Zeitschrift: Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Herausgeber: Schweizerische Astronomische Gesellschaft
Band: 58 (2000)
Heft: 299

Artikel: Der Wandel unserer Vorstellungen vom Kosmos
Autor: Fischer, Gaston
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-898598

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 20.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Der Wandel unserer Vorstellungen vom Kosmos[1]

GASTON FISCHER

1. Die ersten Schritte

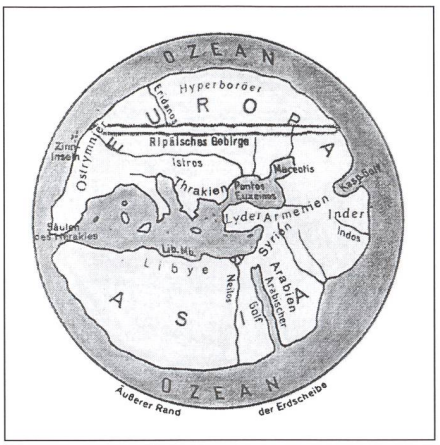
In Mesopotamien und im alten Ägypten waren in der Mitte des dritten Jahrtausends vor Christi (v. Chr.) alle Vorstellungen vom Weltall immer mit Begriffen göttlicher Schöpfung verknüpft. Die ältesten babylonischen Dokumente zeigen die Erde als eine auf dem Wasser schwimmende, flache Scheibe, mit Babylon in der Mitte. Den Himmel stellte man sich als transparenten kristallinen Äther vor, mit den Sternen an den Scheitelpunkten unsichtbarer Kristalle.

Kurz vor der Mitte des letzten Jahrtausends trat in diesen Vorstellungen ein Wandel ein. THALES (640-548 v. Chr.) konnte zum ersten Mal eine Sonnenfinsternis vorhersagen (585 v. Chr.) und erklären, dass der Mond nur das Licht der Sonne widerspiegele. Im gleichen Jahrtausend behaupteten die Anhänger des PYTHAGORAS, dass die Planeten eine Schöpfung der Götter und von ewiger Natur seien; ihre Bahnen konnten demnach nur Kreise sein, in denen sie sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegen. Ein Jahrhundert später kehrte PLATO dieses Argument genau um: die Feststellung, dass sich die Planeten auf kreisförmigen Bahnen und mit gleichmässigen Geschwindigkeiten bewegen, bedeutet, dass sie von göttlicher Hand gesteuert werden.

2. Die griechischen Philosophen

Dieses Kapitel können wir nicht beginnen, ohne die atomistischen Vorstellungen von LEUCIPPUS (~460-~370 v. Chr.) und deren Vertiefung durch DEMOKRIT (~460-~370 v. Chr.) und vor allem durch EPIKUR (341-270 v. Chr.) zu erwähnen. Etwas vereinfachend kann man die Argumente von EPIKUR so darstellen. Wir beobachten eine Vielfalt von Substanzen, gewisse scheinen einfach zu sein, andere sind bestimmt zusammengesetzt. All diese Materialien können nicht unendlich oft gespalten werden, denn am Ende hätte man ja nichts mehr, und aus diesem Nichts könnte man das Beobachtete niemals wieder herstellen. Bei den einfachen Substanzen gibt es also eine zwar kleine, aber doch kleinstmögliche Menge, ein Atom der Substanz. Andererseits kann man sich den Raum nicht als begrenzt vorstellen, er erstreckt sich in alle Richtungen ins Unendliche, sonst wären künstliche Wände notwendig! Wie zu erwarten, stellte sich EPIKUR einen Euklidischen Raum vor. Ein gekrümmter und begrenzter dreidimensionaler Raum, ähnlich der «zweidimensionalen» Oberfläche einer Kugel, war zu jener Zeit noch nicht denkbar. Das Universum war also endlos und enthielt unendlich viele Atome. Somit mußten auch unendlich viele Welten, ähnlich der unsrigen, angenommen werden! Wenngleich diese Folgerung auf rein philosophischen Argumenten basierte, hätte eine solche Aussage, über dreihundert Jahre vor dem Beginn unserer Zeitrechnung, den Grundstein schneller zukünftiger Fortschritte bilden können.

Trotz dieser Andeutungen eines Fortschritts in den Vorstellungen vom Universum darf man sagen, dass bis zur Kopernikanischen Revolution nur jene Vorstellungen akzeptiert und geduldet wurden – zumindest von der Kirche –, die auf ARISTOTELES (384-322 v. Chr.) zurückgehen: die Erde ist eine ruhende Kugel, auf deren Oberfläche alle schweren Gegenstände senkrecht zu Boden fallen. Das Zentrum der Erde ist also auch das Zentrum des Universums. Was die Elemente angeht, argumentiert ARISTOTELES, die Erde sei kalt und bewege sich deshalb nach unten. Dies steht im Gleichgewicht zum Feuer, das heiss ist und hinauf will. Wasser und Erde bewegen sich also nach unten, Luft und Feuer nach oben. Um die Vorgänge am Himmel zu beschreiben, benötigt ARISTOTELES etwas, das einem fünften Element gleichkommt, den «Äther». Am Himmel bewegt sich dieses perfekte und unverwüstliche Element in einem grossen Bogen mit der Exaktheit eines Kreises. Diese geometrische Figur ohne Anfang und ohne Ende gilt als Abbild der göttlichen Vollkommenheit. Das Universum von ARISTOTELES umfasst die Gesamtheit des materiell Existierenden; es erstreckt sich bis zum Himmelsgewölbe. Darüber befindet sich das Reich Gottes. Es ist Gott, der das Himmelsgewölbe in Bewegung setzt, und diese Bewegung überträgt sich dann auf die Bahnen der Planeten, der Sonne und des Mondes. Das uns zugängliche Universum erstreckt sich nur bis zum Himmelsgewölbe; dahinter liegt nichts, was wir erreichen oder uns vorstellen könnten, *nicht einmal leerer Raum*! Vom philosophischen Standpunkt ist diese Anschauungsweise recht modern. Betrachtet man nämlich etwas normalerweise Begrenztes, so stellt man sich automatisch auch ein «Jenseits» dieser Grenze vor. Die Vorstellung einer absoluten Grenze ohne «Jenseits» werden wir erst in der modernen Kosmologie wieder antreffen.



Figur 1. Beispiel einer Weltkarte, nach dem griechischen Geographen HEKATAIOS VON MILET (4. Jahrhundert vor Chr.). Die originale altgriechische Beschriftung ist latinisiert oder germanisiert worden [z. B. Hyperboräer = Kelten, Eridanus = Po (ist mit dem Rhein verwechselt worden), Istros = Donau]. Man erkennt das Mittelmeer (das Meer inmitten der Kontinente). [2]

Mit der Kugelgestalt der Erde erklärt ARISTOTELES, weshalb sich Anblick des Sternenbildes und Klima mit der geographischen Breite verändern. Als Erdumfang gibt er einen Wert von 400 000 Stadien an (etwa 72 800 km, je nach Wert der Stadia, die in Griechenland nicht einheitlich war), der von «Mathematikern» errrechnet worden sei (ohne diese jedoch zu nennen; man nimmt heute an, es handle sich wahrscheinlich um EUDOXOS, ~406-~355 v. Chr.).

ARISTOTELES teilte das Universum in zwei Regionen: Was innerhalb der Mondbahn lag, war vergänglich und unvollkommen; ausserhalb, dort wo sich die Planeten und Sterne aufhielten, war man im Reich der Permanenz, der ewigen Vollkommenheit des «Äthers». Mit der Zeit mussten für die Anhänger von ARISTOTELES Kometen ein Problem werden, als man erkannte, dass sie zweifellos ausserhalb der Mondbahn liegen.

