

URKNALL IM LABOR

DIETER B. HERRMANN

URKNALL IM LABOR

WIE TEILCHENBESCHLEUNIGER DIE NATUR
SIMULIEREN

 Springer

ISBN 978-3-642-10313-1 e-ISBN 978-3-642-10314-8
DOI 10.1007/978-3-642-10314-8
Springer Heidelberg Dordrecht London New York

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Einbandentwurf: eStudio Calamar S.L.

Gedruckt auf säurefreiem Papier

Springer ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media (www.springer.com)

Vorwort	vii
1 Einleitung	1
2 Sterne und Atome	15
3 Das Weltall als Ganzes – kosmologische Hypothesen	67
4 Schnelle Teilchen – im Himmel und auf Erden	123
5 Der Kosmos als Labor – das Labor als Kosmos	159
6 Wann werden wir die Weltformel finden?	213
<i>Glossar</i>	225
<i>Quellenverzeichnis der Abbildungen</i>	235
<i>Literatur</i>	237
<i>Personenverzeichnis</i>	241

VORWORT

Wer sich heutzutage für Wissenschaft interessiert, ist einer Flut von Informationen ausgesetzt, deren Bruchstücke sich nur schwer zu einem Gesamtbild vereinigen lassen. Selbst Fachleute klagen über den extremen Spezialisierungsgrad der Forschung. Die volkstümliche Definition des Spezialisten, der immer mehr von immer weniger weiß, ist durchaus wirklichkeitsnah. Doch diese für die Entwicklung der Wissenschaft zweifellos notwendige Tendenz hat auch umgekehrt zur Folge, dass immer mehr Menschen von immer weniger wissen. Wer die Printmedien sorgfältig verfolgt, stößt auch oft auf Widersprüche. Da wird eine angebliche Entdeckung gemeldet, und schon wenige Wochen später kann man das Gegenteil lesen. „Wasser auf dem Mond“ – „Doch kein Wasser auf dem Mond“. Dann verursacht irgendein Forscher plötzlich eine Debatte über „Betrug in der Wissenschaft“. Gefälschte Messergebnisse sollten der eigenen Karriere dienen oder bei der Einwerbung von finanziellen Mitteln behilflich sein. Und schon beginnt in allen Medien ein Diskurs, in dem Fälschungen wissenschaftlicher Resultate bis in die Antike hinein ans Tageslicht kommen. Der Laie fragt sich, ob Unehrlichkeit vielleicht eine der unausrottbaren Untugenden von Forschern darstellt. Schließlich kommen auch noch wirtschaftliche Interessen und Lobbygruppen ins Spiel (wie z. B. in der Pharmazeutischen Industrie) und das hehre Bild von Wissenschaft als Suche nach der Wahrheit gerät bei vielen ins Wanken. Haben Wissenschaftler tatsächlich stets nur das Wohl der Menschen im Auge oder sind sie nicht oft genug auch willfährige Diener verbrecherischer politischer Ziele, wie bei der Entwicklung von Atom- und Wasserstoffbomben oder bei der Massenvernichtung von Menschen in den Konzentrationslagern des Nazireiches?

Tatsächlich ist Wissenschaft eine außerordentlich komplexe Aktivität des Menschen mit zahlreichen Aspekten. Ihre Ergebnisse wirken in alle Bereiche unseres Lebens hinein. Das wertfreie Resultat einer wissenschaftlichen Erkenntnis wird erst in der von Wissenschaftlern meist wenig beeinflussten Anwendung zum Segen oder Fluch.

Da heutzutage alle Menschen allein durch ihre Steuergelder zur Finanzierung von Wissenschaft beitragen, haben sie auch ein Recht darauf, über wissenschaftliche Forschungen aufgeklärt zu werden.

Das vorliegende Buch versucht den Spagat zwischen verständlicher Darstellung und Tiefenauslotung bestehender Zusammenhänge bei der Erforschung des Weltalls. Gerade auf diesem Gebiet werden gegenwärtig weltweit außerordentliche Anstrengungen unternommen. Neuartige Beobachtungsinstrumente für die Weiten des Universums, aber auch gigantische Mikroskope für den subatomaren Kosmos wirken eng zusammen mit den Theoretikern, deren Denkwelten der experimentellen Absicherung bedürfen. Deshalb will dieses Buch aus „verschiedenfarbigen“ Mosaiksteinchen ein Bild zusammensetzen, dessen Konturen das Wesen von Wissenschaft erkennen lassen. Der Verfasser hofft zugleich, dass die Lektüre des Textes für die Leserinnen und Leser neben der Vermittlung von Erkenntnissen auch das Vergnügen bereiten kann, den verschlungenen und oftmals auch spannenden Pfaden der Forschung zu folgen.

Berlin, im Winter 2009

Dieter B. Herrmann

EINLEITUNG

KOSMISCHE VORGÄNGE UND IRDISCHE EXPERIMENTE

In einem modernen Chemielaboratorium zischt und dampft es aus Erlmeierkolben und Reagenzgläsern, in den Labors der Physik ermitteln Frauen und Männer in weißen Kitteln mit komplizierten Apparaturen, Spannungsquellen und langen Kabeln das Verhalten von Objekten, die man vielleicht gar nicht sieht. So oder ähnlich geht es in den Werkstätten der Naturwissenschaft zu und jedem Schüler ist heute bekannt, dass man Experimente durchführen muss, um Objekte und ihr Verhalten in Abhängigkeit von unterschiedlichen Einflussgrößen zu studieren. Dabei wird eine genau definierte Situation hergestellt, bei der man bestimmte Größen messbar verändert, um daraus abzuleiten, welche Folgen dies für das zu untersuchende Objekt hat. Damit der Experimentator sicher sein kann, dass die beobachteten Veränderungen tatsächlich von der variablen Einflussgröße hervorgerufen werden, muss er außerdem sorgfältig darauf achten, dass keine anderen Effekte das Verhalten des zu untersuchenden Objekts mit bestimmen. Solche „Störgrößen“ müssen ausgeschaltet werden.

