

Die Vorstellung, ein Nachfahre von Flöhen zu sein, mag schon nicht ganz befriedigen, aber vielleicht ist ein noch verwerflicherer Aspekt dieser Geschichte, dass sie die offensichtliche Frage nicht behandelt: „Woher ist das schwarze Ei überhaupt gekommen?“ Ähnliche Fragen stellen sich auch im Zusammenhang mit der wissenschaftlichen Kosmologie. Selbst wenn wir behaupten zu wissen, was am Anfang des Universums geschah, kann man immer fragen: Und was geschah davor? Es gibt auch eine Grenze dafür, wie weit wir im Raum sehen können, wie können wir also wissen, was dahinter liegt?

Lange Zeit schien es, als würden wir die Antworten auf die „großen“ kosmischen Fragen nie finden. Daher konzentrierten sich die Kosmologen hauptsächlich auf den Teil des Universums, der direkt beobachtet werden konnte, und überließen es den Philosophen und Theologen, über die großen Mysterien zu streiten. Wir werden jedoch feststellen, dass wir aufgrund der bemerkenswerten Entwicklungen in der Kosmologie in den letzten Jahrzehnten zu Recht annehmen können, zumindest auf einige der großen Fragen Antworten zu finden.

1.2 Ursprünge der wissenschaftlichen Kosmologie

Die Idee, dass das Universum rational verstanden werden kann, bildet die Grundlage aller wissenschaftlichen Erkenntnisse. Dieses Konzept ist heute gang und gäbe, aber im antiken Griechenland vor mehr als 20 Jahrhunderten war es eine gewagte Hypothese. Der griechische Philosoph Thales (6. Jh. v. Chr.) postulierte, dass die ganze Vielfalt der Natur von einigen wenigen Grundprinzipien aus verstanden werden könne, ohne das Eingreifen von Göttern. Er glaubte, dass das primäre Element der Materie das Wasser sei. Zwei Jahrhunderte später vertrat Demokrit die Ansicht, dass alle Materie aus winzigen, ewigen, unteilbaren Teilchen, den sogenannten Atomen, besteht, die sich im leeren Raum bewegen und miteinander kollidieren. Er erklärte: „Nichts existiert außer den Atomen und dem leeren Raum.“ Diese Denkweise wurde von Epikur (3. Jh. v. Chr.) weiterentwickelt, der argumentierte, dass sich komplexe Ordnungen, einschließlich lebender Organismen, auf natürliche Weise, durch zufällige Kollisionen und Umordnungen von Atomen, ohne jeden Zweck oder intelligenten Entwurf, entwickelten. Epikur behauptete, dass Atome gelegentlich kleine zufällige „Ausschläge“ aus ihrer geradlinigen Bewegung

erfahren. Er glaubte, dass diese Abweichungen vom strengen Determinismus notwendig seien, um die Existenz des freien Willens zu erklären. Epikur lehrte, dass das Universum unendlich ist und dass unsere Erde nur eine von zahllosen Welten ist, die ständig in einem unendlichen Raum entstehen und zerfallen (Abb. 1.1).

Eine weitere wichtige Denkrichtung geht auf Pythagoras (6. Jh. v. Chr.) zurück, der glaubte, dass mathematische Beziehungen im Zentrum aller physikalischen Phänomene stehen. Pythagoras war der erste, der den Himmel *Kosmos* nannte, was *Ordnung* bedeutet. Er postulierte, dass die Erde, die Sonne und andere Himmelskörper perfekte Kugeln sind und sich in perfekten Kreisen um ein zentrales Feuer bewegen, das für menschliche Augen nicht sichtbar ist. Denken Sie darüber nach, wie sehr sich dies von den zufälligen Ansammlungen von Atomen unterscheidet, die Epikur sich vorstellte!

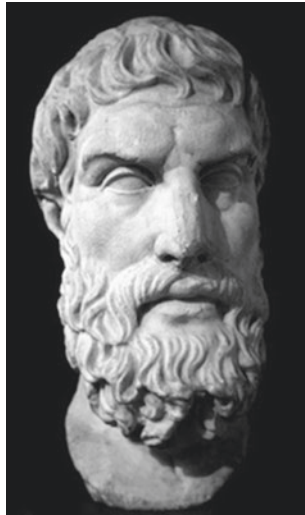


Abb. 1.1 Epikur (341–270 v. Chr.) lehrte Philosophie im Garten seines Hauses in Athen, wo er sich regelmäßig mit einer kleinen Gruppe von Anhängern zu einer einfachen Mahlzeit traf. Zu dieser Gruppe gehörten Frauen und eine seiner Sklavinnen. Epikur war ein produktiver Schriftsteller, aber fast alle seine Schriften sind verschwunden. Die epikuräische Philosophie blühte mehrere Jahrhunderte lang im antiken Griechenland und Rom, wurde aber wegen ihres kompromisslosen Materialismus in der christlichen Welt verbannt. Ihre umfassendste Darstellung fand sich in dem großartigen Gedicht „Über die Natur der Dinge“, das der römische Dichter Lucretius im 1. Jahrhundert n. Chr. schrieb. Das Gedicht war mehr als tausend Jahre lang verschollen und wurde 1417 in einem deutschen Kloster wiederentdeckt, gerade rechtzeitig, um während der Renaissance die Entwicklung der Vorstellungen zu beeinflussen