Wenn auch einige dieser Vorstellungen den Tatsachen gut entsprachen, waren sie ein Rückschritt gegenüber den bereits von Vorgängern wie EPIKUR entwickelten Anschauungen, nach denen Himmel und Erde aus den gleichen veränderlichen und vergänglichen Elementen bestehen.

[1] Dieser Artikel entstand als Folge einer Serie von Vorträgen an der «Senioren-Universität» von Neuchâtel, La Chaux-de-Fonds und Fleurier, für die der Autor sich auf das wunderschöne Buch «Emerging Cosmology» von Sir BERNARD LOVELL [1] gestützt hat.

Auch einige Zeitgenossen von ARISTOTELES schlugen modernere Konzepte vor, die sich aber nicht behaupten konnten. So wies z. B. HERAKLIDES PONTICOS (etwa 388-310/315 v. Chr.) nach, dass sich die Bewegungen von Venus und Merkur am Himmel mit grosser Genauigkeit erklären lassen, wenn man annimmt, dass sie nicht um die Erde, sondern um die Sonne kreisen. Den täglichen Lauf der Gestirne erklärte er als Widerspiegelung einer Rotation der Erde. Noch niemand vor ihm hatte eine solche Rotation unseres Planeten postuliert. Eine solche Erklärung wäre in der Astronomiegeschichte sicher ein grosser Fortschritt gewesen.

Wenn es auch wahr ist, dass seit dem antiken Griechenland die Mehrheit der gebildeten Kreise davon überzeugt war, dass die Erde eine Kugel ist und dass Mond, Sonne und die Planeten Himmelskörper sind, die sich entweder auf Umlaufbahnen um die Erde oder um die Sonne bewegen, so blieb doch im Volk die verbreitete Auffassung bis zum Ende des Mittelalters immer die gleiche wie im Altertum: Die Erde ist flach und in weiter Ferne gibt es eine abrupte Kante, von der man in einen tiefen Abgrund verschwinden könnte (siehe z. B. Fig. 1).

Die Schwierigkeiten auf dem Weg zu einem realistischeren Bild des Weltalls, also zu moderneren Vorstellungen, sind leicht zu verstehen, wenn man überlegt, was in Abwesenheit jeglicher Instrumente unseren blossen Sinnen zugänglich ist. Ein Tagesmarsch ist da schon eine erhebliche Distanz und die Dauer eines Lebens eine sehr lange Zeit. Auch wenn man weiss, dass die Erde eine Kugel ist, hat man Mühe, dies mit blossen Augen zu erkennen, wenn man z. B. eine grosse Wasserfläche oder ein Schiff verfolgt, das sich von der Meeresküste entfernt.

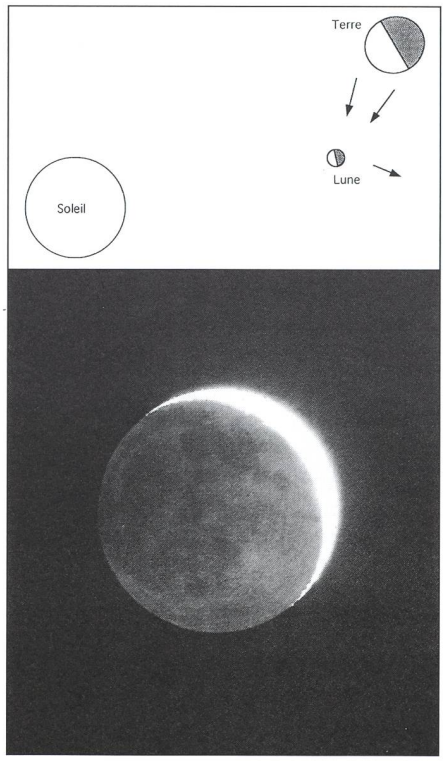
Wenn man den Mond betrachtet, kommt es aber auch vor, dass man das Gefühl bekommt, tatsächlich eine Kugel zu sehen und nicht einfach ein Loch in der Himmelswölbung, das jeden Tag eine andere Form aufweist. So kann man manchmal, z.B. bei Neumond, kurz nachdem die Sonne untergegangen ist, den ganzen Mond sehen; der dunkle Teil wird dann wegen des von der Erde reflektierten Lichtes schwach sichtbar. Ein schönes Bild des sogenannten «aschgrauen» Mondes zeigt Fig. 2.

Kehren wir zu den griechischen Philosophen zurück, die davon überzeugt waren, dass die Erde, wie Sonne und Mond, ein Himmelskörper ist. Wie wir sahen, waren sie sich nicht darüber einig, was sie als Zentrum des Weltalls ansehen sollten. Das war eigentlich gut zu verstehen, denn würde sich die Erde tatsächlich auf einer Kreisbahn um eine fixe Sonne bewegen, dann sollte man doch an den Sternen eine entsprechende Jahresbewegung, die sog. «Sternparallaxe», wahrnehmen können. Man stellte sich die Sterne als Löcher im Himmelsgewölbe vor, von dem man dachte, dass es nicht besonders weit entfernt sei. In der Tat, auch heute noch sieht man eine Parallaxe nur für Sterne, die nicht weit von unserer Sonne entfernt sind.

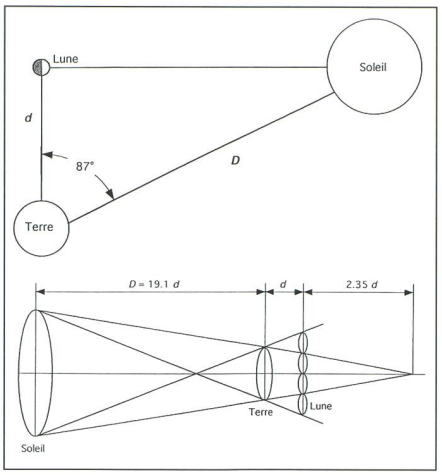
Nach ARISTOTELES nimmt die geistige Vorherrschaft Athens allmählich ab und wieder tauchen modernere Vorstellungen vom Kosmos auf. Das ist die Zeit, in der ERATOSTHENES (276-196 v. Chr.) das Observatorium und die astronomische Schule von Alexandrien gründet. Er ist überzeugt, dass die Erde eine Kugel ist und berechnet ihre Abmessungen auf 1-2% genau aus Messungen der Winkel, unter denen man in Aswan und Alexandrien die Sonne sieht, und aus der Entfernung der beiden Städte, die schon lange von ägyptischen Landesvermessern ermittelt worden war.

Mit einer sehr ausgeklügelten Methode (siehe Fig. 3) bestimmt ARISTARCHOS VON SAMOS (310-230 v. Chr.) Abmessungen und Entfernungen von Mond und Sonne und drückt diese in Erdradien aus. Mit dem von Eratosthenes bestimmten Radius ergeben sich dann sogar Absolutwerte. Seine Sonne ist 6,75 mal grösser als die Erde, was ihn dazu bewegt, diesen Körper als allgemeines Zentrum des Weltalls vorzuschlagen.

