist	
<hr/>	

Was ist Dunkle Materie? Der Stoff, der das Universum zusammenhält	105
Was ist Dunkle Energie? Die geheimnisvollste Substanz des Universums	114
Sind wir Staub der Sterne? Das Geheimnis der Entstehung des Lebens	123
Gibt es Leben auf dem Mars? Unsere Chancen, kosmische Nachbarn zu entdecken	133
Gibt es andere vernunftbegabte Lebewesen? Ist da noch jemand?	142
Können wir durch Zeit und Raum reisen? Warp-Antriebe und Zeitreisen	152
Können sich die Naturgesetze ändern? Physik jenseits von Einstein	162
Gibt es viele Universen? Schrödingers Katze und was daraus folgt	170
Welches Schicksal erwartet das Universum? Kollaps, Endknall oder Kältetod?	181
Gibt es einen kosmologischen Gottesbeweis? Die lebensfreundliche Feinabstimmung des Universums	189
Glossar	200
Index	204

Einführung

Die Astronomie kennt nur „große“ Fragen. Selbst ein unscheinbarer Gedanke kann auf einen verzweigten Pfad der Untersuchung führen, der in eine grundsätzliche Antwort mündet – begleitet vielleicht von einer unfassbaren Erleuchtung –, was zweifellos wesentlich zur Attraktivität des Fachgebiets beiträgt. Die überwältigende Größe des Universums, das sich Milliarden von Lichtjahren weit durch den Raum und Milliarden von Jahren weit durch die Zeit erstreckt, und die unvorstellbar großen Zahlen, die man zu seiner Beschreibung braucht, sind gewissermaßen furchterregend.

Wenn Sie an einem wirklich dunklen Ort – in der Wüste oder einer anderen Wildnis ohne jedes Umgebungslicht – in den Himmel schauen, sehen Sie so viele Sterne, dass Sie Mühe haben, die vertrauten Sternbilder zu erkennen. Was Ihnen zahllos erscheint, sind allerdings nicht mehr als die 3000 Lichtpunkte, die das menschliche Auge unter günstigen Bedingungen am Firmament auflösen kann. Aber das ist nur ein winziger Bruchteil aller Sterne des Universums. Oft wird die Zahl der Sterne mit der Zahl der Sandkörner an allen Stränden der Erde verglichen, aber das reicht bei weitem nicht aus: Es gibt enorm viele Sandkörnchen auf der Erde, aber längst nicht so viele, wie es Sterne im Weltraum gibt. Letzte Schätzungen sprechen von 70 000 Millionen Millionen Millionen (70 Trilliarden, eine 7 mit 22 Nullen). Ungefähr diese Zahl von Sandkörnern findet sich an den Stränden von 10 000 erdähnlichen Planeten.

Anliegen dieses Buches ist es, Fragen zu beantworten, die sich viele Leute stellen, wenn sie über das Universum nachdenken. Es geht um exotische, nur wenig bekannte Himmelskörper wie Quasare und Pulsare ebenso wie um die großartigen Naherkundungen unserer Nachbarn im Sonnensystem wie Mars und Jupiter. Ein Kapitel beschäftigt sich mit den kosmischen „Superstars“, die ihr Geheimnis wahren, wie viel Zeit auch vergehen möge – den Schwarzen Löchern. Was ein Schwarzes Loch ist, will jeder wissen, der ungefähr so viel von Astronomie versteht wie ich. Erwarten Sie hier keine umfassende Antwort; selbst die Experten haben noch keine. Schwarze Löcher ziehen die Fachleute deshalb so sehr in ihren Bann, weil man sich verspricht, aus ihrer Natur – wenn sie denn einmal aufgeklärt sein wird – ein neues Verständnis des Universums insgesamt ableiten zu können.

Unter den 19 anderen hier diskutierten Fragen gibt es einige, die nach Jahrhunderten der Forschung definitiv beantwortet werden können; einige scheinen einer Antwort verlockend nahe zu sein; bei anderen wiederum versuchen die Forscher verzweifelt, auch nur den Zipfel einer Antwort zu fassen zu bekommen. Vermutlich sind diese ungelösten Probleme die fesselndsten, weil sie den Fortgang der modernen Astronomie und Kosmologie bestimmen. Ungeachtet von unserem derzeitigen Wissensstand berührt jede der 20 „großen Fragen“ einen Stein des Fundaments, auf dem unsere Wahrnehmung des Universums ruht und unsere Bemühungen, unseren eigenen Platz in seinen unermesslichen Weiten auszumachen, fußen. Jede Frage hat auch etwas von diesem ganz besonderen Zauber, den wir alle fühlen, wenn wir über das Weltall nachdenken.

Was ist das Universum?