Ein anschauliches Beispiel, wie das Experiment zum Sprachrohr der Wahrheit wird, liefert die Beantwortung der Frage: fallen alle Körper unter der Einwirkung der Schwerkraft gleich schnell oder hängt das Verhalten ihres Falles von ihrer Masse ab? Aristoteles hatte in der

Antike unumwunden erklärt: leichte Körper fallen langsamer als schwere. Galilei im 17. Jahrhundert war von der Massenunabhängigkeit des Fallverhaltens der Körper überzeugt. Machen wir nun ein Experiment und lassen eine Eisenkugel und eine Hühnerfeder aus großer Höhe herabfallen, so würde das Ergebnis Aristoteles offensichtlich recht geben. Aber nur, weil die Versuchsbedingungen nicht sorgfältig genug überlegt waren. Sobald wir den Luftwiderstand ausschalten (d. h. eine entscheidende Störgröße beseitigen, indem wir das Experiment z. B. in einer Vakuumröhre durchführen), würden wir finden, dass beide Gegenstände – zugleich und aus gleicher Höhe losgelassen – auch zugleich am Erdboden ankommen. Die aristotelische Behauptung ist also falsch und die richtige Behauptung muss lauten: alle Körper fallen im Schwerfeld der Erde gleich schnell. Die Lufthülle der Erde ist ja kein Teil des Schwerfeldes. Dieses Experiment in einer Vakuumröhre kann jeder Physiker an jedem beliebigen Ort wiederholen und er wird dabei stets dasselbe Ergebnis finden. Naturgesetzliche Erkenntnisse sind also reproduzierbar. Findet ein Forscher ein Resultat, das durch andere unter gleichen Bedingungen nicht bestätigt werden kann, so gilt die entsprechende Aussage als wissenschaftlich nicht gesichert.

Besonders in den Naturwissenschaften, aber auch in Technik, Psychologie oder Soziologie verhelfen uns Experimente zu immer neuen Erkenntnissen. Mit ihrer Hilfe können Modelle oder sogar Theorien entwickelt werden. Umgekehrt kann man bestehende Theorien auch durch Anwendung der experimentellen Methode auf ihre Richtigkeit überprüfen. Aber Beobachtungen weisen nicht auf direktem Wege zu den Theorien. So konnte Galilei zwar mittels Experimenten feststellen, dass alle Körper unabhängig von ihrer Masse gleich schnell fallen, doch eine Theorie, die ihm gesagt hätte, warum dies so ist, ergab sich daraus nicht. Erst später wurde verständlich, dass die Masse zwei wesentliche Eigenschaften besitzt, nämlich jene der Schwere und jene der Trägheit. Die erstere entspricht unserem Alltagsverständnis von Masse, nämlich deren „Gewicht“. Das Gewicht wird durch die Anziehung bewirkt, welche die große Masse der Erde auf die jeweilige Probemasse ausübt (genau genommen müsste man sagen, dass die beiden Massen – Erde und Probemasse – sich gegenseitig anziehen). Die andere Eigenschaft

ist die Trägheit von Masse, ihr Bestreben, sich Änderungen ihres Bewegungszustandes zu widersetzen. Deshalb sind Kräfte erforderlich, um solche Änderungen zu bewirken und zwar um so größere, je größer die Masse ist. Träge und schwere Masse sind zahlenmäßig identisch. Deshalb fallen letztlich alle Körper unabhängig von ihrer Masse gleich schnell. Vergleichen wir eine Masse von einem Kilogramm mit einer anderen von drei Kilogramm: Auf die dreimal große Masse wirkt die Schwerkraft mit dreimal so großem Betrag wie auf jene von einem Kilogramm. Da aber auch die Trägheit der dreimal so schweren Masse dreimal so groß ist, bedarf es gerade einer dreimal so großen Kraft, um die gleiche Änderung des Bewegungszustandes hervorzurufen. Lassen wir also beide Massen im Vakuum aus gleicher Höhe fallen, so erfahren sie durch die Erdanziehung eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung, die völlig identisch und unabhängig von der Masse der Körper ist.

Dass die Natur mit Hilfe von Experimenten befragt wird, ist eine Erregungenschaft der neuzeitlichen Naturwissenschaft. Erst seit den Tagen von Galileo Galilei und seiner Zeitgenossen kennen wir die experimentelle Methode als eines der wesentlichen Hilfsmittel der Wissenschaft bei der Erforschung der Natur. Bis dahin stützte man sich auf mehr oder weniger spitzfindige Debatten und die Aussagen von Autoritäten einer längst vergangenen Zeit – der Antike. Diese aber hatten keine Experimente gemacht. Das war auch nach Meinung der im Mittelalter vorherrschenden scholastischen Schule gar nicht erforderlich. Theoretische Diskurse auf der Grundlage der Logik des Aristoteles über das Für und Wider bestimmter Behauptungen galten als völlig hinreichend, um zuverlässig festzustellen, ob sie richtig oder falsch waren.

Deshalb ist es auch nicht verwunderlich, dass die ersten Schritte der experimentellen Wissenschaft von den Scholastikern scharf bekämpft wurden – besonders wenn deren Ergebnisse ihren eigenen Schlussfolgerungen zuwiderliefen. Doch die mit Galilei aufkeimende Experimentalwissenschaft machte auf die Dauer der Scholastik den Garaus, wenn auch in einem mühevollen, langwierigen und mehrfach sogar opferreichen Prozess.

Heute ist das Experiment ein unentbehrliches methodisches Gut der Wissenschaft. Experimente spielen sogar die Rolle eines zuverlässigen

Richters gegenüber jedweder Spekulation oder Hypothese. Eine Theorie kann noch so ausgeklügelt sein, noch so logisch oder plausibel erscheinen – ein einziges Experiment, das ihr widerspricht, bringt sie unweigerlich zu Fall! Allerdings stehen sich Experiment und Theorie nicht ganz so diametral gegenüber wie es scheinen mag. Auch die Vorbereitung eines Experiments basiert, ebenso wie seine Deutung und Auswertung, auf theoretischen Prämissen, die oft als stillschweigende oder für selbstverständlich gehaltene Annahmen gemacht werden. Man bezeichnet solche Annahmen als Postulate oder Axiome. Das ändert jedoch nichts daran, dass „Ausprobieren“ eines Verhaltens etwas anderes ist als Nachdenken über dasselbe Verhalten. Letztlich müssen beide im Forschungsprozess eine Einheit bilden.

