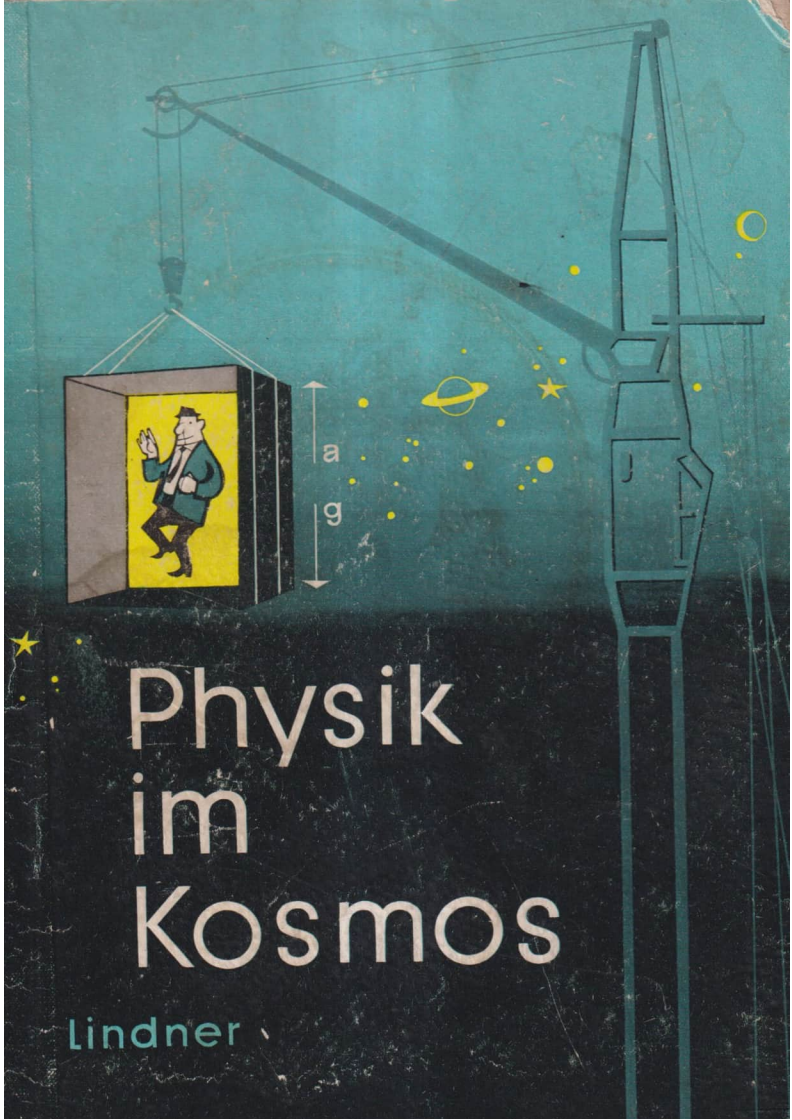


Physik im Kosmos

lindner

Physik im Kosmos

Mit 145 Bildern

VEB FACHBUCHVERLAG LEIPZIG 1964

Redaktionsschluß 9. 8. 1963

ES 20 C 3 (18 D 1, 18 D 4)

Alle Rechte vorbehalten · VEB Fachbuchverlag Leipzig

Satz und Druck: VEB Fachbuchdruck Naumburg (Saale) IV/26/14, Auftrags-Nr. 826

Veröffentlicht unter der Lizenznummer 114-210/42/64

Illustrationen: Hans Schröter, Leipzig

Zeichnungen: Johannes Liebert, Leipzig

Einband: Hans Schröter, Leipzig

INHALTSVERZEICHNIS

Vorbetrachtungen

Worum es geht 9
Das Planetensystem 10
Zur Entstehung der klassischen Mechanik 13

Die Newtonschen Axiome

Die Trägheit 15
Masse und Kraft 16
Die Bewegungsgröße 17
Wirkung und Gegenwirkung 18

Der Impulssatz

Die Erhaltung des Impulses 21
Die Raketengleichung 22
Der Drehimpuls 27
Drehung und Gegendrehung 29