Die immerwährende Frage nach dem,
was uns umgibt

Das „Universum“ ist einfach alles: alle Planeten, alle Sterne, alle Galaxien. Seine Ausdehnung übersteigt das menschliche Vorstellungsvermögen – was den Menschen niemals davon abhielt, es durchschauen zu wollen. Generationen um Generationen blickten zum Himmel, vermaßen, was auch immer zu sehen war, ergündeten und begründeten ... in der Hoffnung, eines Tages wirklich verstehen zu können. Manchen bedeutenden Schritt haben wir so getan; damit wir uns aber nicht allzu sehr im Lichte unserer Errungenschaften sonnen, hält das Universum immer wieder neue Überraschungen für uns bereit, neue Herausforderungen, um unsere Fantasie auf die Probe zu stellen.

Schon unsere Vorfahren wollten das Weltall begreifen. Auf babylonischen Steintafeln, angefertigt zwischen 3500 und 3000 v. Chr., ist die Veränderung der Tageslänge im Lauf des Jahres verzeichnet. Aus China stammen 3000 Jahre alte Berichte über Sonnenfinsternisse. Überall auf der Welt finden sich Überreste prähistorischer Bauwerke, deren astronomische Ausrichtung kaum zu übersehen ist. Das älteste Relikt dieser Art ist eine 5200 Jahre alte Begräbnisstätte in Newgrange (Irland): Exakt am Tag der Wintersonnenwende, dem kürzesten Tag des Jahres, fällt dort die aufgehende Sonne durch eine Öffnung auf den Boden der inneren Grabkammer.

Von den hunderten rätselhaften Steinskulpturen der Osterinsel blicken sieben in Richtung des Sonnenuntergangs zur Tag-und-Nacht-Gleiche. Forscher vermuten, dass der große Tempel Angkor Wat in Kambodscha so ausgerichtet ist, dass die Sonne zur Sommersonnenwende über dem Osttor aufgeht. Die ägyptischen Pyramiden sollen am Stand der Sterne orientiert sein. Keines der genannten Bauwerke war als „Sternwarte“, als Observatorium im wissenschaftlichen Sinn, ge-

dacht, aber sie alle beweisen, dass ihre Erbauer sehr wohl über die Bewegung der Himmelskörper Bescheid wussten.

Aus den frühesten astronomischen Beobachtungen entwickelten unsere Ahnen sehr wahrscheinlich den Kalender. Die Mondphasen legten die Dauer eines Monats fest, die Wanderung der Sonne über den Himmel definierte die Länge eines Tages und eines Jahres. Im Jahreslauf verschieben sich die Punkte des Sonnenauf- und -untergangs entlang des Horizonts. Bekannt ist die Ausrichtung des gut erhaltenen Steinkreises von Stonehenge (bei Salisbury im Süden Englands) nach der Sonne: Zur Sommersonnenwende geht die Sonne über einem einzeln stehenden Monolithen, dem „Heel-Stein“, auf. Ursprünglich hielt man Stonehenge für einen urzeitlichen Tempel des Sonnengottes. Nachdem Forscher aber weitere Beziehungen zwischen den Positionen der Steine und dem Stand von Himmelskörpern (besonders des Mondes) festgestellt haben, vermutet man in der Anlage eher ein prähistorisches Observatorium, das etwa zur Vorhersage von Finsternissen gedient haben mag.

Frühe Kosmologie

Das griechische Wort *kosmos*, von dem sich auch der Terminus *Kosmologie* ableitet, bedeutet „geordnetes Ganzes“. Gegenstand der Kosmologie als Teilgebiet der Astronomie ist die Frage aller Fragen: Was ist das Universum? Dazu untersuchen die Kosmologen, wie sich das All heute verhält, wie es seinen Anfang genommen haben könnte und wie es irgendwann enden wird.

Als wissenschaftliche Disziplin kann die Kosmologie erst seit 1916 gelten, als Albert Einstein die Allgemeine Relativitätstheorie veröffentlichte (► *Hatte Einstein recht?*). Bis zu diesem Zeitpunkt fehlte den Astronomen ein geeignetes mathematisches Gerüst, um die Phänomene des Alls zu beschreiben, weshalb sie sich im unbehaglichen Labyrinth von Spekulation und religiösen Befindlichkeiten verloren. Insbesondere die antike Kosmologie war vom Glauben inspiriert und der Vorstellung, dass über unseren Köpfen, im Weltraum, der „Himmel“, die Wohnung der Gottheiten, existiert.

Die Ägypter orientierten ihre Kosmologie am Reproduktionszyklus des Menschen. Die Himmelsgöttin Nut, so glaubten sie, bringt Jahr für Jahr den Sonnengott Ra zur Welt, und die jahreszeitlich wechselnde

Höhe des Sonnenstandes sahen sie als Ausdruck der Schwangerschaft von Nuts sternübersätem Körper. Stets zur Wintersonnenwende wurde Ra neu geboren, um bei Frühlingsanfang durch Nuts Mund in ihren Leib zurückzukehren. So erschuf sich Ra immer wieder selbst – Ausdruck des Universums als ewiger, sich selbst erhaltender Ort allen Seins.