Doch wie steht es um die Astronomie? Sie scheint in dieser Hinsicht schwerwiegend benachteiligt zu sein. Ihr Gegenstand sind Objekte, die sich in großen Distanzen von uns befinden und mit denen die Forscher folglich nicht experimentieren können. Es ist grundsätzlich ausgeschlossen, einen fern im kosmischen Raum befindlichen Himmelskörper künstlichen Bedingungen zu unterwerfen und sein Verhalten dann zu studieren. Zumindest während der längsten Zeit ihrer Geschichte kannte die Astronomie keinerlei experimentellen Umgang mit den Objekten ihrer Forschung. Erst seit dem Aufkommen der Raumfahrt ab 1957 hat sich dies für einige wenige Objekte in vergleichsweise geringen Distanzen verändert. So haben wir inzwischen Mondgestein in irdische Labors geholt oder auf dem Mars Materialproben mit Robotern untersucht und die Venusatmosphäre an Ort und Stelle analysiert, um nur einige von allerdings wenigen Beispielen herauszugreifen. Schon der nächste Fixstern oder gar tausende Lichtjahre entfernte Gas- und Staubnebel, von fernen Galaxien ganz zu schweigen, entziehen sich auf unabsehbare Zeit – höchstwahrscheinlich sogar für immer – jedwedem experimentellen Zugriff.

Bei genauerer Betrachtung erweist sich diese Aussage zwar als formal richtig aber dennoch zugleich als ein Trugschluss. Experimente in irdischen Laboratorien haben nämlich sehr viel mit den Vorgängen in den fernsten Gegenden des Universums zu tun, weil die Naturgesetze – nach allem, was wir heute wissen – auch dort gültig sind, wo wir keine Gelegenheit haben, die ihnen ausgesetzten Körper auf direktem Weg

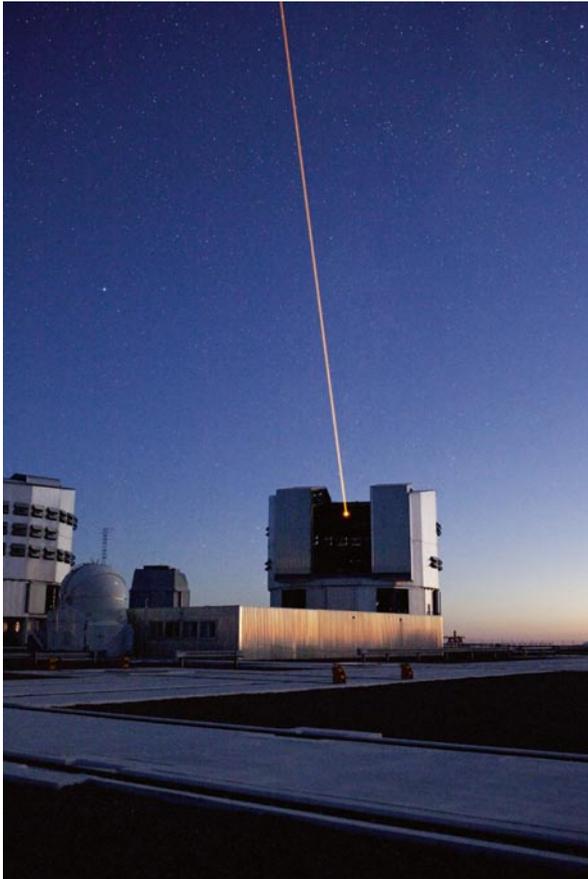


Abb. 1.1 Das Teleskop – hier die Kuppel eines der vier Riesenspiegel der ESO auf dem Cerro Paranal in Chile – gilt als das Synonym astronomischer Forschungsmethodik: statt aktiv zu experimentieren vermag der Astronom vermeintlich nur passiv zu beobachten

zu untersuchen. Es gilt das Postulat der Universalität der Naturgesetze. Zwar kann man nicht streng beweisen, dass es sich tatsächlich so verhält, doch steht dieser Denkansatz mit keiner unserer inzwischen zahlreichen Erkenntnisse im Widerspruch.

Schon in der Antike haben große Denker stillschweigend angenommen, dass die Lehrsätze der Geometrie auch bis zu Mond und Sonne gelten. Andernfalls hätte Aristarch das Verhältnis von Mond- zu



Abb. 1.2 Sternengewimmel der südlichen Milchstraße in der Gegend um das Sternbild „Kreuz des Südens“

Sonnentfernung nicht aus Dreiecksberechnungen bestimmen können. Er wusste schließlich, dass sie auf ebenen Flächen hier auf der Erde entdeckt worden waren. Später ging man dazu über, auch physikalische Gesetze vom irdischen Geschehen auf das Weltall zu übertragen. Denken wir nur an die bekannte Anekdote, nach der Newton beim Anblick eines fallenden Apfels auf die Idee gekommen sein soll, in diesem Vorgang den Schlüssel für die Bewegung des Mondes zu suchen. Gleichgültig, ob es sich bei dieser Erzählung nun um eine Legende handelt oder nicht: der Kern besteht in der Annahme Newtons, dass die den Massen innewohnende Schwere den Fall der Körper auf der Erde ebenso bestimmt, wie die Bewegung der Himmelskörper auf ihren Bahnen. Die Fallgesetze auf der Erde lassen sich experimentell ermitteln. Dies hat Galilei mit seinen Versuchen an schiefen Ebenen getan. Newton übertrug die gefundenen Resultate gedanklich auf die Himmelskörper. Durch die Annahme der Existenz einer Erde und „Himmel“ verbindenden einheitlichen Physik konnte er die Bewegung des Mondes behandeln, als wenn dieser Himmelskörper selbst Gegenstand expe-