HIPPARCHOS (190-120 v. Chr.) baut in Rhodos ein Observatorium. Er ist ein begabter Beobachter, der die Resultate von ARISTARCHOS verbessert. Mit Hilfe der astronomischen Messdaten, die ERATOSTHENES in Alexandrien gesammelt hatte, entdeckt er die Präzession der Äquinoktien. Allerdings kann er deren Ursache noch nicht erklären. Er bestimmt die Dauer des Mondmonates auf Sekunden genau. Schliesslich stellt er einen Sternenkatalog mit 850 Eintragun-



Figur 2. (a) In der Neumondphase sieht man nur einen kleinen von der Sonne direkt beleuchteten Bogen des Mondes. Der Rest der Scheibe ist aber dennoch sichtbar, beleuchtet von Sonnenlicht, welches von der Erde reflektiert wird, wie in Aufnahme (b) zu sehen. [3]



Figur 3. (a) Wenn man von der Erde genau eine halbe beleuchtete Mondkugel sieht, bilden Sonne, Mond und Erde einen rechten Winkel. Genau zu diesem Zeitpunkt kann aus dem Winkel zwischen Mond und Sonne das Verhältnis der Entfernungen Erde-Mond und Erde-Sonne abgeleitet werden. Diese Methode wurde von Aristarchos angewendet, aber sein gemessener Winkel von 87°, anstatt 89° 51', ist viel zu klein und das errechnete Verhältnis ist damit falsch. (b) Weiter fand ARISTARCHOS anlässlich einer zentralen Mondfinsternis (bei der die Zentren von Sonne, Erde und Mond kurzzeitig genau ausgerichtet sind), dass die Dauer der Halbschattenfinsternis genau so lang ist wie die totale Finsternis. Daraus schloss er, dass auf der Mondbahn der Durchmesser des Schattenkegels der Erde zweimal so gross ist wie der Durchmesser des Mondes. Mit dem von Eratosthenes bestimmten Durchmesser der Erde konnte er den des Mondes ableiten. Da von der Erde aus gesehen Mond und Sonne gleich gross erscheinen, konnte er auch die Grösse der Sonne angeben. Der anfängliche Winkelfehler hat aber zur Folge, dass seine Sonne 16 mal zu klein und auch 65 mal zu nahe ist. Für den Mond kommen seine Ergebnisse aber der Wirklichkeit recht nahe.

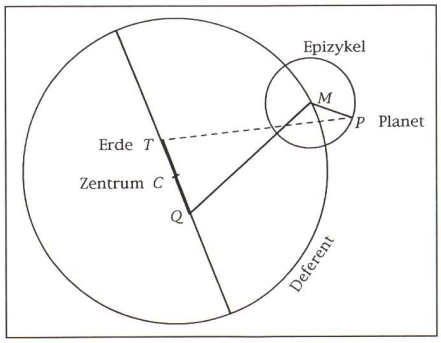
	Mond	Sonne	d	D
Aristarch	0,36	6,75	9,5	180
Verbesserung durch Hipparch		12,3	-	1245
Heutiger Wert	0,27	108,9	30,2	11726

gen auf, den ersten Almagest. Sein astronomischer Ruhm ist enorm. Das Fehlen der Sternparallaxen zwingt ihn jedoch, das heliozentrische System von Aristarchos zu verwerfen. Seine Autorität ist so gross, dass seine Vorstellungen vorherrschen: Dies ist der eigentliche Grund, weshalb der heliozentrische Standpunkt erst mit KOPERNIKUS (1473-1543) wieder auferstehen konnte.

3. Das Ptolemäische System

CLAUDIUS PTOLEMÄUS (2. Jahrh. nach Chr.), ein in Ägypten geborener, griechischer Forscher, war eigentlich ein astronomischer Theoretiker. Er übertraf alle seine Vorfahren mit seinem raffinierten geozentrischen System zur Erklärung der Beobachtungen. Heute wird er sogar beschuldigt, Beobachtungen seiner Vorfahren gefälscht zu haben, um sie in besseren Einklang mit seiner Theorie zu bringen. Obwohl diese Theorie auch nur die unantastbaren heiligen Kreise als geometrische Bauelemente zuliess (siehe z. B. Fig. 3), war es das bei weitem erfolgreichste, um die Bewegungen der verschiedenen Himmelskörper darzustellen. Bis es durch die Arbeiten von TYCHO BRAHE überholt wird, bleibt PTOLEMÄUS' grösstes Werk, der *Almagest* (arabisch: *grosses Werk*), das astronomische Referenzwerk.

Figur 4. PTOLEMÄUS verwendet für die Planetenbahnen Kreise. Der Planet bewegt sich mit gleichförmiger Geschwindigkeit auf dem Epizykel, dessen Mittelpunkt M auf dem Deferent fortschreitet. Die Winkelgeschwindigkeit von M ist jedoch nicht in Bezug zum Zentrum C des Deferenten gleichmässig, sondern hinsichtlich Q. Die Erde befindet sich nicht im Zentrum C sondern im Punkt T, der Verlängerung von QC, wobei QC und TC gleiche Länge haben.



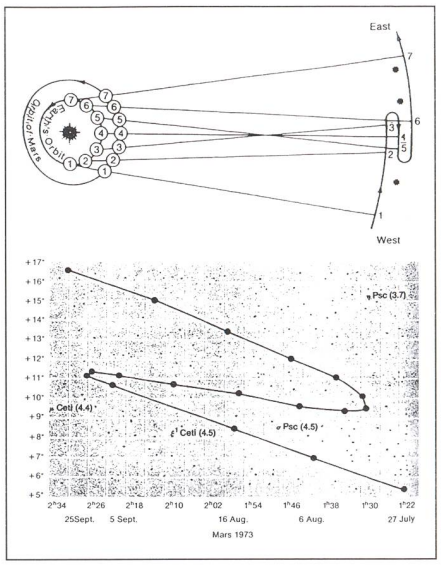
In den folgenden 13 Jahrhunderten tauchten keine neuen Vorstellungen auf. Lediglich THOMAS VON AQUIN (1225-1274) formulierte das gesamte Gebilde der religiösen Dogmen grundlegend neu, um diese in Einklang mit den alten Aristotelischen Vorstellungen zu bringen und verstärkte so das Gerüst, das im 12. und 13. Jahrhundert unter der Kritik hauptsächlich der Pariser Schule allmählich einzustürzen drohte.

4. Die kopernikanische Revolution, TYCHO BRAHE, JOHANNES KEPLER

Endlich belebt KOPERNIKUS (1473-1543) den heliozentrischen Standpunkt wieder, publiziert aber seine Ideen mit viel Zurückhaltung und wird dabei von einem sehr ängstlichen Herausgeber, dem Lutherischen Theologen OSIANDER, noch bestärkt. (Hier muss gesagt werden, dass zu Beginn der Reformation die Lutheraner noch intoleranter waren als die Katholiken, wollten sie ja auf die Bibel als einzige Quelle alles Wissens zurückgreifen). Das Hauptwerk von KOPERNIKUS, *De Revolutionibus Orbium Coelestium*, erscheint erst kurz vor seinem Tod mit einer Einleitung von OSIANDER... Es ist die Pflicht des Astronomen, den geschichtlichen Ablauf der Bewegungen der Himmelskörper mittels sorgfältigster Beobachtungen zu bestimmen. Was aber die wahren Ursachen dieser Bewegungen angeht, die er in keiner Weise je wird eruieren können, muss er Vorschläge machen, wie mittels bekannter geometrischer Prinzipien die Bewegungen der Vergangenheit beschrieben und diejenigen der Zukunft vorausgesagt werden können. *Seine Vorschläge vermitteln aber in keiner Weise ein Bild der wahren oder möglichen Ursachen.* Es genügt, wenn sie eine Rechenbasis liefern, die mit den Beobachtungen kohärent ist...[2]. Erst KEPLER hat eindeutig bewiesen, dass die Einleitung gänzlich von OSIANDER stammt.