Frühe Zivilisationen verbanden die Sterne in ihrer Fantasie zu Bildern mythischer Gestalten, über die sie sich Geschichten erzählten. Im Zweistromland, das heute zum Irak gehört, gruben Archäologen Stein-

Die Astronomie zwingt die Seele, aufwärts zu schauen, und führt uns von dieser Welt in eine andere.

PLATO, GRIECHISCHER PHILOSOPH,
4. JAHRHUNDERT V. CHR.

tafeln und Tonplättchen aus der Zeit um 1300 v. Chr. aus, auf denen viele solche „Sternbilder“ beschrieben sind, darunter auch die zwölf Tierkreiszeichen, denen man besondere Bedeutung beimaß, denn sie werden von der Sonne durchlaufen. Die Griechen übernahmen die Sternbilder; den assyrischen „Landmann“ deuteten sie um zum „Widder“, die „Schwalbe“ zu den „Fischen“, in der „Seebarbe“ und den „Großen Zwillingen“ sahen sie „Einhorn“ und „Zwillinge“. Fahrende Spielleute, die im antiken Griechenland von Stadt zu Stadt wanderten, erzählten die Legenden gegen Kost und Logis weiter. Die Philosophen hingegen versuchten, sich ihren eigenen, nicht weniger phantasievollen Reim auf die Natur des Alls zu machen. Einer der ersten Denker dieser Art war Thales von Milet (6. Jahrhundert v. Chr.), der sich das Universum als wassergefüllten Raum vorstellte, in dem die Erde schwimmt; Erdbeben, so dachte er, werden von Wasserwellen verursacht, und die Sterne bewegen sich langsam, weil sie von sanfteren Strömungen getragen werden.

Von dem griechischen Astronomen Claudius Ptolemäus, der im 1. Jahrhundert n. Chr. lebte, ist eine Liste von 48 Sternbildern überliefert. Da aber von Griechenland aus nicht der gesamte Himmel zu überblicken ist, blieb die Umgebung des Südpols unkartiert, bis unerschrockene Astronomen im 16. und 17. Jahrhundert von Europa aus weite Reisen unternahmen, um die weißen Flecken am Himmel zu füllen. Auch in die Lücken von Ptolemäus' klassischer Karte schoben sich neue Sternbilder. Niemanden überrascht, dass die Astronomen dabei regelmäßig in Streit gerieten. Der Brite Edmond Halley schlug ein Sternbild namens Robur Carolinum („König Karls Eiche“) vor zur Erinnerung an den Baum, in dem sich Karl II. nach der Schlacht von

Worcester vor den Parlamentsanhängern, den „Rundköpfen“, versteckt hatte. Während sich der König geehrt fühlte, waren einige von Halleys Kollegen weniger begeistert, weshalb sie es vorzogen, das Sternbild stillschweigend aus ihren Karten zu löschen.

Viele Jahre später, 1922, legte die Internationale Astronomische Union (IAU) 88 Sternbilder einschließlich ihrer Begrenzungen verbindlich fest, wobei sie sich vornehmlich am griechischen Vorbild orientierte. Auch andere Aspekte der griechischen Astronomie haben bis in die Gegenwart überdauert, insbesondere die Leistungen eines Griechen, der keine Lust hatte, Legenden zu erzählen oder zu spekulieren, sondern die Wahrheit in der Messung sah: Hipparchus von Samos. Sein Klassifikationssystem für Sterne wird heute noch verwendet.

Die Helligkeit der Sterne

Schon bei einem flüchtigen Blick zum Nachthimmel fällt dem Beobachter auf, dass manche Sterne heller sind als andere. Vor über 2000 Jahren erfasste Hipparchus akribisch 850 Sterne in einem Katalog, der neben der Position auch Angaben zur relativen Helligkeit umfasste. Weil er noch nicht über ein Instrument zur Messung der Helligkeit verfügte, verließ er sich auf seine Augen. Die hellsten Sterne ordnete er in die erste Größenklasse ein, die schwächsten in die sechste, der Rest lag irgendwo dazwischen. Erstaunlicherweise greifen die Astronomen noch immer auf dieses scheinbar grobe System zurück, wobei die modernen Messgeräte zur Einrichtung weiterer Größenklassen (angegeben als „Magnitude“, mag) führten. Jenseits der ersten Größenklasse gibt es jetzt auch negative Magnituden, jenseits der sechsten Größenklasse finden sich Sterne, die nur mithilfe von Teleskopen sichtbar sind. Erdgebundene Teleskope können Sterne bis zu 24–27 mag erfassen; Weltraumteleskope wie das Hubble-Teleskop, deren Bild nicht von den Einflüssen der Erdatmosphäre gestört wird, können noch Sterne von 30 mag „sehen“. Die Zunahme der Größenklasse um eine Magnitude bedeutet die Abnahme der scheinbaren Helligkeit um etwa das Zweieinhalbfache. Ein Stern in der 30. Größenklasse ist folglich rund 3,5 Milliarden Mal schwächer, als man mit bloßem Auge noch sehen könnte.