rimenteller Untersuchungen gewesen wäre. Die Probe aufs Exempel lieferte die von Newton entwickelte Himmelsmechanik, die tatsächlich solche Erscheinungen wie Fall und Wurf auf der Erde und die Bewegung des Mondes auf seiner Bahn um die Erde (und mit dieser um die Sonne) gleichermaßen zutreffend zu beschreiben vermochte. Deshalb wurde auch die Entdeckung des Planeten Neptun im Jahre 1846 als ein unvergleichlicher Triumph der Wissenschaft gefeiert. Niemand hätte nach diesem Planeten am Ort seiner Entdeckung gesucht, wenn er nicht zuvor förmlich am Schreibtisch berechnet worden wäre. Geringfügige Abweichungen der Bahnbewegung des 1781 entdeckten Uranus hatten u. a. den französischen Astronomen Leverrier auf die Idee gebracht, dass ein bislang noch unbekannter weiterer Planet diese Störungen durch seine Anziehungskraft hervorruft. So gelang es Leverrier unter Anwendung der Gesetze der Himmelsmechanik, den „Störenfried“ rein rechnerisch auszumachen und den Ort zu bezeichnen, an dem nach ihm zu suchen wäre. Johann Gottfried Galle fand den Planeten dann tatsächlich 1846 beim Blick durchs Teleskop der Sternwarte in Berlin. Das war ein großer Erfolg zugunsten der Annahme, das newtonsche Gravitationsgesetz sei universell gültig. Es gab nämlich damals auch Gelehrte, die in den Abweichungen der Uranus-Bewegung von der theoretisch zu erwartenden Bewegung einen Hinweis darauf sahen, dass die Gesetze der Mechanik in jenen großen Entfernungen der Uranus-Bahn einfach keine Gültigkeit mehr hatten.

Die Annahme einer Himmel und Erde verbindenden Physik war zu Newtons Zeiten noch ein sehr kühner Gedanke. Damit wird ein anderer Grundzug naturwissenschaftlicher Forschung deutlich, dem wir in diesem Buch noch oft begegnen werden: ohne Ideen und Phantasie geht es nicht. Hätte Newton nicht die Intuition besessen, einen fallenden Apfel mit dem die Erde umlaufenden Mond gedanklich „unter einen Hut“ zu bringen, dann hätte er aus Galileis Versuchen an der schiefen Ebene auch nichts über die Bewegung des Mondes gelernt. In der Antike hatte Aristoteles immerhin gelehrt, dass Himmel und Erde sich grundsätzlich voneinander unterscheiden. Man sprach zwar damals noch nicht von Naturgesetzen, aber es erschien völlig klar, dass es auf der „Welt unter dem Monde“, der sublunaren Welt, gänzlich anders zugeht als in

der Welt jenseits davon, der supralunaren Welt. Das konnte man schon daran ersehen, dass auf der Erde alle Bewegungen geradlinig zur (vermeintlichen) Weltmitte oder von ihr weg zur Weltperipherie erfolgten. Die Himmelskörper hingegen bewegten sich auf gekrümmten Bahnen und vor allem niemals zur Weltmitte, denn dann müssten sie alle auf die Erde herunterfallen. Die Idee von Newton war nach ihrer durch Beobachtungen erfolgten Bestätigung gleichsam der naturwissenschaftliche Beweis, dass Aristoteles' Aussage falsch sein musste.

Niemand hat bis heute eine Materialprobe von der Sonne auf die Erde geholt und sie in einem chemischen Laboratorium untersucht. Dennoch wissen wir, woraus die Sonne besteht. Und auch dies hat unmittelbar etwas mit Experimenten in irdischen Labors zu tun. Es ging um die Zerlegung des weißen Lichts in seine Bestandteile, die Spektralfarben. Dazu wurden Glasprismen benutzt, die infolge unterschiedlich starker Brechung der verschiedenen Farben zu einer Auffächerung des weißen Lichts in ein von Rot nach Blau reichendes Farbband (Spektrum) führten. William Hyde Wollaston, ein britischer Arzt, Chemiker und Physiker, kam nun zu Beginn des 19. Jahrhunderts auf die Idee, einen schmalen Spalt vor die Lichtquelle zu bringen. Auf diese Weise entdeckte er in den Spektren farbiger Flammen, aber auch im Sonnenspektrum farbige bzw. dunkle Linien. Brachte man z. B. Natrium (etwa in Form von Kochsalz NaCl) in eine Gasflamme und beobachtete die dadurch stark gelb strahlende Flamme im Spektroskop, so fand man zwei intensive Linien im gelben Bereich des Spektrums. Doch genau an jener Stelle, wo sich diese Doppellinie im Spektrum der Natriumflamme befand, lag im Sonnenspektrum eine dunkle Doppellinie. Sollte das Zufall sein? Der deutsche Physiker Gustav Robert Kirchhoff und sein Chemiker-Kollege Robert Wilhelm Bunsen wollten es genauer wissen. Sie brachten vor die Spaltöffnung ihres auf die Sonne gerichteten Spektroskops eine Natriumflamme. Dadurch würde die dunkle Doppellinie im Sonnenspektrum wahrscheinlich etwas heller erscheinen, vermuteten sie. Doch genau das Gegenteil trat ein: sie wurde noch dunkler als zuvor. Jetzt war Phantasie gefragt, um dieses scheinbar völlig widersinnige Ergebnis zu interpretieren. Kirchhoff zog aus dem unerwarteten Resultat des Experiments den Schluss, dass die Natriumdämpfe Strahlen der-