Mit den Vorstellungen von KOPERNIKUS ist es endlich möglich, die Oppositionsschleife von Mars einfach zu erklären, wie in Fig. 5 dargestellt.

Vor der Einführung des optischen Fernrohres war TYCHO BRAHE (1546-1601) ohne Zweifel der grösste Beobachter des Himmels. Für die Schaffung eines in sich geschlossenen theoretischen Gebäudes war er aber weniger begabt. Das heliozentrische System von KOPERNIKUS übernahm er nicht, sondern schlug sein eigenes, wenig überzeugendes System vor, in dem die Sonne um eine ruhende zentrale Erde kreist, wohingegen die Planeten um die Sonne laufen. Aber niemand vor ihm hat so viele Beobachtungen durchgeführt, und je nach Art der Geräte war

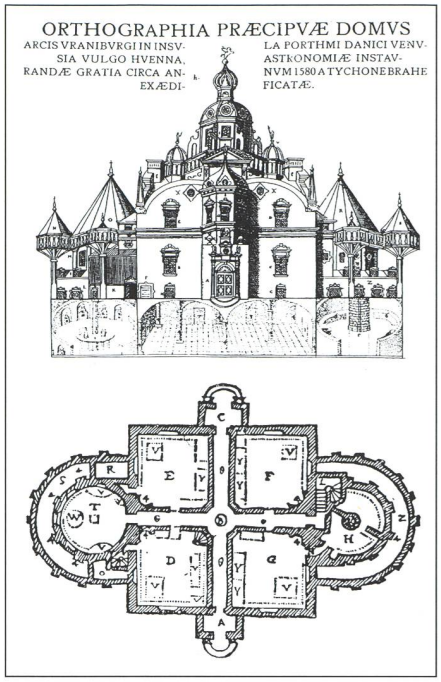


Figur 5. (a) Die rückläufige Bewegung eines äusseren Planeten (hier Mars) in der Nähe der Opposition. Die Ziffern 1 bis 7 bezeichnen zeitgleiche Lagen von Erde und Mars. (b) Die Bahn von Mars am Himmel während der Opposition im März 1973. [4]

seine Messgenauigkeit 3 bis 60 mal besser als jemals zuvor erreicht. Er hat alle Gerätetypen, hauptsächlich die Visiermethoden, verbessert. Seine grösste Messgenauigkeit betrug etwa ein Sechstel einer Bogenminute (also zehn Bogensekunden), was fast unglaublich ist, wenn man weiss, dass er dies ohne jegliche Optik erreichte!

TYCHO gehörte zum dänischen Adel, war aber selber kein reicher Mann. Ihm ist es jedoch zum erstenmal als Wissenschaftler gelungen, Forschung in grossem Umfang von einem Mäzen finanzieren zu lassen, nämlich von der dänischen Krone. Daher wäre es gerecht, den König von Dänemark und Norwegen, FRIEDRICH II, als Miturheber seines Werkes zu betrachten. Mit Hilfe des Königs konnte TYCHO auf der Insel Hven die Observatoriumsburg Uraniborg erbauen, deren Grundriss in Fig. 5 zu sehen ist. Dort konnte er eine Druckerei und später sogar eine Papierfabrik einrichten, um seine Ergebnisse nicht nur schneller und billiger veröffentlichen zu können, sondern auch um sich von den Verlegern in Kopenhagen unabhängig zu machen. TYCHO war auch Astrolog der Krone und lieferte ihr jedes Jahr ein Horoskop. Bald wurde Uraniborg die astronomische Schule seiner Zeit, die von allen Astronomen besucht wurde. Wie in einem zu diesem Zweck errichteten modernen Forschungszen-

[2] Diese Übersetzung will vor allem den Sinn eines Abschnittes verdeutlichen, wo natürlich nichts hervorgehoben war.



Figur 6. Plan und Ansicht von Uraniborg [5]

trum erhielt man dort Kost und Logis. Mit der Zeit wuchs der Ruhm von TYCHO weiter an. Wegen seiner eher ungeduldigen und nicht sehr einfühlsamen Natur traf er jedoch mehrmals schlechte Entscheidungen, mit denen er sich in den Kreisen des Adels und unter der Inselbevölkerung viele Feinde schuf. Mit dem Tod von FRIEDRICH II brach für TYCHO plötzlich alles zusammen und er flüchtete nach Prag, wo man ihm ähnliche Bedingungen wie in Hven versprach. Diese konnte er aber vor seinem Tod nicht mehr realisieren, weshalb aus dieser Zeit keine wertvollen Beobachtungen stammen. Diese Zeit ist jedoch durch das Zusammentreffen mit seinem Schüler KEPLER (1571-1630) sehr bedeutsam.

KEPLER lässt sich in Prag von TYCHO BRAHE alle Planetenbeobachtungen geben. Sie führten ihn zu den berühmten drei Gesetzen. Die beiden ersten Gesetze fand er bereits 1609, das letzte aber erst zehn Jahre später. Es muss hervorgehoben werden, dass Kepler ein Mystiker war. Er versuchte TYCHOS Beobachtungen mit einer Theorie zu erklären, die eine gewisse Ähnlichkeit mit den viertausend Jahre alten mesopotamischen Vorstellungen hatte, nämlich mit geometrischen Gebilden hoher Symmetrie. So versuchte er, die fünf Körper höchster Symmetrie, Kubus, Tetraeder, Oktaeder, Ikosaeder und Dodekaeder ineinander zu schachteln, um diese in einen einfachen Zusammenhang mit den damals bekannten fünf Planeten zu bringen. Er konnte sich nämlich für das Werk Gottes nichts anderes vorstellen als ein Gefüge perfekter geometrischer Harmonie. So umschloss die Kugel der Saturnbahn einen Kubus, der seinerseits die Kugel der Jupiterbahn genau umfasste; diese enthielt ein Tetraeder, das die Kugel der Marsbahn umrahmte, usw. Mit solchen Regeln versuchte KEPLER die Folge der Kopernikanischen Radien der Planetenbahnen abzuleiten. Auch wenn KEPLER glauben durfte, sein Ziel erreicht zu haben, d. h. die Gesetze des Universums aufgeklärt zu haben, war er für dieses Vorhaben sicher auf einem falschen Weg. Seine Anstrengungen wurden schliessich dennoch mit drei wunderbaren Gesetzen belohnt, die er gar nicht gesucht hatte.

Beim Aufstellen des heliozentrischen Systems blieb KOPERNIKUS gewissen alten Prinzipien treu. Als Mittelpunkt aller Planetenbahnen wählte er das Zentrum der Erdbahn anstatt die Sonne. Das war eigentlich ein Widerspruch in seiner Theorie, den erst KEPLER klärte. Wenn die Planeten schon um die Sonne laufen, lag es nahe, dass ihre Bahnen statt der Erde, oder dessen Bahnzentrum, die Sonne enthalten müssen. Diese Korrektur ergab für die Kopernikanische Theorie eine wesentliche Vereinfachung. Wenn auch eine weit bessere Beschreibung der Beobachtungen möglich geworden war, benötigte die Kopernikanische Theorie für jeden Planeten immer noch einen kleinen Zusatzkreis, um seine Bewegungen richtig zu beschreiben. Eine Serie solcher kleinen Schritte und das genaue Studium der Bahnparameter des Mars, die TYCHO mit besonderer Sorgfalt registriert hatte, bewogen KEPLER schliesslich zu dem grossen Schritt, die Kreise für die Planetenbahnen zugunsten von Ellipsen zu verwerfen (dies geschah jedoch erst dreizehn Jahre nach Veröffentlichung der Theorie über die ineinandergeschachtelten Körper). Der Erfolg bereits der beiden ersten Keplerschen Gesetze bei der Erklärung der Planeten-Bewegungen war so augenfällig, dass es keine Argumente mehr gab, am geozentrischen System festzuhalten.