Bisher ging es allerdings um die Helligkeit, die ein Betrachter von der Erde aus wahrnimmt. Nicht vergessen darf man, dass diese schein-

bare Helligkeit nicht nur von der absoluten Helligkeit des Himmelskörpers (also dem Licht, das er abstrahlt) abhängt, sondern außerdem von seiner Entfernung von der Erde. Ein nahegelegener, schwach leuchtender Stern kann uns also heller erscheinen als ein sehr lichtstarkes, aber weit entferntes Objekt. Dieses Verhalten beschreibt ein sogenanntes „quadratisches Abstandsgesetz“: Bei doppeltem Abstand fällt die Lichtintensität auf ein Viertel, bei dreifachem Abstand auf ein Neuntel des Ausgangswerts. Aus diesem Grund sprechen wir ausdrücklich von „scheinbarer“ Helligkeit, wenn wir die unkorrigierte Helligkeit eines Sterns meinen. Die „absolute“ Helligkeit dagegen ergibt sich erst durch eine Entfernungskorrektur. Der rote Stern Beteigeuze hat eine scheinbare Helligkeit von 0,58, während seine absolute Helligkeit bei immerhin $-5,14$ liegt – ein wirklich leuchtkräftiger Stern also, nur vergleichsweise weit von der Erde entfernt. Die Sonne hingegen ist das hellste Objekt am Firmament mit einer riesengroßen scheinbaren Helligkeit von $-26,7$, die bei Entfernungskorrektur auf bescheidene 4,8 Größenklassen absoluter Helligkeit schwindet. Anders ausgedrückt: Die strahlende Sonne, Triebkraft des Lebens auf der Erde, ist ein ziemlich gewöhnlicher Stern.

Unter wandernden Sternen

Die Astronomen im antiken Griechenland haben uns als leidenschaftlich exakte Beobachter und unermüdliche Chronisten ein reiches Erbe von Wissen über den Sternenhimmel hinterlassen. Die wahre Natur von fünf besonderen Sternen jedoch entzog sich ihrem Scharfsinn. Sie nannten sie *planetes*, „Wanderer“, weil sie Nacht für Nacht vor dem Hintergrund aller anderen, ortsfest bleibenden Sterne über den Himmel ziehen. Der griechische Name hat Sie vermutlich schon auf die richtige Spur gebracht: Es geht um Wandersterne, die Planeten, insbesondere die fünf erdnächsten Planeten (Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn), die man mit bloßem Auge erkennen kann. Die Griechen konnten nicht ahnen, dass sie alle eigene Welten sind; stattdessen dachten sie an Götter oder wenigstens an Götterboten, deren Wirken die Geschicke der Menschen beeinflussen sollte.

Zwei dieser wandernden Sterne, Merkur und Venus, ziehen ihre Bahn zwischen Erde und Sonne. Von der Erde aus gesehen, befinden sie sich daher stets in Sonnennähe und sind nur in der Dämmerung zu

beobachten. Mars, Jupiter und Saturn dagegen umrunden die Sonne jenseits der Erdbahn und scheinen deshalb langsam über den Nachthimmel zu ziehen. Viele frühe Astronomen gingen völlig in der Aufgabe auf, die Bahnen der Wandelsterne zu berechnen, um ihre Positionen in der Zukunft vorhersagen zu können. Der Stellung der Planeten zueinander maß man große Bedeutung bei, denn man glaubte, bei entsprechender Nähe könnten sich die Einflüsse der Himmelskörper überlagern und verstärken. Sogenannte Konjunktionen waren wichtige Ereignisse, die vorausberechnet werden mussten, um Horoskope erstellen zu können.

Mit dem Siegeszug des Christentums in Europa setzte sich allgemein die Ansicht durch, die Bewegungen der Himmelskörper würden immer und prinzipiell geheimnisvoll bleiben: Der Himmel war Gottes Reich, und der schwache menschliche Geist konnte Seinen allmächtigen Willen niemals durchschauen. Ins Wanken gerieten diese Grundsätze in den ersten Jahrzehnten des 17. Jahrhundert, als Johannes Kepler die Bewegung der Planeten in drei mathematischen Formeln zusammenfasste (► *Was hält die Planeten auf ihren Bahnen?*). Damit war bewiesen: Das Universum konnte nicht nur vermessen, sondern auch verstanden werden.

