

The background of the cover features a complex, abstract visualization of particle collisions. It consists of numerous thin, curved lines in shades of yellow, orange, and blue, radiating from a central point, set against a dark blue background with a pattern of small, light blue and red dots, resembling a particle detector's data output.

Dieter B. Herrmann

— Urknall im Labor —

Wie Teilchenbeschleuniger
die Natur simulieren



Springer

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

Glossar 225

Quellenverzeichnis der Abbildungen 235

Literatur 237

Personenverzeichnis 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 Erungenschaft 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 Staubbewegungen, von fernen Galaxien ganz zu schweigen, entziehen sich auf unabsehbare Zeit – höchstwahrscheinlich sogar für immer – jedweden 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 Sterngewimmel 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-