Bald wurde ein weiterer grosser Schritt getan, auch wenn dieser anfänglich nicht viel Aufsehen erregte und erst nach und nach in das damalige Weltbild Einzug fand. Bis dahin war das Bild des Weltalls noch durch die durchlöcherte Himmelskuppel begrenzt. 1576 erklärte der englische Astronom THOMAS DIGGES, dass die Sterne lediglich andere Sonnen seien, die bis ins Unendliche in allen Richtungen des Raumes verteilt sind. Zum erstenmal wurde das Universum also als unendlich angesehen, was 1584 GIORDANO BRUNO veranlasste zu behaupten, dass das Sonnensystem keineswegs einzigartig ist. Dies wurde als Ketzerei angesehen, und BRUNO musste deswegen 1600 den Scheiterhaufen besteigen!

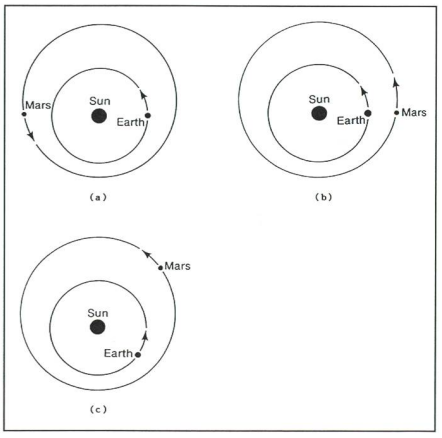
Die Thesen Digges wurden jedoch bald durch GALILEO GALILEI (1564-1642) untermauert: Mit seinen Fernrohren konnte er anscheinend unendlich viele Sterne sehen.

Wie weit entfernt sind aber diese Sterne? Alle Schätzungen, die damals gemacht wurden, erwiesen sich als viel zu klein. Mit den Mitteln, die man hatte, war es nicht möglich, die Entfernungen der Sterne durch Vergleich ihrer Lichtstärke mit der Sonne abzuleiten. Es war dem Schweizer JEAN-PHILIPPE LOYS DE CHESEAUX (1718-1757) aus dem Kanton Waadt beschieden, etwa hundert Jahre nach GALILEIS Tod mit einer ausgeklügelten Methode zu den richtigen Werten zu gelangen. An gewissen Stellen seiner Bahn erschien der Mars mit der gleichen Lichtstärke wie ein Stern erster Grössenklasse (siehe Fig. 7). Der Mars ist aber kein selbstleuchtender Stern, er reflektiert lediglich das Licht der Sonne. Unter der Annahme, Mars sei ein ideal reflektierender Spiegel, berechnete DE CHESEAUX die Entfernung des Sterns aus den Entfernungen von Mars und Sonne sowie Mars und Erde. Er erhielt einen Wert von ungefähr 5 Lichtjahren, was erstaunlich ist, weil der nächste Stern tatsächlich etwa 4,3 Lichtjahre von uns entfernt ist. Obwohl DE CHESEAUX mehrere allzu vereinfachende Annahmen machte, konnte er sich bereits auf recht gute Werte für die Distanzen zwischen Erde und Sonne und zu den anderen Planeten stützen.

5. Galileo öffnet die Tür zu den modernen Vorstellungen

Mit GALILEO GALILEI erscheint plötzlich ein extrovertierter, rühriger und Aufsehen erregender Forscher. Aus

Figur 7. Konstellationen von Sonne, Erde und Mars, (a) in Konjunktion, (b) in Opposition und (c) in einer Position, bei der Mars wie ein Fixstern erster Grössenklasse erscheint. Die grosse Halbachse der Marsbahn beträgt 1,524 AE. [6]



heutiger Sicht besteht GALILEO's Hauptverdienst wohl darin, als Forscher zum ersten mal die Wissenschaft ohne voreingenommenen Ideen angegangen zu haben. Nach ihm hat DESCARTES (1596-1650) die gleiche Haltung auf entschiedene Weise proklamiert, und diese wurde dann in der Wissenschaft allgemeine Sitte. Seine Ideen will GALILEO mit allen teilen, nicht nur mit anderen Forschern. Deswegen publiziert er seine Werke in italienischer, nicht lateinischer Sprache und verwendet oft einen populärwissenschaftlichen Stil. Er baut die ersten Fernrohre, entdeckt das «Zwerg-Sonnensystem» von Jupiter mit seinen vier grossen Satelliten sowie die sich verändernden Sonnenflecken. «*Was ausserhalb der Mondbahn liegt, ist also nicht permanent*», schreit er auf und reisst die Aristotelischen Begriffe völlig nieder. Die kirchliche Inquisition gegen ihn ist eine logische Folge seines unabhängigen Denkens in allen Bereichen der damaligen Weltanschauung!

ISAAC NEWTON (1642-1727) erkennt als erster die Gesetze der klassischen Mechanik und der Gravitation. Daraus leitet er die Keplerschen Gesetze theoretisch ab. Die Fortschritte, zu denen er die Mathematik führt, öffnen den wissenschaftlichen Arbeitsmethoden völlig neue Wege. Er formuliert alle Gesetze, die unsere Vorstellungen von Mechanik und Schwere bis zum 20. Jahrhundert prägen und erst von Einsteins Relativitätstheorie abgelöst werden.

Die Fortschritte, die mit GALILEO und Newton erzielt werden, sowohl zum Verständnis alltäglicher als auch kosmischer Erscheinungen, müssen als die radikalste wissenschaftliche Revolution aller Zeiten gewertet werden. Endlich verstehen wir die Gesetze der Mechanik und der Gravitation. Plötzlich erweitert sich das Universum in alle Richtungen auf riesige Distanzen. Man ist fast bereit anzunehmen, dass es sich bis ins Unendliche erstreckt. Die nächste grosse Revolution, die Relativitätstheorie Einsteins, wird nur unsere Vorstellungen für Ereignisse über riesige Entfernungen oder mit sehr hohen Geschwindigkeiten modifizieren. Die Physik steht also in einer Blütezeit. Anders ist es mit der Chemie, die noch lange warten musste, bis sie uns ein wahres Verständnis über den Aufbau der Materie bringen konnte. Die Forscher dieser Epoche waren sich dieses Bedürfnisses sehr bewusst. TYCHO hatte sich im Keller von Uraniborg ein Alchemielabor einrichten lassen und auch NEWTON hatte in Cambridge ein solches (hier soll vermerkt werden, dass Alchemie und Chemie damals noch keine getrennten Begriffe waren).