Die Überwindung der Schwerkraft

Die Gravitation 31
Schwerebeschleunigung und Schwerkraft . 33
Die Kreisbahngeschwindigkeit 36
Umlaufszeiten und Synchronsatelliten . . 40
Zweierlei Jahre 41
Umlaufszeiten und Massen 43
Mondmasse und Doppelsterne 46
Ebbe und Flut 48

Die Flucht von der Erde

Die Entweichgeschwindigkeit 51
Geschwindigkeit und Flugdauer der Flucht-rakete 55
Überlagerung von Schwerefeldern 56
Flucht aus dem Sonnensystem 58
Die Flugbahnen 60
1. Die Parabelbahn 61
2. Die Hyperbelbahn 62
3. Die Ellipsenbahn 63
Zusammengesetzte Bahnen 64

Maßstab Licht

Die Lichtgeschwindigkeit 65
Entfernungen 66
Das Milchstraßensystem 69
Die Größe der Himmelskörper 71
Das Prinzip des Fernrohres 73
Die Leistung der Fernrohre 75
Der Dopplereffekt 80

Die Strahlung der Sterne

Sonnenstrahlen 84
Strahlungsmesser 86
Die scheinbare Helligkeit 88
Die absolute Helligkeit 91

Pulsierende Sterne 93
Leuchtkraft und Masse 94
Temperaturen 97
Farben 99
Der Strahlungsdruck 101

Die Substanz der Sterne

Die Spektren der Sterne 105
Die Elemente im Weltall 107
Masse und Energie 109
Ursprung der Sternenergie 111
Wolken im Weltenraum 115
1. Das interplanetare Medium 116
2. Das interstellare Medium 117
Die 21-cm-Welle 119
Die Radiofrequenzstrahlung 121
Sternentstehung 125

Die kosmische Strahlung

Die Zusammensetzung der kosmischen Strahlung 127
Der Zerfall des μ-Mesons 130
Der Ursprung der kosmischen Strahlung . 132
Die solare Strahlung 133
Die Strahlungsgürtel 136

Die relative Welt

Bezugssysteme 138
Relativgeschwindigkeiten 139
Der Michelsonsche Versuch 141
Die spezielle Relativitätstheorie 143
Die gedehnte Zeit 145
Bewegte Mesonen 147
Die Längenkontraktion 149
Die Massenzunahme 152
Relativistische Raumfahrt 153

Letzte Perspektiven

Galaxien 156
Die Nebelflucht 158
Die Ausgangsposition der allgemeinen Relativitätstheorie 160
Der gekrümmte Raum 163
Ergebnisse der allgemeinen Relativitätstheorie 165
1. Geodätische Linien 166
2. Die Periheldrehung des Merkurs . . 166
3. Die Lichtablenkung im Schwerefeld . 167
4. Die Rotverschiebung im Schwerefeld 168
Weltmodelle 170
Die expandierende Welt 172

Vorbetrachtungen

Worum es geht

Mit der Physik als der Wissenschaft von der Natur hat sich der Mensch ein großes Ziel gesteckt. Er will die Natur kennenlernen in all ihren Einzelheiten, eindringen in ihre kleinsten und intimsten Bezirke und sie zugleich in ihren größten, überhaupt erreichbaren Dimensionen erfassen. Die Physik setzt der Erkenntnis keine Grenzen und scheut vor keinem Phänomen zurück. Sie kennt nur eine Autorität: die Tatbestände und das Verhalten der Wirklichkeit, der sich der Mensch gegenübersieht. Frei von Pietät und Konvention macht sie Gebrauch von allen nur verfügbaren Denkmöglichkeiten und erkennt allein die Gesetze an, die sich in der Natur vorfinden und sich durch Beobachtung und Experiment bestätigen lassen. Dadurch sind diese Gesetze nichts als kristallisierte Wirklichkeit.