selben Wellenlänge verschlucken (absorbieren), die sie im glühenden Zustand aussenden (emittieren). Damit hatte er zugleich auch eine Erklärung für das Vorkommen der dunklen Linien im Sonnenspektrum: in der äußeren Hülle der Sonne befinden sich Substanzen, die aus dem vom Sonneninneren herkommenden Licht genau jene Wellenlängen verschlucken, die sie sonst aussenden würden. Also musste es in der gasförmigen Hülle der Sonne auch Natrium geben. Außerdem wies die Sonnenhülle offenbar eine niedrigere Temperatur auf als das Sonneninnere. Das war eine Erkenntnis von höchst weitreichender Bedeutung. Mit diesem Experiment und seiner Deutung hatten Kirchhoff und Bunsen nämlich die Spektralanalyse begründet. „Chemische Analyse durch Spectralbeobachtungen“, hieß denn auch der Titel ihrer bahnbrechenden Veröffentlichung aus dem Jahre 1861. Den beiden Forschern war etwas ganz Außerordentliches gelungen: man konnte jetzt „per Distanz“ chemische Analysen durchführen, Aussagen über die chemische Zusammensetzung von Objekten machen, die sich weit draußen und für die Forscher unzugänglich im Kosmos befanden. Verlässlich allerdings konnten die Ergebnisse solcher Analysen nur sein, wenn „da draußen“ tatsächlich dieselben Naturgesetze gelten wie hier auf der Erde, wenn sich das Natrium im Weltall nicht von jenem unterscheidet, das Bunsen und Kirchhoff im Labor zur Färbung ihrer Flammen benutzt hatten. Der deutsche Astrophysiker Karl Friedrich Zöllner hat diesen Zusammenhang wenige Jahre später unmissverständlich formuliert, indem er klarstellte, die gesamte Astrophysik beruhe auf der Tatsache, „dass die allgemeinen und wesentlichen Eigenschaften der Materie im unendlichen Raum überall dieselben seien“ [1]. In der Tat: wenn dies nicht der Fall wäre, könnten wir mit den Beobachtungsdaten über kosmische Körper nichts anfangen.

Der astronomische Beobachter erweckt zwar im Gegensatz zum praktisch arbeitenden Physiker oder Chemiker im Labor den Eindruck eines passiven Zuschauers. Doch in Wirklichkeit extrahiert er aus seinen gezielt vorbereitenden Beobachtungen Erkenntnisse, die auf Experimenten in irdischen Laboratorien beruhen. Experimentelle Resultate stellen gleichsam den Brückenschlag zu jenen Objekten und Phänomenen in unüberwindbaren Distanzen dar, die sich dem direkten



Abb. 1.3 Mit diesem Spektroskop analysierte Kirchhoff im 19. Jahrhundert das Spektrum der Sonne. Damit gelang ihm gemeinsam mit Bunsen ein wesentlicher Sprung vom irdischen Labor in kosmische Distanzen

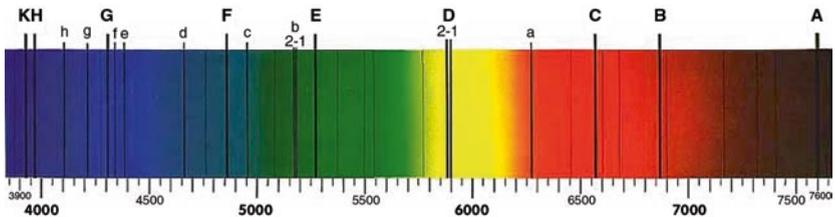


Abb. 1.4 Der Ausschnitt aus dem Spektrum des Sonnenlichts im sichtbaren Bereich von blau (*links*) bis rot (*rechts*) lässt zahlreiche dunkle Linien erkennen. Diese von Fraunhofer entdeckten und von Kirchhoff erklärten Absorptionslinien geben Hinweise auf die chemische Zusammensetzung der Sonnenatmosphäre

Zugriff entziehen. Diese Erkenntnis wird in der gesamten neueren Geschichte der Astronomie sichtbar und drängt sich immer wieder auf, wenn wir deren Resultate nicht nur oberflächlich betrachten.

Doch das ist nur die eine Seite. Man muss nämlich nicht unbedingt das Objekt selbst zur Verfügung haben, um etwas darüber in Erfahrung zu bringen. Was wir über die Körper des Weltalls bereits wissen oder annehmen, können wir umgekehrt gegebenen Falls in irdischen Experimenten „nachstellen“ und somit überprüfen. Die Beobachtungen und deren Interpretationen können uns durchaus veranlassen, von den jeweiligen Objekten Modelle zu konstruieren, die den Naturobjekten in wesentlichen Eigenschaften gleichen oder ihnen wenigstens nahe kommen, mit ihnen also vergleichbar sind. Ein solches Modell kann dann unterschiedlichen Bedingungen unterworfen werden und schon haben wir ein „astronomisches Experiment“ durchgeführt. „Das Wesen eines Modells besteht in dem tertium comparationis in Bezug auf Sein Urbild“, schreibt der Astronom Joseph Meurers [2] und meint damit die Vergleichbarkeit von Modell und Urbild. Meurers hat sich die Mühe gemacht, in der vorhandenen Literatur nach solchen „indirekten Experimenten“ zu suchen und in seinem Buch „Astronomische Experimente“ eine Fülle von Beispielen aufgeführt, in denen auf diese Weise wichtige Erkenntnisse über astronomische Objekte gewonnen wurden. Die ersten solcher Versuche gehen bis in das letzte Viertel des 19. Jahrhunderts zurück und umfassen alle Bereiche der Astronomie von der Entstehung kosmischer Systeme bis zur Physik der Sonne, von der Herkunft der Mondformationen bis zur Deutung von Kometenspektren. Dabei handelte es sich also keineswegs nur um eine zeitweilige Modeerscheinung.