6. Einstein und die Relativität [3]

Mit EINSTEIN (1879-1955) kommen unsere Begriffe von Raum, Zeit und Schwere in ein völlig neues Licht. Raum und Zeit sind nicht mehr vorgegebene Begriffe, die unabhängig von Materie (oder Energie) bestehen und in welchen das Weltall, wie wir es wahrnehmen, hätte aufgebaut werden können. Man wird bald einsehen müssen, dass Raum, Zeit und Materie auf einmal im «Urknall» (englisch: «Big Bang») entstanden sind! Zwischen Zeit und Raum gibt es keinen prinzipiellen Unterschied mehr. Zusammen bilden diese ein vierdimensionales *Raum-Zeit-Kontinuum*. Obwohl dieses Raum-Zeit-Kontinuum endlich ist, hat es keine Grenzen; man kann aus diesem Raum-Zeit-Kontinuum nicht heraustreten. In der Tat, das gesamte Universum ist ein schwarzes Loch, aus dem wir nicht fliehen können und in welchem sich viele weitere kleinere schwarze Löcher befinden. Die Lichtgeschwindigkeit ist eine Grenzgeschwindigkeit, die man nicht überschreiten kann: es wäre illusorisch, die Möglichkeit unendlicher Geschwindigkeiten zu postulieren, denn dann könnte man sich vorstellen, überall zur gleichen Zeit zu sein!

Im Euklidischen dreidimensionalen Raum, der uns vertraut ist, sind Massenkörper Gebilde, die von diesem Raum unabhängig sind. In diesem Raum folgt ein bewegter Körper einer Bahn, die durch alle anderen Körper bestimmt wird. Das trifft sogar für die Trajektorie von Lichtstrahlen zu. Im Einsteinschen Raum-Zeit-Kontinuum dagegen sind die Massen ein integraler Bestandteil des Raumes, dessen Metrik die Anwesenheit aller Massen berücksichtigt. In diesem Raum-Zeit-Kontinuum durchläuft ein bewegter Körper, der nur den Gravitationskräften unterliegt, eine geradlinige Bahn, die man «Geodäte» nennt. So ist z. B. die Bahn der Erde um die Sonne, die im Euklidischen Raum eine fast perfekte Ellipse darstellt, im Raum-Zeit-Kontinuum einfach eine geradlinige Geodäte. Ein Lichtstrahl, der knapp an der Sonne vorbei läuft und deshalb im Euklidischen Raum etwas abgelenkt wird, beschreibt im relativistischen Raum-Zeit-Kontinuum auch nur eine gerade geodätische Bahn.

Ein wichtiges Postulat der Einsteinschen Theorie besagt, dass alle Gesetze der Physik, die in einem nicht- beschleunigten System gelten, auch in solchen Systemen ihre Gültigkeit bewahren, die gegenüber dem ersten rein translatorisch bewegt sind; man spricht dann von der «Gesamtheit der Inertialsysteme». Da alle inertialen Systeme vom Standpunkt der Physik aus gleich zu bewerten sind, hat man lange geglaubt, dass keines davon ausgezeichnet sei. Mit der Entdekkung der 2,7°K Mikrowellenhintergrundstrahlung, die von GAMOW 1946 vorhergesagt wurde, weiss man heute, dass sich unter diesen Systemen doch ein ausgezeichnetes befindet, nämlich dasjenige, gegenüber welchem der Mikrowellenhintergrund isotrop verteilt ist. Das Sonnensystem nimmt z. B. an verschiedenen Bewegungen teil (Bewegung zum Massenzentrum der lokalen Sternengruppe mit etwa 20 km/s; Rotation um das Milchstrassenzentrum mit 250 km/s, was einer Rotationsperiode von ungefähr 240 Millionen Jahren entspricht; Bewegung zum Massenzentrum der lokalen Galaxiengruppe mit 100 km/s) und bewegt sich gegenüber diesem ausgezeichneten kosmischen System mit einer Geschwindigkeit von etwa 370 km/s.

7. Wie empfinden wir jetzt das Weltall? [4]

Heute werden unsere Vorstellungen vom Kosmos vor allem durch astronomische Beobachtungen geprägt, die mit immer besseren und leistungsfähigeren Instrumenten gemacht werden. Die Fortschritte im Instrumentenbau erfolgen jedoch so rasch, dass unsere Ideen immer noch ständig revidiert werden müssen.

Zu Beginn seiner umfangreichen Sternzählungen gegen Ende des 18. Jahrhunderts dachte WILHELM HERSCHEL[5] (1738-1822), dass die Sterne zwar auf kurzen Distanzen chaotisch, im grösseren Masstab doch isotrop verteilt sind. Je vollständiger sein Katalog wurde, desto klarer erschien es ihm, dass die Sterne sich in einer endlich dicken Schicht in der Milchstrasse befinden. HERSCHEL vermutete daher die Grenzen des Weltalls ausserhalb dieses Sternengebildes.

---

[3] Siehe auch ORION Nr. 258, Oktober 1993, S. 208-217.

[4] Fragen nach der Stellung des Menschen im Universum, insbesondere Fragen nach den notwendigen Bedingungen, dass dieses Universum von denkenden Wesen wahrgenommen werden kann, sind in exemplarischer Weise von Pierre North behandelt worden: siehe ORION Nr. **265**, Dezember 1994, S. 281-286.

[5] Wie für PTOLEMÄUS und TYCHO BRAHE kann gesagt werden, dass WILLIAM HERSCHEL der grösste astronomische Beobachter seiner Zeit war. Doch kam er erst mit 35 Jahren nach einer schönen Karriere als Musiker zur Astronomie. Fünf Jahre später, also 1778, baute er sein prachtvolles Fernrohr, mit dem er im März 1781 den Planeten Uranus entdeckte (und 16 Jahre später zwei seiner Satelliten). Im Dezember 1781 wurde er zum privaten Astronomen des Königs ernannt, dank dessen Salär er dann auf die Musik als Beruf verzichten konnte.

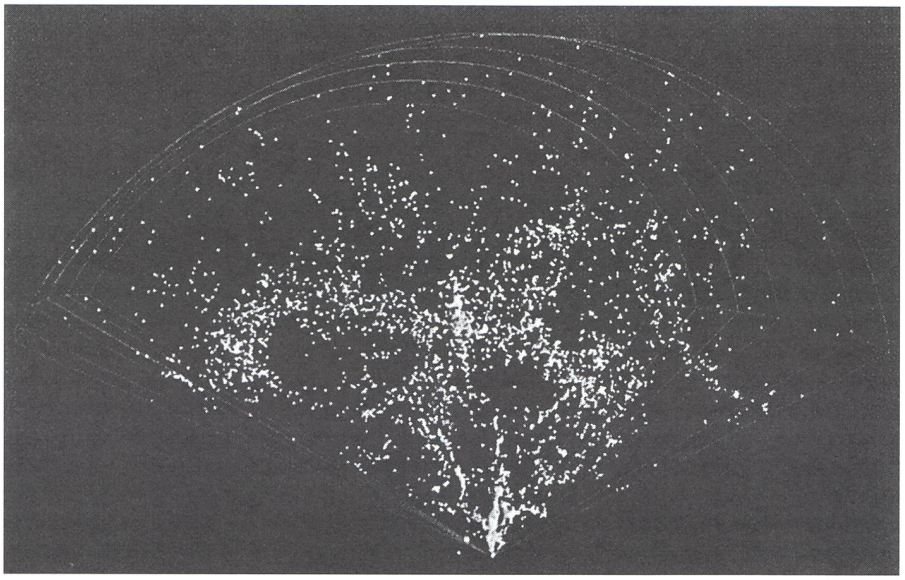
Mit dem selbstkonstruierten 20-Zoll Spiegelteleskop (50,8 cm), dem stärksten Instrument jener Zeit, erschien ihm das so, als wären die Sterne in einer flachen rechteckigen Schachtel verteilt, die etwa fünfmal länger als dick ist.