Im 4. Jahrhundert v. Chr. formulierten Platon und dann Aristoteles aufwendigere Varianten dieses Bildes, indem sie die Erde in den Mittelpunkt des Universums stellten, wobei die Planeten, die Sonne und die Sterne auf durchsichtigen, um das Zentrum rotierenden Kugeln befestigt waren. Dies war ein ausgesprochen endliches Universum, in dem die Sterne auf der äußersten Kugel platziert waren.

Die Griechen machten sehr genaue Beobachtungen der Planeten, und bereits im 3. Jahrhundert v. Chr. hatte sich gezeigt, dass das einfache Modell der konzentrischen Kugeln die beobachtete Bewegung der Planeten nicht ausreichend erklären konnte. Weitere Verfeinerungen des Modells wurden immer genauer, erhöhten aber die Kompliziertheit. Zunächst wurden die Zentren der Kugeln um bestimmte Beträge von der Erde weg verschoben. Dann kam die Idee der Epizykel auf: Jeder Planet bewegt sich um einen kleinen Kreis, dessen Mittelpunkt um einen großen Kreis rotiert (Abb. 1.2). Die Epizykel erklärten, warum sich die Planeten am Himmel rückwärts und vorwärts zu bewegen scheinen und warum sie während der Perioden der Rückwärtsbewegung heller aussehen.

In einigen Fällen mussten Epizykel auf andere Epizykel aufgesetzt werden. All diese Vorstellungen hat Claudius Ptolemäus in seinem Buch *Almagest* (Das Große System) im 2. Jahrhundert n. Chr. zusammengefasst.

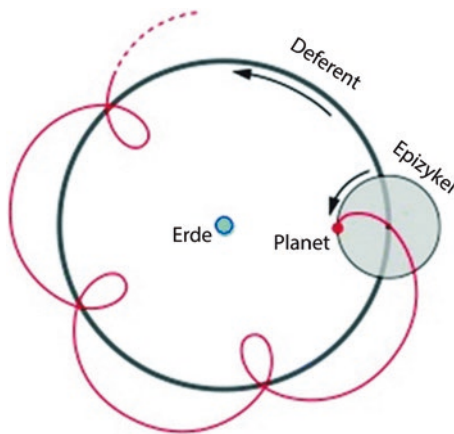


Abb. 1.2 Der Planet bewegt sich um einen *kleinen Kreis* (Epizykel), dessen Mittelpunkt sich um einen *großen Kreis* (Deferent) bewegt, der auf der Erde zentriert ist. Die daraus resultierende Flugbahn des Planeten ist hier *rot* dargestellt; die meiste Zeit bewegt sich der Planet relativ zu den Hintergrundsternen in „Vorwärts“-Richtung, aber für kurze Intervalle, wenn der Planet nahe an der Erde und daher am hellsten ist, kehrt sich seine Bewegungsrichtung relativ zu den Hintergrundsternen um. (Mit freundlicher Genehmigung von Daniel V. Schroeder)

Ptolemäus' mathematisches Modell des Universums überdauerte vierzehnhundert Jahre lang. Es berücksichtigte alle bekannten astronomischen Daten und machte auch genaue Vorhersagen.

Der Bedeutungsverlust des ptolemäischen Weltbildes begann im 16. Jahrhundert mit dem Werk von Nikolaus Kopernikus. Er wollte das Ideal der perfekten Kreisbewegung wiederherstellen, indem er die Sonne in den Mittelpunkt des Universums stellte und der Erde erlaubte, sich auf einer kreisförmigen Bahn um sie herum zu bewegen (diese Idee geht eigentlich auf Aristarchus im 3. Jahrhundert v. Chr. zurück). Da die Erde um die Sonne kreist, bewegen sich die Planeten scheinbar vorwärts und rückwärts über den Himmel, wodurch die „Notwendigkeit“ von Epizykeln entfällt. Kopernikus widmete sein Leben der Berechnung heliozentrischer Umlaufbahnen und veröffentlichte seine Arbeit in dem Buch *Über die Umläufe der Himmelskugeln*, das 1543, kurz vor seinem Tod, erschien.