Im Laufe der Zeit hat es sich aber herausgestellt, daß alle diese Gesetze einen einzigen großen Zusammenhang bilden. Schon längst nicht mehr ist die Physik auf den Experimentiertisch und das Laboratorium beschränkt. Sie greift hinaus bis in die Tiefen des Weltalls mit Spiegelteleskopen, Spektrographen und künstlichen Satelliten. Sie ist unerhört neugierig, und schon ist die Zeit angebrochen, da sowjetische und amerikanische Physiker ihre Astronauten hinausschicken in den Kosmos, um seine Geheimnisse an Ort und Stelle zu ergründen. Natürlich ist man nicht so leichtsinnig, sich ungenügend vorbereitet in das Abenteuer mit dem Weltenraum einzulassen. Die physikalischen Verhältnisse im Kosmos werden so genau wie nur möglich von der Erde aus studiert.

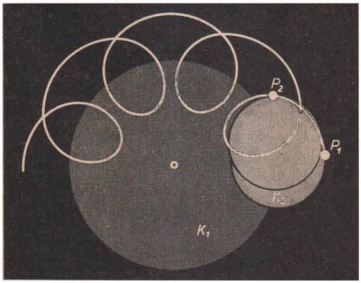
Mit diesen im Kosmos waltenden Gesetzen wollen wir uns auseinandersetzen. Wir werden sie aber nur dann richtig verstehen, wenn wir einigen physikalischen Grundgesetzen gründlich auf den Zahn fühlen, da sich gerade in der Auffassung scheinbar selbstverständlich gewordener Dinge in den letzten Jahrzehnten einiges geändert hat. Wir haben es dabei leichter als unsere Vorfahren, die sich erst gegen vorgefaßte Meinungen behaupten und mit überliefertem Halbwissen auseinandersetzen mußten, um den eigentlichen Kern der Sache herauszufinden.

Wir wollen es dem Wißbegierigen aber noch leichter machen, indem wir an konkreten Beispielen zeigen, wie die im Kosmos waltenden Gesetzmäßigkeiten von Grund auf zu erklären und die allgemeinen physikalischen Gesetze auf spezielle kosmische Fragen anzuwenden sind. Dabei vermeiden wir absichtlich den zweifellos einfacheren Weg, ihm fertige Ergebnisse und staunenerregende Zahlenwerte zu servieren. Wem es nämlich wirklich aufs Verstehen ankommt, soll nicht in blindem Vertrauen schwarz auf weiß Gedrucktes „getrost nach Hause tragen", sondern sich

durch die Unbestechlichkeit eigener rechnerischer Kontrolle davon überzeugen, daß alles mit rechten Dingen zugeht. Dazu bedarf es meistens durchaus keiner höheren Mathematik.
An eigentlichen astronomischen Kenntnissen wollen wir dabei so wenig wie möglich voraussetzen und nur soviel Astronomie treiben, wie zum Verständnis der physikalischen Zusammenhänge und der im Kosmos anzuwendenden Forschungsmethoden unbedingt notwendig ist.

Das Planetensystem

Von vielversprechenden Ansätzen im Altertum abgesehen, war die Physik bis um das Jahr 1600 eine nur beschreibende Wissenschaft. Die Aufgabe der Physik ist es aber nicht nur, die in der Natur beobachteten Erscheinungen in Worten zu schildern. Sie wird erst dann zur Wissenschaft im modernen Sinn, wenn sie tiefer in das Wesen der Dinge eindringt, ihre gegenseitigen Beziehungen und Zusammenhänge erkennt, um das Allgemeingültige herauszufinden. Das Allgemeingültige ist das Gesetz. Aus ihm läßt sich in umgekehrter Schlußfolge wieder eine Fülle von Einzeltatsachen ableiten. Das geht am einfachsten und rationellsten, wenn das Gesetz mathematisch formuliert wird.
Beschreibt man die Bewegung der am Himmel sichtbaren Gestirne so, wie sie sich dem Auge darbietet, dann ergibt sich ein ziemlich verworrenes Bild. Solange man die Erde als feststehend ansieht, ist es kaum möglich, ein einheitliches Bewegungsprinzip herauszufinden. Während die Fixsterne die Erde auf scheinbar festliegenden Kreisen umlaufen, trifft das für den Mond und die Planeten nicht zu. Um ihre bald vor-, bald rückläufige Bewegung zu erklären, nahm man im Altertum an, daß sie sich auf *Epizykloiden* bewegten. Eine solche schleifenförmige Kurve entsteht, wenn nach Bild 1 ein Kreis K_2 auf einem anderen Kreis K_1, dem sogenannten Deferenzkreis, mit gleichförmiger Geschwindigkeit fortschreitet und dabei gleichzeitig rotiert. Während Kreis K_2 ein bestimmtes Stück auf Kreis K_1 vorangekommen ist, hat sich der gegebene Punkt P_1 seines Umfanges in die neue Lage P_2 gedreht.
Mit Hilfe solcher Epizyklen ließen sich die scheinbaren Planetenbahnen wohl einigermaßen richtig darstellen. Um jedoch zu einer noch besseren Übereinstimmung zwischen dieser Theorie und den