HERSCHEL verdankt man auch den ersten grossen Nebelkatalog mit 466 Objekten, der kurz nach dem Katalog von MESSIER mit nur 103 Objekten erschien. Gegen Ende seiner Beobachtungstätigkeit hatte HERSCHEL 2500 Nebel identifiziert. Er sah sich gezwungen, sie in verschiedene Typen einzuteilen. So sah er Objekte, die er in Sterne auflösen konnte und für welche er etwas zögernd den Vorschlag machte, es handle sich um Sternsysteme, ähnlich der Milchstrasse, jedoch ausserhalb von ihr. Eine zweite Gruppe enthielt Nebel wie den Orionnebel, von denen er glaubte, sie seien zu weit entfernt, um in Sterne aufgelöst zu werden. Um deren grosse Lichtstärke zu erklären, musste jedoch angenommen werden, es handle sich um viel grössere Sternansammlungen als die Milchstrasse.

Eine dritte Kategorie enthielt planetarische Nebel, die um einen zentralen Stern zu rotieren schienen. Erst 1926, also 140 Jahre später, gelang es HUBBLE mit dem 100-Zoll (2,54 m) Fernrohr des Mount Wilson, diese als Sterne zu erkennen, die als Supernova explodiert waren. In HERSCHELS zweiter Kategorie erkannte HUBBLE eine Sondergruppe, diejenige der «Kugelsternhaufen», sehr dichte Ansammlungen von Sternen innerhalb der Milchstrasse.

Auch wenn HERSCHEL bereits postuliert hatte, dass es extragalaktische Systeme gibt, hat erst HUBBLE HERSCHELS Nebel korrekt in drei galaktische Gruppen und eine extra-galaktische eingeteilt, wobei man die letzte Gruppe heute als Galaxien bezeichnet. Er nahm an, mit seinem 100-Zoll Spiegelteleskop bis zu Entfernungen von 140 Millionen Lichtjahren blicken zu können und schätzte die Zahl der Galaxien in diesem Volumen auf etwa zwei Millionen.

Wie HERSCHEL ist EDWIN HUBBLE (1889-1953) wohl einer der grossen Astronomen. 1925 beweist er mit grosser Sicherheit, was HERSCHEL nur ahnte, dass extragalaktische Nebel tatsächlich selbständige Galaxien wie die Milchstrasse sind, die man in individuelle Sterne auflösen kann. 1929 deutete er die «Rotverschiebung», d. h. die durch den Dopplereffekt hervorgerufene Verschiebung aller Spektrallinien entfernter Galaxien zum roten Ende des Spektrums, als Folge einer allgemeinen Expansion des Weltalls. Der «Urknall» als Ursprung des Universums ist eine logische Konsequenz davon.



Figur 8. Lage von Galaxien mit bekannten Entfernungen in einem Sektor des extragalaktischen Raumes. Diese Darstellung gleicht einem Seifenblasenschaum, auf dessen Blasenoberfläche die Galaxien konzentriert sind, während das Innere der Blasen leer bleibt. [7]

Mit der Erweiterung der Galaxienkataloge hielt man anfangs das Universum noch für isotrop: Auf kurzen Entfernungen sind die Galaxien zwar regellos verteilt, über grössere Entfernungen hinweg glaubt man aber eine gleichmässige Verteilung zu finden. Diese Grenzen des «längeren Masstabs» müssen aber nach und nach vergrössert werden, denn man findet zunächst Gruppen, dann Anhäufungen und schliesslich Superanhäufungen von Galaxien, die durch ihre Gravitation gebunden bleiben. Heute haben wir von der Galaxienverteilung im Weltall ein Bild, das etwa der Fig. 7 entspricht. Es gleicht einem Seifenblasenschaum, in dem die Galaxien sich hauptsächlich auf den Blasenoberflächen befinden, während die Blasen selbst praktisch leer sind. Jede Blase des Schaums gehorcht tatsächlich dem bekannten Expansionsgesetz von HUBBLE, wonach die Geschwindigkeit v, mit welcher sich der Blasendurchmesser d vergrössert, dem Durchmesser proportional ist: $v = Hd$.

Die Proportionalitätskonstante H ist die Hubblesche Konstante und dessen Kehrwert 1/H ist eine Zeit. Diese Zeit stellt ein Mass für das Alter des Universums dar, denn der «Urknall» entspricht der singulären Anfangszeit. In Wirklichkeit ist das einfache Gesetz $v = Hd$ nur eine lineare Näherung eines allgemeineren Expansionsgesetzes, das für unsere nähere *zeitliche* wie *räumliche* Umgebung gilt. Einerseits waren die Expansionsgeschwindigkeiten in der Vergangenheit anders als heute, andererseits wissen wir wegen der endlichen Lichtgeschwindigkeit, dass ein Blick in weite Ferne äquivalent ist mit einem Blick in weite Vergangenheit. Hat sich die Expansion z.B. verlangsamt, dann sollte für weit entfernte Galaxien ein grösseres Verhältnis v/d gefunden werden als für nahe. Bisher geben aber astronomische Daten noch keine schlüssigen Aussagen. Es ist uns bisher nicht gelungen, astronomische Daten zu sichern, um eine glaubwürdige mathematische Form der Beziehung zwischen v und d abzuleiten. Theoretisch hängt die Beziehung zwischen v und d von der mittleren Massendichte des Weltalls ab. Die praktische Bestimmung der Hubble-Beziehung stösst auf zwei Schwierigkeiten. Bei nahen Galaxien kann die Entfernung i. a. recht genau bestimmt werden, die Geschwindigkeiten sind dagegen klein und haben mehr mit den gravitativen Wechselwirkungen mit benachbarten Galaxien zu tun als mit der Expansion. Für ferne Galaxien ist die Geschwindigkeit repräsentativ für die Expansion. Man kennt aber meistens die Entfernung nur sehr ungenau. Somit ist heute nicht einmal der Wert von H genau bekannt, und die entsprechenden Grenzen für das Alter des Universums liegen zwischen etwa 10 und 20 Milliarden Jahren.

Für die Zukunft des Universums ist wieder dessen mittlere Massendichte r maßgebend. Als Folge der allgemeinen gegenseitigen Anziehung aller Massen wird die Expansion mit der Zeit allmählich gebremst, obgleich bis heute dieser Effekt noch nicht nachgewiesen werden konnte. Es gibt jedoch eine kritische Dichte ρ_c, für welche die Expansion nach einer unendlich langen Zeit zum Stillstand kommt. Ist $\rho < \rho_c$, so hält die Expansion bis ins Unendliche an, ist je-

doch $\rho > \rho_c$, so geht sie nach einer kritischen Zeit τ_c nach dem «Urknall» in eine Kontraktion über und endet zum Zeitpunkt $2\tau_c$ mit einem totalen Kollaps, dem Gegenstück zum «Urknall». Eine der wichtigsten ungelösten Fragen der Kosmologie ist der Wert der mittleren Dichte ρ. Viele theoretische Argumente sowie gewisse Beobachtungen sprechen dafür, dass ρ exakt gleich ρ_c sein soll. Wenn man aber die gesamte sichtbare (d.h. leuchtende) Masse des Universums zusammenfasst, so kommt man nur auf ein bis zwei Prozent von ρ_c. Misst man aber, wieder mittels des Dopplereffektes, die Geschwindigkeit, mit der die äusseren Teile der Galaxien um ihre Schwerezentren rotieren, so findet man Massen, die die sichtbare Masse um einen Faktor fünf bis zehn übertreffen. Auch hat man mit dem Hubble-Raumteleskop in Nähe des Zentrums der Galaxie M87 so hohe Geschwindigkeiten gefunden, dass diese nur mit einem riesigen schwarzen Loch von etwa 2 bis 3 Milliarden Sonnenmassen erklärt werden können. Dies allein sind schon 2 bis 3 Prozent der sichtbaren Masse der ganzen Galaxie. Dies verstärkt die Vermutung, dass sich im Zentrum vieler Galaxien schwere schwarze Löcher befinden. Es muss also angenommen werden, dass die sichtbare Masse der Galaxien nur ungefähr ein Zehntel der gesamten Masse ausmacht und dass der Rest aus nichtleuchtenden Gasen und schwarzen Löchern besteht.