Trotz seines enormen Einflusses hat man nicht sofort erkannt, dass das kopernikanische System dem des Ptolemäus überlegen war. Kopernikus entdeckte, dass das einfache Modell der kreisförmigen Bahnen nicht gut genug zu den Daten passte. Letztendlich musste er auch Epizykel einführen, und selbst dann konnte er nicht mit der Genauigkeit von Ptolemäus' *Almagest* mithalten. Trotz dieser Rückschläge verdient es Kopernikus immer noch, für seine größte Errungenschaft – die Entfernung der Erde aus dem Zentrum des Universums – Unsterblichkeit zu erlangen. Seitdem ging es für die Erde bergab¹, aber dazu später mehr.

Der nächste große astronomische Durchbruch gelang Johannes Kepler im frühen 17. Jahrhundert. Nachdem er fast drei Jahrzehnte lang die von seinem exzentrischen Mentor Tycho Brahe gesammelten Daten studiert hatte, entdeckte Kepler, dass sich die Planeten tatsächlich auf elliptischen Bahnen bewegen. Er erkannte die Bedeutung seiner Arbeit, war aber dennoch sehr enttäuscht, weil er glaubte, dass Kreise perfekter sind als Ellipsen. Kepler hatte andere mystische Überzeugungen – als Antwort auf das Rätsel, warum jeder Planet seiner speziellen Umlaufbahn folgte, schlug er vor, dass der Planet dies mit seinem Verstand erfasst! (Abb. 1.3).

Dann kam Isaac Newton, der ganz andere Vorstellungen davon hatte, wie die Naturgesetze funktionieren. In seinem bahnbrechenden Buch *Philosophiae naturalis principia mathematica* (1687), jetzt bekannt als

¹Tatsächlich wurde das Entfernen der Erde aus dem Zentrum des Universums nicht unbedingt als eine Herabstufung angesehen. Je weiter man sich damals vom Zentrum entfernte, desto näher kam man dem Reich des himmlischen Königs.

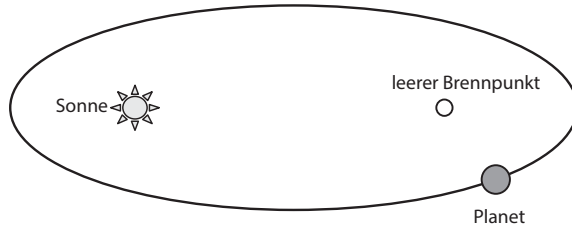


Abb. 1.3 Kepler entdeckte, dass Planetenbahnen Ellipsen sind. (Was ist eine Ellipse? Betrachten Sie zwei Punkte, die als Brennpunkte bezeichnet werden. Eine Ellipse ist der Ort von Punkten, für welche die Summe der Entfernungen zu jedem Brennpunkt konstant ist). Die Sonne befindet sich in einem der Brennpunkte der Ellipse, während der andere Fokus leer ist. Bei Planeten im Sonnensystem liegen die beiden Brennpunkte der Ellipse sehr nahe beieinander, sodass die Bahnen nahezu kreisförmig sind. In dieser Abbildung ist die Ellipse übertrieben dargestellt

die *Principia*, zeigte er, wie man die elliptischen Bahnen der Planeten aus seinen drei Bewegungsgesetzen und dem Gesetz der universellen Gravitation ableitet. Er postulierte, dass die Naturgesetze für alle Körper, an allen Orten und zu allen Zeiten gelten. Die Newton'schen Gesetze sind mathematische Gleichungen, die bestimmen, wie sich physikalische Körper von einem Moment zum nächsten bewegen, und beschreiben ein Universum, das wie ein gigantischer Uhrwerkmechanismus funktioniert. Um das Uhrwerk in Gang zu setzen, braucht man nur die Anfangsbedingungen zu spezifizieren – die Positionen und Geschwindigkeiten aller physikalischen Objekte zu einem bestimmten Anfangszeitpunkt. Newton glaubte, dass diese von Gott festgelegt waren. Wir werden noch einmal ausführlich auf Newton und seine Gesetze zurückkommen, aber für den Augenblick springen wir ein paar hundert Jahre vorwärts, um zu umreißen, was wir heute wissen.

1.3 Kosmologie heute

Trotz ihrer zeitlich weit zurückreichenden Wurzeln ist die wissenschaftliche Kosmologie eine relativ junge Wissenschaft. Das meiste von dem, was wir über das Universum wissen, haben wir in den letzten 100 Jahren gelernt. In groben Zügen haben wir entdeckt, dass unsere Sonne zu einem riesigen scheibenförmigen Konglomerat von etwa dreihundert Milliarden Sternen gehört, das wir als Milchstraße bezeichnen. Die Sonne ist nicht nur einer von Hunderten von Milliarden Sternen in unserer Galaxie, die Milchstraße selbst ist auch nur eine unter Hunderten von Milliarden Galaxien, die im beobachtbaren Universum verstreut sind. Darüber hinaus zeigte Edwin