Etwa zur gleichen Zeit lenkte Galileo Galilei in Italien seine – und unsere – Blicke auf die unermesslichen Weiten des Alls. Er richtete 1609 sein Fernrohr auf das verschwommene Lichtband, das sich quer übers Firmament zieht, die Milchstraße. Sein primitives, nach heutigen Maßstäben winziges Teleskop zeigte ihm immerhin, dass die Milchstraße aus Abertausenden schwach leuchtenden Sternen besteht. Das war in der Tat eine Offenbarung, hatte man doch bis dato angenommen, im Universum gebe es nichts über das hinaus, was man mit bloßem Auge sieht. Galilei bewies, dass da noch viel mehr ist. Damit nahm die jahrhundertelange, bis heute nicht versiegte Faszination der Astronomen für immer größere Teleskope, mit denen immer schwächere Objekte erkennbar sind, ihren Anfang. Die größten optischen Teleskope haben inzwischen Durchmesser von zehn Metern, 500-mal mehr als Galileis historisches Instrument.

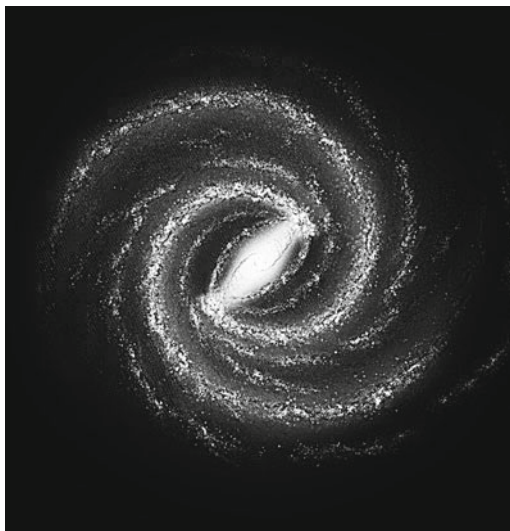
Himmlische Nachbarn

Heute wissen wir, dass die Sonne nur ein Stern in einer großen Ansammlung von Sternen ist: Unsere Galaxie, die Milchstraße, umfasst mindestens 100 Milliarden Sterne, die als gigantisches, spiralförmiges Rad eine gewölbte Nabe umkreisen, die noch mehr Sterne enthält. Von unserer Position in einem Arm der Spirale aus erscheint uns das Milchstraßensystem als milchig-heller Schleier, bestehend aus Myriaden von Lichtpunkten. Ihr Zentrum liegt in Richtung Sonne, im Sternbild Schütze (Sagittarius). Wenn Sie Gelegenheit haben, an einem dunklen Ort auf der Südhalbkugel zum Nachthimmel zu schauen, können Sie vielleicht erkennen, wie sich das Band der Milchstraße zu den ausgedehnten Sternwolken des Zentralbereichs erweitert.

Die Dicke der Scheibe unserer Galaxie wird auf 1000 Lichtjahre geschätzt. Ein Lichtjahr ist die Entfernung, die Licht im Laufe eines Jahres zurücklegt; Labormessungen zufolge sind das im Vakuum rund 9,5 Billionen Kilometer, also pro Sekunde etwa 300 000 Kilometer. Entfernungen in Lichtjahren anzugeben, lässt die schier überwältigenden kosmischen Dimensionen etwas handhabbarer werden. In der galaktischen Scheibe beträgt der Abstand zwischen zwei benachbarten Sternen durchschnittlich vier Lichtjahre, aber im Zentralbereich, rund

25 000–30 000 Lichtjahre von der Sonne entfernt, sind die Sterne viel dichter gepackt. Dort ballen sie sich zu einer Wölbung („Bulge“) mit einem Durchmesser von rund 27 000 und einer Höhe von rund 10 000 Lichtjahren.

Die Sonne verfügt über 33 unmittelbare galaktische Nachbarn. (Unter „Nachbarschaft“ verstehen die Astronomen Entfernungen von weniger als 12,5 Lichtjahren.) Mehrheitlich handelt es sich dabei um kleinere, schwächere Sterne als die



Unsere Heimat, die Milchstraße

Sonne selbst. Diese „Roten Zwerge“, die „kleinen Fische“ des kosmischen Ozeans (► *Wie alt ist das Universum?*), bilden die größte Gruppe von Sternen im Universum. Gerade einmal zwei Nachbarn sind ähnlich groß wie die Sonne, und nur einer ist größer: Prokyon im Sternbild Kleiner Hund (Canis Minor) wird auf den doppelten Durchmesser und die anderthalbfache Masse unserer Sonne geschätzt.