Gerade die immer weiter verbesserten experimentellen Möglichkeiten der Physik gestatten eine zunehmende Ausweitung von Modellbildungen und deren Studium unter kontrollierten Bedingungen. So wissen wir z. B. heute, dass die Planeten unseres Sonnensystems – und offenbar auch anderer Sonnensysteme – aus kleineren Körpern hervorgehen, den so genannten Planetesimals. Diese bewegen sich in einer rotierenden flachen Staubscheibe um die im Zentrum dieser Scheibe

entstehende Sonne. Doch wie bilden sich die Planetesimals in einer „präplanetaren Scheibe“ heraus, die anfänglich nur aus mikroskopisch kleinen Staubteilchen und aus Gas besteht? Können diese winzigen Partikel tatsächlich zu kilometergroßen Brocken verklumpen? Darüber lässt sich trefflich spekulieren, zumal bei den entsprechenden Vorgängen vielerlei Einflüsse gleichzeitig eine Rolle spielen. Aus diesem Grund haben sich Wissenschaftler der Universitäten Braunschweig und Münster sowie vom Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg entschlossen, das Verhalten von Staubpartikeln unter dem Einfluss von Gas und Strahlung experimentell zu untersuchen. Dabei wollen die Forscher herausfinden, wie es zur Gerinnung von Staubteilchen zu Staubklumpen und schließlich zur Ausbildung größerer Brocken kommt. Aggregate aus Milliarden winziger Quarzkügelchen werden zu diesem Zweck mit typischen Geschwindigkeiten von bis zu zehn Metern pro Sekunde aufeinander geschossen, um so die Haftungseigenschaften der Klumpen zu studieren. Ebenso wird der Frage nachgegangen, in welcher Weise sich die Zusammensetzung der Klumpen bei höheren Temperaturen verändert. Aus diesen Versuchen erhofft man sich auch Resultate, die sich bei der Beobachtung präplanetarer Scheiben mit astronomischen Teleskopen überprüfen lassen.

So greifen also Experimente, Beobachtungen und Interpretation auf vielfältige Weise ineinander – und dies in einer Wissenschaft, die man oft als den Prototyp einer Disziplin bezeichnet hat, in der man sich mit allen möglichen Mitteln der Wahrheitsfindung nähert, nur nicht durch Experimente. Selbst Gedankenexperimente sind mitunter von derart zwingender Logik, dass man sich deren praktische Ausführung eigentlich ersparen könnte. So bewies z. B. Galilei bereits durch ausschließlich logische Überlegung, dass schwere Körper nicht schneller fallen als leichte. In Galileis „Unterredungen und mathematischen Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend“ (1638) fragt Salviati (alias Galilei) seinen geistigen Widersacher Simplicio: „Wenn wir zwei Körper haben, deren natürliche Geschwindigkeit verschieden ist, so ist es klar, wenn wir den langsameren mit dem geschwindigeren vereinigen, dieser letztere von jenem verzögert werden müsste, und der langsamere müsste vom schnelleren beschleu-

nigt werden. Seid Ihr hierin mit mir einverstanden?“. Worauf Simplicio erklärt: „Mir scheint diese Konsequenz völlig richtig“. Nun aber argumentiert Salviati:

Aber wenn dies richtig ist und wenn es wahr wäre, dass ein großer Stein sich z. B. mit 8 Maß Geschwindigkeit bewegt und ein kleinerer Stein mit 4 Maß, so würden beide vereint eine Geschwindigkeit von weniger als 8 Maß haben müssen; aber die beiden Steine zusammen sind doch größer, als jener größere Stein war, der 8 Maß Geschwindigkeit hatte; mithin würde sich nun der größere langsamer bewegen als der kleinere; was gegen Eure Voraussetzung wäre. Ihr seht also, wie aus der Annahme, ein größerer Körper habe eine größere Geschwindigkeit als ein kleinerer Körper, ich Euch folgern lassen konnte, dass ein größerer Körper sich langsamer bewege als ein kleinerer... Lasst uns also feststellen, dass große und kleine Körper ... mit gleicher Geschwindigkeit sich bewegen [3].

Gegenwärtig schicken wir uns an, das größte, aufwändigste und tiefgründigste, aber auch teuerste Experiment anzustellen, das jemals zur Untersuchung des Kosmos unternommen wurde. Es geht um nichts Geringeres, als den „Urknall“ selbst, aus dem das gesamte Universum einst hervorgegangen ist. Er soll nachgeahmt werden, wenn auch nur in kleinstem Maßstab. Darüber wird in diesem Buch berichtet werden. Um zu verstehen, was es mit diesem Experiment auf sich hat und was wir von ihm erwarten dürfen, müssen wir allerdings zunächst tief in die Vergangenheit eintauchen, sowohl in jene der Forschungsgeschichte als auch in jene des Weltalls. Denn nur als deren Ergebnis lässt sich der „Urknall im Labor“ letztlich verstehen. Außerdem wird sich zeigen, dass hochkomplexe moderne Experimente aus einer unübersehbaren Menge von wissenschaftlichen Disziplinen gespeist werden, die ursprünglich scheinbar wenig miteinander gemein hatten. Unser Exkurs wird uns deshalb durch zahlreiche wissenschaftliche und technische Disziplinen führen, und wir werden viele Ergebnisse kennen lernen, die von der Wissenschaft im Lauf ihrer Geschichte zusammengetragen wurden.

Manchmal wird der Leser sich fragen, was all diese Dinge miteinander zu tun haben. Wenn wir aber schließlich auf die wissenschaftlichen Zielstellungen des Large Hadron Collider zu sprechen kommen (siehe S. 168ff), wird sich zeigen, dass all die vielfältigen Details in das größte Experiment aller Zeiten einmünden, den Versuch der „Weltmaschine“, dem Kosmos seine tiefsten Geheimnisse zu entlocken.

STERNE UND ATOME

DER LANGE WEG ZUM VERSTÄNDNIS DER STERNE

Wenn wir mit unseren Augen in einer wolkenlosen Nacht den gestirnten Himmel betrachten, so erkennen wir nichts als Lichtpunkte, mehr oder weniger helle, unterschiedlich gefärbte, aber ausdehnungslose leuchtende Gebilde. Doch worum handelt es sich dabei, worin besteht ihr eigentliches Wesen? Schon in den ältesten Zeiten menschlichen Nachdenkens über die Natur stellte man sich diese Frage, freilich ohne die geringste Aussicht auf eine verlässliche Antwort. Dennoch war man um Deutungen nicht verlegen. Religiöse Vorstellungen, mythische Ideen und Mutmaßungen, aber auch Alltagserfahrungen mischten sich zu einem vorwissenschaftlichen Denkgemälde, das mit dem, was wir heute wissenschaftliche Erkenntnis nennen, noch nichts zu tun hatte.