Es bleibt jedoch immer noch ein Defizit von einem Faktor 5, vielleicht sogar mehr, zwischen dieser aus Rotationsgeschwindigkeiten in den Galaxien nachgewiesenen Masse und der kritischen Dichte ρ_c. Die theoretischen Argumente, die für ein Universum mit kritischer Dichte sprechen, sind aber so überzeugend, dass der Suche nach dieser fehlenden Masse ein grosser Forschungsaufwand gewidmet wird.

8. Das vier-dimensionale relativistische Raum-Zeit-Kontinuum

Wir möchten nun versuchen zu verstehen, was die Geometrie des vierdimensionalen Raum-Zeit-Kontinuums EINSTEINS vom herkömmlichen dreidimensionalen Euklidischen Raum unterscheidet. Dazu werden wir die Trajektorie der Erdbahn um die Sonne verwenden. Der Einfachheit halber nehmen wir an, diese Bahn sei genau kreisförmig; vernachlässigen also Störungen durch andere Himmelskörper, insbesondere durch den Mond. Wenn das so ist, können wir die Sonne als Zentrum O eines Koordinatensystems annehmen. Die Erdbahn beschreibt dann in der (x,y) – Ebene dieses Euklidischen Raumes einen Kreis um O, dessen Radius R etwa 150 Millionen Kilometer beträgt. Wie wir sehen, spielt hier die z-Koordinate keine Rolle.

Die Erdbewegung beschreiben wir durch Angabe der Variationen der Koordinaten x und y als Funktion der Zeit t, also mittels Funktionen x(t) und y(t). Mathematisch oder geometrisch gesehen entspricht das der Einführung einer vierten Dimension, der Zeit t, senkrecht zu den drei räumlichen (x,y,z) - Dimensionen. Wir sind zwar nicht in der Lage, uns einen vier-dimensionalen Raum vorzustellen oder einen solchen zeichnerisch darzustellen; für die Mathematik ist das jedoch kein Hindernis. Wir haben aber eben gesehen, dass zur Beschreibung unseres idealisierten Erde-Sonne-Systems die z-Koordinate nicht gebraucht wird. Somit ignorieren wir diese und legen an ihre Stelle die Zeitachse t.

Wählt man als Anfangsbedingungen, dass zur Zeit t = 0 die Erde gerade die x-Achse durchquert, so sind diese Bedingungen y(t=0) = 0 und x(t=0) = R. Die Erde durchläuft nun ihre räumliche Kreisbahn, derweil die Zeit t regelmässig fortschreitet. In unserem (x,y,t) – Raum ist diese Trajektorie eine Schraubenlinie (Helix). Der Schraubengang wird von den Einheiten abhängen, die wir für Zeit und Länge verwenden. Unsere Absicht eines Vergleiches mit der Relativität zwingt uns hier «relativistisch kompatible» Einheiten zu verwenden. In der Relativität ist die Zeitskala mit der Längenskala durch eine Proportionalitätskonstante gekoppelt, und diese Konstante ist die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c. Diese Geschwindigkeit muss mit den gleichen Einheiten ausgedrückt werden, die wir für Längen und Zeit verwenden. Drückt man x und y in Kilometer aus und t in Sekunden, so wird die Zeitachse t eine ct – Achse, wo c = 300 000 km/s. Für unsere Schraube hat das riesige Konsequenzen: im Lauf einer Sekunde bewegt sich die Erde parallel zur y-Achse um etwa 30 km, liegt aber immer noch fast exakt 150 Millionen km entlang der x-Achse; in Richtung der ct – Achse hat sie sich jedoch um 300 000 km fortbewegt! Unsere Schraube ist also extrem ausgezogen und auf diesem ersten kleinen Trajektorienstück wird man Mühe haben einzusehen, dass es sich tatsächlich um eine Schraube handelt und nicht um ein Teilstück einer Geraden (in der y-Richtung ist der Weg sehr kurz, in der ct – Richtung im Vergleich sehr lang). In Wirklichkeit ist es in unserem Euklidischen Raum aber doch eine Schraubentrajektorie. Hier lohnt es sich vielleicht anzumerken, dass die Schraubenform ausgeprägter ausfallen würde, wenn die Sonne viel massiver wäre, oder die Erde viel näher um die Sonne kreisen würde.

Der Übergang zur Relativität ist subtil. Die Relativität besagt, dass es keinen Raum ohne Materie gibt; die Materie ist Bestandteil des Raumes und der Zeit und sie verformt das vier-dimensionale Raum-Zeit-Kontinuum derart, dass die Materie darin schon integriert ist. Dort, wo es grosse Materiekonzentrationen gibt, ist der Raum gegenüber dem Euklidischen stark deformiert, auch wenn man alle vier Dimensionen einbezieht, was wir mit einem Spezialfall zu beschreiben versucht haben. Alle Gravitationswechselwirkungen sind im relativistischen Raum-Zeit-Kontinuum schon enthalten. In diesem Raum würde aus unserer Schraube tatsächlich eine Gerade. Bei kleinen Massen oder kleinen Massendichten, wie im Fall der Sonne, ist der Unterschied zwischen dem, was man relativistische und Euklidische «Metrik» nennt, sehr klein. In der Umgebung von schwarzen Löchern dagegen ist der Unterschied enorm.

Wir sind an unsere «Euklidische Anschauungsweise» so gewohnt, dass wir das Gefühl haben, das relativistische Raum-Zeit-Kontinuum sei deformiert. Das ist jedoch nur eine Anschauungsweise und das Gegenteil ist der Wahrheit näher. Unsere Sinne haben sich eben in einer Umgebung kleiner Geschwindigkeiten und kleiner Massenansammlungen entwickelt, wo die einfachere Euklidische Metrik völlig genügte.

GASTON FISCHER
Rue de Rugin 1A, CH-2034 Peseux

■ Pour la version française de cet article, veuillez vous référer à la revue ORION N° 281, 4/1997, pp 23-31.
LA RÉDACTION

Bibliographie

[1] B. LOVELL, *Emerging Cosmology*, Praeger, NewYork, 1985 ISBN 0-30-001009-8.
[2] A. MÜLLER, *Geschichte der alpinen Forschung*, in: *Die Alpen – ein sicherer Lebensraum?*, Erg. 171. Jahresv. Schweiz. Akad. Nat. Wiss., 1991 in Chur, p. 10.
[3] G. TAUBES, *Physicists Watch Global Change Mirrored on the Moon*, Science 10 June 1994, pp. 1529-1530.
[4] R.H. BAKER UND L.W. FREDRICK, *Astronomy*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1971, Library of Congress No. 74-127649, p. 178.
[5] V.E. THOREN, *The Lord of Uraniborg*, Cambridge University Press, 1990, p. 110.
[6] F. HOYLE, *Astronomy and Cosmology*, W.H. Freeman & Co, San Francisco, 1975, p. 50.
[7] M. GELLER UND J. HUCHRA, *Mapping the Universe*, Science 17 November 1989, pp. 897-903.