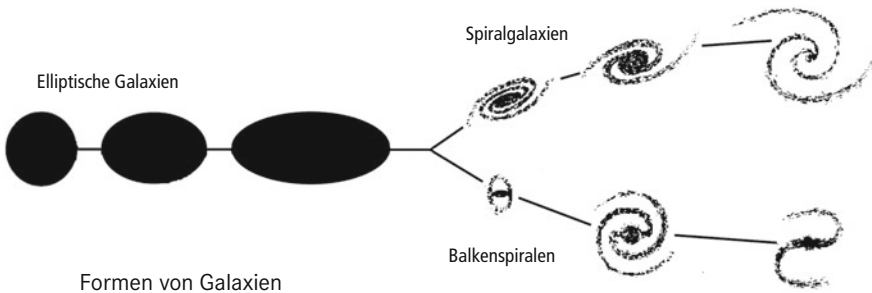
Tief drinnen im Zentralbereich ist die Sternendichte 500-mal größer als in unserer abgelegenen galaktischen Heimatregion. Könnten wir die Sonne mit all ihren Planeten mitten in den Bulge verschieben, dann könnten wir Sterne (vielleicht mit eigenen Planetensystemen) sehen, die gerade zehnmal so weit von der Erde entfernt wären wie Pluto. (In Wirklichkeit ist unser nächster Nachbarstern über 5000-mal so weit entfernt wie Pluto!) Astronomen vermuten, dass direkt im Zentrum der Galaxis die Materie so dicht ist, dass dort ein Schwarzes Loch existiert (► *Was ist ein Schwarzes Loch?*).

Die Milchstraße ist nichts anderes als eine Anhäufung unzähliger Sterne, angeordnet in Klumpen.

GALILEO GALILEI, ASTRONOM,
17. JAHRHUNDERT

Und jenseits der Milchstraße?

Die Milchstraße macht, mag sie auch unermesslich groß erscheinen, keineswegs das gesamte Universum aus. Von Ferne betrachtet, wirkt sie wie eine kleine Insel unter vielen anderen Inseln in einem riesigen Meer. Jede solche Insel ist eine Galaxie für sich und besteht aus einigen Millionen bis zu einer einer Billion Sternen. Man unterscheidet grundsätzlich drei Formen von Galaxien: Spiralen, Balkenspiralen und Ellipsen. Besonders schön anzusehen sind die Spiralgalaxien mit ihren weit ausgreifenden Armen aus jungen, hellen Sternen, die sich um eine Nabe aus älteren Sternen winden. Bei den Balkenspiralen, zu denen die Milchstraße zählt, erkennt man einen Streifen aus Sternen, der die Spiralarme mit dem Zentralbereich verbindet. Ganz anderes sehen die elliptischen Galaxien aus; manche strecken sich lang wie Zigarren, andere sind vollkommen kugelförmig, und sie können wesentlich größer sein als die spiralförmigen Vertreter. Natürlich gibt es eine Reihe von Ausreißern, die nicht in dieses Schema passen und als „irreguläre“ Galaxien bezeichnet werden. Manche von ihnen könnten sich aus Spiralen entwickelt haben, einige sehen aber auch völlig chaotisch aus.



Zählt man nur die hellen und großen Galaxien, so gehören drei Viertel aller Sterne zu Spiralen und Balkenspiralen. Allerdings gibt es Unmengen kleiner elliptischer und irregulärer Galaxien, sogenannte Zwerggalaxien; rechnet man die Zwerggalaxien ein, so kehrt sich das Verhältnis um, weil es nur wenige derart winzige Spiralen gibt.

Die meisten Galaxien ziehen für sich allein ihre Bahn durchs All. Manchmal zieht die Gravitation aber auch mehrere von ihnen zusammen. Kleinere solcher Ansammlungen mit weniger als 50 Galaxien nennt man Gruppe. Die Milchstraße gehört zur „Lokalen Gruppe“, die neben einer größeren Galaxie, der Andromeda, noch etwa 30 kleinere Galaxien umfasst. Galaxienhaufen dagegen bestehen aus mehr als 50, in manchen Fällen bis über 1000 einzelnen Galaxien. Der Lokalen Gruppe am nächsten sind der Virgo-Haufen (ca. 1300 Galaxien), der Koma-Haufen (über 1000) und der Herkules-Haufen (ca. 100).

Die Gruppen und Haufen sind darüber hinaus zu großräumigen Strukturen organisiert, den „Superhaufen“ (oft auch als „Supercluster“ bezeichnet), die im Universum entlang gigantischer Bahnen oder „Mauern“, sogenannter Filamente, aufgereiht sind. Offenbar umschließen diese Filamente gigantische Bereiche des Raums, in denen sich fast gar nichts befindet. Wenn man diese Leerräume als „Objekte“ klassifiziert, sind es die größten Himmelsobjekte überhaupt. Um sich die Verteilung der Galaxien im All zu veranschaulichen, denken Sie an Schaum in der Badewanne: Die Galaxien sitzen auf den Seifenhäutchen, die die leeren Blasen umschließen.

Die geschätzte Anzahl der Galaxien im Universum wird Jahr für Jahr nach oben korrigiert. 1999 gingen die Forscher, gestützt auf Aufnahmen des Hubble-Weltraumteleskops, noch von ungefähr 125 Milliarden Galaxien aus. Als das Hubble-Teleskop kurz darauf mit einer

neuen Kamera ausgerüstet wurde, verdoppelten sie die Zahl. Simulationen mit Supercomputern laufen heute auf bis zu 500 Milliarden (500 000 Millionen) Galaxien hinaus, die das All bevölkern.