Für die Ägypter galten die Sterne als göttliche Wesen, die zugleich den Wohnsitz der Toten darstellten. Im alten Mesopotamien, dem Ursprungsland der abendländischen Wissenschaft, betrachtete man die Sterne als Lampen, die am Inneren der gewaltigen Himmelskuppel befestigt waren. Der große griechische Philosoph und Sokrates-Schüler Platon hielt die Sterne für göttlich. Zwar sollten sie aus den vier Elementen Wasser, Erde, Feuer und Luft bestehen, aber zusätzlich den belebenden Urstoff der göttlichen Seele enthalten, der allem Irdischen vorenthalten war. Die Pythagoreer wiederum, Anhänger der Ideen des Pythagoras

von Samos, von denen die Zahl als das Wesen aller Dinge angesehen wurde, sprachen den Sternen bereits eine kugelförmige Gestalt zu. Aber auch dies war keineswegs eine Erkenntnis im heutigen Sinn, sondern lediglich eine Folge der mathematischen Ästhetik der Pythagoreer, bei denen die Kugel als vollkommenster aller geometrischen Körper galt.

Bereits in der Antike finden wir jedoch auch Ansätze von rationaler Betrachtung. So etwa bei Thales von Milet, der die Sterne zu den meteorologischen Phänomenen zählte, sie also mit Regentropfen, Schneeflocken und Blitzen in eine Schublade steckte. Auch die griechischen Atomisten verzichteten auf mythische Deutungen. Für sie waren die Sterne glühende Felsmassen in großen Entfernungen – immerhin eine keineswegs absurde Spekulation. Die Palette der Deutungsangebote war also groß – von der Wirklichkeit waren sie alle sehr weit entfernt.

Dessen ungeachtet hatten die Ergebnisse der antiken Denkbemühungen ein weit in die Zukunft reichendes Haltbarkeitsdatum. Was damals formuliert wurde, galt als unumstößliche Wahrheit – fast zwei Jahrtausende hindurch. Das hing mit dem Niedergang der antiken Kultur einerseits, aber auch mit der allgemeinen gesellschaftlichen Entwicklung andererseits zusammen. Hätten nicht die Araber nach dem Zerfall der griechischen Hochkultur deren Schätze bewahrt (und in einem gewissen Umfang auch weiter entwickelt) – wir wüssten heute wahrscheinlich kaum noch etwas von jenen ersten großen Wissenschaftsentwürfen der Vergangenheit.

In der europäischen Renaissance vollzog sich jedoch eine förmliche Wiedergeburt der antiken Wissenskultur, die auf den großen gesellschaftlichen Umbrüchen jener Epoche fußte. Sie nahm von Italien ihren Ausgang, in dem die Städtebildung am weitesten fortgeschritten war und die Kontakte zum arabischen Raum, aber auch zu den einstigen Stätten antiker Hochkultur besonders eng gewesen sind. Die Bewegung der „Wiedergeburt“ (der Antike) ergriff schließlich ganz Europa. Eine bedeutende Rolle dürften in diesem Prozess die Herausbildung von Handwerk und Handel gespielt haben. Sie bewirkten ein neu erwachendes und sehr praktisches Interesse an Wissenschaft. Da sich der Handel zunehmend auf dem Wasserweg vollzog, die Entdeckung neuer Kontinente und ihrer Schätze eingeschlossen, gewann auch die

Orientierung zur See eine zuvor nie gekannte Bedeutung. Das führte auf direktem Weg zu einer neuen Aufwertung der Himmelskunde.

Namen wie Nicolaus Copernicus, Galileo Galilei und Johannes Kepler sind die geistigen Leuchttürme dieser Entwicklung. Man wagte völlig neue Denkansätze von unerhörter Kühnheit und die Protagonisten dieser Entwicklung verstrickten sich dabei oft in lebensgefährliche Konflikte, weil das überkommene Weltbild längst zum Bestandteil der Ideologie des herrschenden Klerus geworden war.

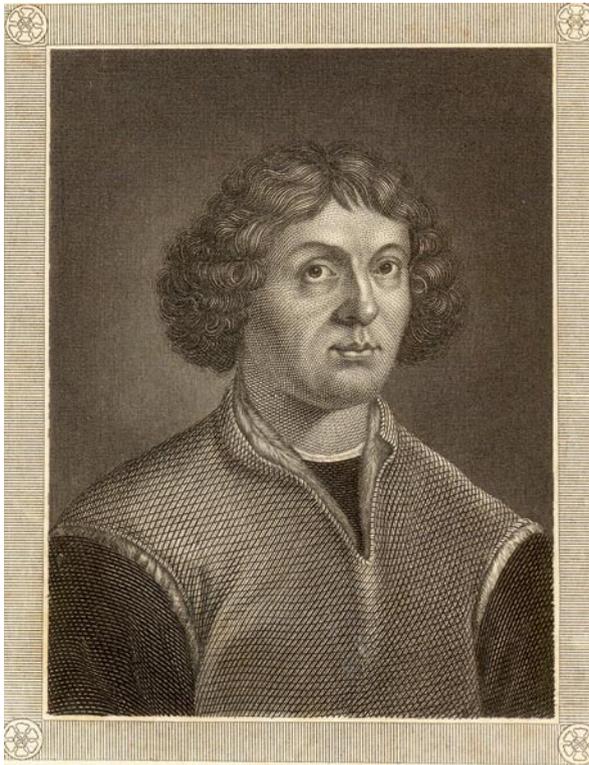


Abb. 2.1 Nicolaus Copernicus (1473–1543). Ihm verdanken wir den ersten großen Durchbruch zum modernen astronomischen Weltbild. In seinem 1543 erschienenen Hauptwerk „De revolutionibus orbium coelestium“ (Über die Umschwünge der himmlischen Kreise) kam er zu dem Resultat, dass nicht die Erde, sondern die Sonne in der Mitte der Welt steht (vgl. auch S. 73f)