Ausgerüstet mit seinen fünf Sinnen, erkundet der Mensch das Universum, das ihn umgibt, und dieses Abenteuer nennt er Wissenschaft.

EDWIN HUBBLE, KOSMOLOGE,
20. JAHRHUNDERT

Ein Blick in die Vergangenheit

Um die Herkunft all dieser Galaxien und damit die zeitliche Entwicklung des Universums zu klären, nutzen die Kosmologen die Tatsache aus, dass sich Licht nicht unendlich schnell (instantan) durch den Raum ausbreitet. So schnell sich das Licht, verglichen mit anderen alltäglichen Phänomenen, auch fortpflanzt (in einer Sekunde kann ein Lichtstrahl siebenmal den Äquator umrunden), um die ungeheuren Entfernungen zwischen Himmelskörpern zurückzulegen, braucht es gleichwohl viele Jahre. Licht von einem Stern, der 100 Lichtjahre von uns entfernt ist, reist 100 Jahre durch das All bis zur Erde. Das bedeutet, wir sehen den Stern nicht, wie er heute aussieht, sondern wie er vor 100 Jahren aussah, als sein Licht sich auf den Weg zu uns machte. Eigentlich blicken wir also rückwärts, in die Vergangenheit, wenn wir in den Nachthimmel sehen, wie ein Archäologe, der Schicht um Schicht abträgt, um zu immer älteren Fossilien vorzustoßen: Je weiter hinaus der Astronom schaut, umso älter sind die Himmelskörper, die er entdeckt. Mit modernen Teleskopen lassen sich Objekte aufspüren, die ihr Licht vor Jahrmilliarden in den Weltraum geschickt haben, und nachverfolgen, wie sie sich zu dem entwickelt haben, was wir heute um uns herum sehen. Willkommen im Reich der Kosmologie!

Wie groß ist das Universum?

Kosmologische Maßstäbe

Stellen Sie sich vor, der Abstand zwischen Sonne und Pluto wäre so lang wie ein Fußballfeld. Dann wäre die Sonne eine Kugel mit einem Durchmesser von zwei Zentimetern. Die Erde, 2,3 Meter von ihr entfernt, hätte gerade Stecknadelkopfgröße. Pluto, am anderen Ende des Fußballfelds, wäre nicht mehr als ein Staubkorn. Wo fänden Sie den nächstliegenden Stern? Im Zuschauerblock? Auf dem Parkplatz? Eine Straßenecke weiter? Irrtum. Bis zum nächsten Stern müssten Sie 645 Kilometer weit laufen. Im kosmischen Maßstab ist das nichts.

Das Vorhaben, das Universum abzumessen, ist in der Geschichte der Messkunst ohne Beispiel. Auf der Erde kann man eine Entfernung in Schritten messen oder die Technik (Radar, Laserstrahl) dafür einspannen. In den Weiten des Weltraums versagen diese Methoden; die Abstände sind einfach zu groß. Laserstrahlen oder Radarbündel kann man gerade noch am Mond und den erdnächsten Planeten reflektieren. Um auch mit den Tiefen des Universums umgehen zu können, haben die Astronomen ein ausgefeiltes Netz verschiedener Methoden zusammengestellt, die „kosmische Entfernungseiter“. Die Vielfalt ist nötig, weil jedes einzelne Verfahren nur für einen bestimmten Ausschnitt aus der Entfernungsskala sinnvolle Ergebnisse liefert. Manche Himmelskörper leuchten so schwach, dass man sie aus großer Entfernung nicht sehen kann; andere wiederum sind so selten, dass man sie nicht in der Nähe der Erde findet. Überall dort, wo sich mehrere Verfahren für denselben Skalenausschnitt eignen, kann man sie nutzen, um die Ergebnisse zu sichern oder zu verfeinern.

Standardkerzen

Ein wichtiger Baustein der kosmischen Entfernungsleiter ist das Konzept der Standardkerze. Es handelt sich dabei um Himmelskörper, die stets die gleiche Energiemenge abstrahlen, wo auch immer im Universum sie sich befinden mögen. Das bedeutet, es hängt nur von ihrem Abstand zur Erde ab, wie hell wir sie wahrnehmen. Zu den besten Standardkerzen gehören die Cepheiden, eine Gruppe veränderlicher Sterne. Der erste jemals beobachtete derartige Stern, Delta Cephei, zog 1784 die Aufmerksamkeit eines jungen Astronomen auf sich: John Goodricke von York kartierte die Helligkeitsschwankungen und stellte fest, dass ein ganzer Schwankungszyklus 128 Stunden und 45 Minuten dauerte. Zu dieser Zeit waren bereits einige andere Veränderliche bekannt, deren Helligkeit aber schlagartig abfällt und nach einiger Zeit wieder zunimmt. Nur bei Delta Cephei ging die Veränderung allmählich vonstatten.