In diesem Zusammenhang kamen auch neue Spekulationen über die Welt der Sterne auf. Kepler vertrat die Ansicht, dass nicht alle Sterne gleich weit vom Weltzentrum entfernt sein müssten, wie dies seit der Antike angenommen worden war. Noch ungestümer waren die Visionen des Dominikanermönchs Giordano Bruno: er sah in den Sternen sogar weit entfernte Sonnen! Doch auch das waren noch keine Ergebnisse von Wissenschaft, ungeachtet der Tatsache, dass wir Giordano Bruno aus heutiger Sicht recht geben müssen. Zudem hätte auch Bruno nicht sagen können, was denn die Sonne eigentlich ist. Es dauerte vielmehr noch dreieinhalb Jahrhunderte, ehe sich auf diesem Gebiet ein grundlegender Wandel anbahnte. Bis dahin waren aber viele andere neue Erkenntnisse gewonnen worden, die sich nun zu einem neuen Gesamtbild zusammenführen ließen. Dazu zählen u. a. die naturphilosophischen Spekulationen des jungen Immanuel Kant, der 1755 seine bahnbrechende Schrift „Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels“ veröffentlicht hatte. Darin hatte er erstmals den bemerkenswerten Versuch gewagt, Sterne nicht als von Anbeginn vorhandene, sondern als *gewordene* Objekte zu beschreiben, die aus fein verteilter Materie durch Zusammenballung entstehen – unsere Sonne eingeschlossen.

Die ersten Entfernungen der Sterne wurden um 1837 erstmals durch exakte Messungen bekannt, womit zugleich auch die Vermutung bestätigt wurde, dass sie sich in ganz unterschiedlichen Tiefen des Raumes und nicht an einer einzigen Sphäre befinden. Dass die Lichtpunkte am Himmel etwas unserer Sonne sehr Ähnliches seien, galt um diese Zeit bereits als Allgemeingut. Die Natur der Sonne selbst aber wurde durch die Spektralanalyse aufgeklärt. Nach Kirchhoffs Deutung der dunklen Linien im Sonnenspektrum war klar: die Sonne ist eine leuchtende Kugel, die in ihrem Inneren weitaus höhere Temperaturen aufweist, als in jenen oberflächennahen Schichten, deren Strahlung wir empfangen. Sonst hätten jene dunklen fraunhoferschen Linien keine Erklärung gehabt. Doch genau diese dunklen Linien fand man auch in den Spektren weit entfernter Fixsterne. Die Sonne war offenkundig der Prototyp eines Fixsterns, nur viel näher an der Erde als diese. Schon die ersten noch ungenauen Messungen der Oberflächentemperatur der Sonne ließen erkennen, dass diese gigantische Kugel gasförmig sein musste. Die

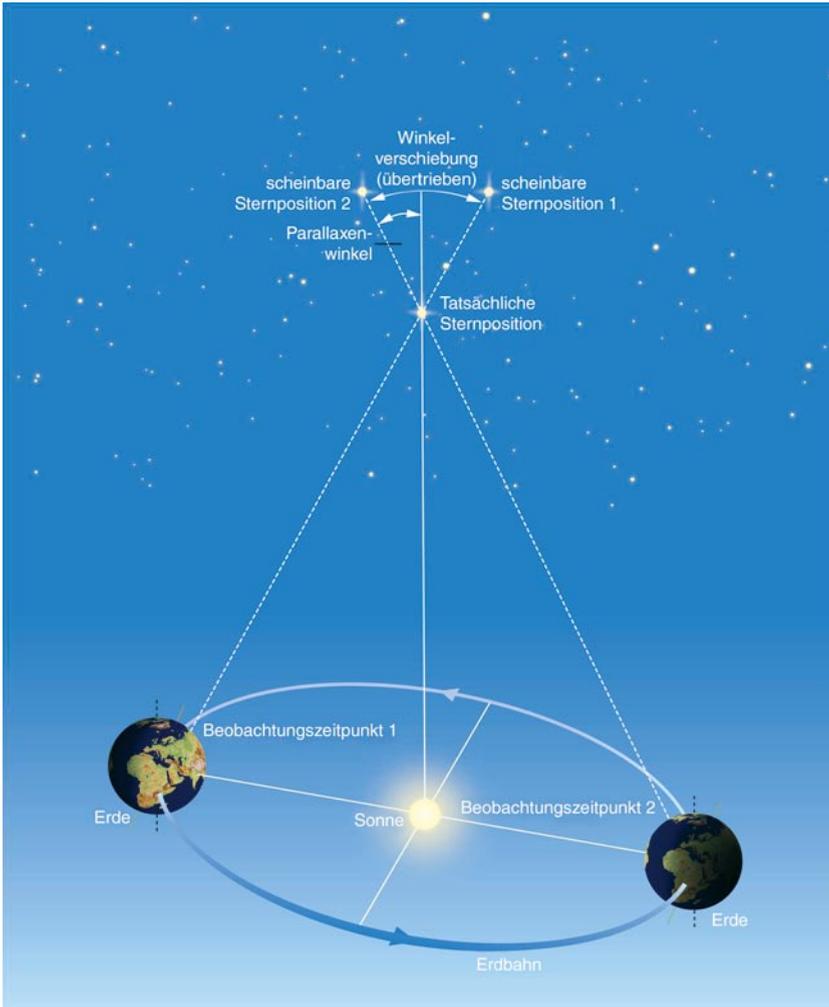


Abb. 2.2 So wurden die ersten Sternentfernungen bestimmt: man beobachtet die Position eines Sterns vor dem Himmelshintergrund zu zwei sechs Monate auseinander liegenden Zeitpunkten. Infolge der Erdbewegung um die Sonne erleidet der Stern in dieser Zeit eine scheinbare Ortsveränderung. Der halbe gemessene Winkel wird als die jährliche Parallaxe des Sterns bezeichnet. Aus der Messung dieses Winkels lässt sich durch Anwendung der Dreiecksrechnung (Trigonometrie) die Distanz des Sterns in Einheiten der Entfernung Erde–Sonne (Astronomische Einheit) ermitteln