*Messen, was messbar ist
– messbar machen, was
nicht messbar ist.*

GALILEO GALILEI, ASTRONOM,
17. JAHRHUNDERT

Bis das erste Jahrzehnt des 20. Jahrhunderts vergangen war, hatte man noch viele andere Cepheiden beobachtet; manche pulsierten schneller, andere langsamer. Henrietta Swan Leavitt, Assistentin am Harvard College Observatory, legte eine Liste aller 16 in der Kleinen Magellan'schen Wolke (einer nahegelegenen Galaxie) bekannten Cepheiden in der Reihenfolge ihrer Pulsationsperiode an und stellte überrascht fest, dass sie sie damit gleichzeitig nach ihrer mittleren Helligkeit geordnet hatte: Je heller der Stern, desto länger die Periode der Helligkeitsschwankung. 1912 hatte Leavitt ihrer Liste weitere neun Cepheiden der Kleinen Magellan'schen Wolke hinzugefügt, die sich alle nahtlos in die Ordnung einfügten. So kam man auf die Idee, Cepheiden als Standardkerzen zu verwenden.

Dass diese Überlegung sinnvoll war, bestätigte der britische Astrophysiker Stanley Eddington mit seiner Erklärung des Verhaltens der Pulsationsveränderlichen. Die Oberfläche der Cepheiden, argumentierte Eddington, hält offenbar einen Teil der abgestrahlten Energie zurück. Dadurch schwillt der Stern vorübergehend an, bis er die Energie freisetzt und wieder schrumpft. Eddington konnte überdies nachweisen, dass die Pulsationsperiode von der Dichte des Sterns abhängt. Das bedeutet: Alle Cepheiden mit einer Pulsationsperiode von, sagen wir, fünfeinhalb Tagen müssen einander gleichen. Das Verhältnis ihrer

scheinbaren Helligkeiten spiegelt deshalb unmittelbar das Verhältnis ihrer Entfernungen von der Erde wider. Der Vergleich der scheinbaren Helligkeiten von Cepheiden in verschiedenen Galaxien gehört zu den Standardmethoden der kosmischen Entfernungsmessung.

Hellere Standardkerzen als die Cepheiden sind explodierende Sterne, insbesondere Supernovae vom Typ Ia. Die Katastrophe nimmt ihren Lauf, wenn der ausgebrannte Zentralbereich eines Sterns Gas von einem nahegelegenen, aktiven Stern absaugt. Dieses Gas sammelt sich an der Oberfläche des toten Sterns an, dessen Masse dadurch immer weiter zunimmt. Überschreitet sie einen bestimmten Wert, die Chandrasekhar-Grenze (benannt nach dem indischen Physiker Subrahmanyan Chandrasekhar, der ihren Zahlenwert berechnet hat), dann kollabiert der Stern, dem Druck seiner eigenen Masse nachgebend, wobei eine gigantische Explosion auslöst. Weil jede Ia-Supernova vom Kollaps eines Sterns an der Chandrasekhar-Grenze ausgelöst wird, ist die dabei in den Raum geschleuderte Energiemenge stets gleich. Eine Supernova ist sehr viel heller als ein pulsationsveränderlicher Stern; sie kann 100 Milliarden „normale“ Sterne zusammengenommen überstrahlen und quer durchs ganze Universum sichtbar sein. Nachteil dieser Methode ist, dass sich Supernovae nicht vorhersagen lassen. Welcher Stern zum Tod verurteilt ist, sehen die Astronomen erst, wenn die Explosion bereits stattfindet. Statistisch ist in jeder Galaxie einmal in hundert Jahren mit einer Ia-Supernova zu rechnen. Für die Astronomen bedeutet das: Stets wachsam sein!

Wenn eine Ia-Supernova gesichtet wird, kann man die Entfernung ihrer Heimatgalaxie im Verhältnis zu jeder anderen Galaxie berechnen, in der bereits eine ähnliche Supernova beobachtet wurde. Analog gilt das für die Cepheiden. Um diese beiden Sprossen der kosmischen Entfernungsleiter zusammenzufügen, müssen die Astronomen also eine Supernova in einer Galaxie entdecken, in der bereits ein Pulsationsveränderlicher bekannt ist. Je größer die Zahl der Galaxien ist, auf die dies zutrifft, umso akkurater wird die Verknüpfung. Beide Methoden verraten uns aber nur relative Entfernungen – zum Beispiel, dass Himmelskörper A zehnmal so weit entfernt ist wie Galaxie B. Natürlich geht es den Astronomen eigentlich darum, die tatsächliche Entfernung von der Erde in Kilometern herauszufinden. Dazu müssen sie der Entfernungsleiter eine solide Basis geben, eine erste Sprosse sozusagen, die einem absolut messbaren Abstand entspricht. Zum Glück gibt es auch dafür eine Methode: die Parallaxenmessung.