1. Entstehung einer Epizykloide

Beobachtungen zu gelangen, war man später genötigt, allerlei zusätzliche Annahmen zu machen. Man mußte annehmen, daß die Erde außerhalb der Mitte des Deferenzkreises lag und die Planeten wiederum auf Kreisen rotierten, die sich ihrerseits auf den Hauptzykloiden bewegten. So ergaben sich Epi-Epizykloiden, und die Sache wurde immer verwickelter. Immerhin, das ganze System baute sich aus Kreisen auf, und die Erde stand wie angenagelt fest. Dieses von PTOLEMÄUS (um 90···160) geschaffene Weltbild ward vom Klerus ängstlich gehütet, weil die Erde als Mittelpunkt galt.
Es war daher ein äußerst gewagtes Unterfangen, als es NIKOLAUS KOPERNIKUS (1473···1543) unternahm, das komplizierte ptolemäische System umzustoßen und durch eine von Grund auf andere Theorie zu ersetzen. Er stellte die Sonne in den Mittelpunkt des Planetensystems und erzielte damit eine wunderbare Vereinfachung, indem er die Planeten auf Kreisbahnen um die Sonne laufen ließ.
Was die Ursachen dieser Kreisbewegung anging, so hielt es Kopernikus noch mit ARISTOTELES. Der war der Ansicht, die Kreisbewegung sei einfach die „natürliche" und als solche keiner weiteren Erklärung bedürftig. Die richtige Lösung dieses Problems gelang erst viel später. Kopernikus konnte es noch nicht besser wissen. Da nun auch die andere Behauptung des Aristoteles, die Fliege habe acht Beine, immer wieder fehlerfrei abgeschrieben wurde, darf man wohl annehmen, daß die Sache mit der „natürlichen Bewegung" als nicht unbedeutende wissenschaftliche Erkenntnis allgemein geschätzt wurde.
So hatte es die kopernikanische Lehre schwer, sich durchzusetzen. Nicht allein deswegen, weil sie von der Kirche aufs erbittertste bekämpft wurde, sondern auch, weil die damit im voraus berechenbaren Planetenörter nicht genau genug mit den Beobachtungen übereinstimmten. Ein Bewegungsgesetz aber, das nicht exakt funktioniert, kann den Fachmann nicht befriedigen. So kam es, daß auch der große Astronom TYCHO BRAHE von Kopernikus' System nicht zu überzeugen war.
Während seines Wirkens in Prag hatte Brahe einen besonders tüchtigen Gehilfen. Es war JOHANNES KEPLER (1571···1630). Dieser nahm das kopernikanische Planetensystem nochmals genau unter die Lupe. Da es mit den Kreisbahnen nicht recht stimmen wollte, versuchte es Kepler mit allen möglichen anderen Bahnkurven. Sechs Jahre intensivster Arbeit widmete er allein der Marsbahn. Er fand zum Schluß, daß sie eine Ellipse von bestimmter Größe und Gestalt sein müsse. Im Gegensatz zur Kreisbahn wird sie aber nicht mit gleichmäßiger Geschwindigkeit, sondern in Sonnennähe verhältnismäßig schneller, in Sonnenferne langsamer durcheilt. Wäre Kepler der „Flächensatz" (S. 28) schon bekannt gewesen, hätte er weit weniger Kopfzerbrechen gehabt. So aber mußte er durch Vergleich von Rechnung und Beobachtung erst mühselig herausfinden, daß das Produkt aus Sonnenabstand und zugehöriger Geschwindigkeit immer konstant ist.
Damit war der Inhalt der ersten beiden, nach ihm benannten Planetengesetze gefunden. Das dritte Gesetz, das die Beziehung zwischen Sonnenabstand und Umlaufszeit zum Gegenstand hat, bereitete noch größere Schwierigkeiten. Kepler gibt an, 17 Jahre daran gearbeitet zu haben. So wie er die Gesetze fand und formulierte, gelten sie auch heute noch:

(1) *Die Bahn jedes Planeten ist eine Ellipse, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht.*

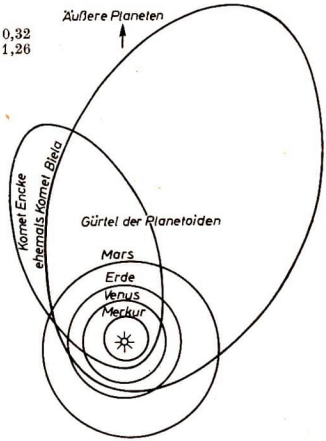
(2) *Die Verbindungslinie Sonne — Planet überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen.*

(3) *Die Quadrate der Umlaufszeiten zweier Planeten verhalten sich wie die Kuben der großen Achsen der Bahnellipsen.*

Eine maßstabgerechte Skizze des gesamten Planetensystems läßt sich wegen der großen Unterschiede in den Abständen nur schlecht zeichnen. Deshalb sind auf Bild 2 lediglich die sehr kreisähnlichen Bahnen der inneren Planeten angegeben. Die exzentrische Lage der Bahnen ist nur bei Merkur und Mars deutlich genug, um sich in der Zeichnung bemerkbar zu machen.
Die Planeten mit ihren Monden sind aber nicht die einzigen Körper im Sonnensystem. Besonders in der großen Lücke zwischen den inneren und äußeren Planeten verteilt sich die Schar der *Planetoiden*. Dies sind kleine und kleinste Körper der verschiedensten Größe und Form, die den Eindruck machen, als seien es Bruchstücke eines früheren kleinen Planeten. Bis jetzt konnten die Bahnen von etwa 1600 Planetoiden genauer bestimmt werden. Da sich ihre Bahnen vielfach überschneiden, können häufig Zusammenstöße eintreten. Trümmer davon fallen gelegentlich auf die Erde und werden dann als *Meteorite* beobachtet.
Zum Sonnensystem gehören auch die zahlreichen *Kometen*, deren Bahnen die Ellipsengestalt leicht erkennen lassen. Auf Bild 2 sind nur zwei davon eingetragen. Als verhältnismäßig lockere Gebilde neigen die Kometen leicht zum Zerfall. Bei ihrer Auflösung ergeben sich ganze Ströme von Meteoriten, die bei ihrem Eindringen in die Erdatmosphäre als Sternschnuppen verbrennen (S. 117).

Körper des Sonnensystems

	Masse	Äquatorialer Durchmesser	mittlere Entfernung von der Sonne	siderische Umlaufszeit	Schwerebeschleunigung an der Oberfläche	Anzahl der Monde	Fluchtgeschwindigkeit
	kg	m	m	Tage	m/s²		m/s
Sonne	$1{,}99 \cdot 10^{30}$	$1{,}392 \cdot 10^{9}$	—	—	273,98	—	$6{,}1756 \cdot 10^{5}$
Planeten							
Merkur	$0{,}32 \cdot 10^{24}$	$4{,}840 \cdot 10^{6}$	$57{,}91 \cdot 10^{9}$	87,97	3,60	0	3900
Venus	$4{,}87 \cdot 10^{24}$	$12{,}4 \cdot 10^{6}$	$108{,}21 \cdot 10^{9}$	224,70	8,50	0	10300
Erde	$5{,}98 \cdot 10^{24}$	$12{,}756 \cdot 10^{6}$	$149{,}60 \cdot 10^{9}$	365,26	9,81	1	11200
Mars	$0{,}64 \cdot 10^{24}$	$6{,}8 \cdot 10^{6}$	$227{,}9 \cdot 10^{9}$	686,98	3,76	2	5100
Jupiter	$1900 \cdot 10^{24}$	$142{,}8 \cdot 10^{6}$	$778{,}3 \cdot 10^{9}$	4332,59	26,0	12	60200
Saturn	$569 \cdot 10^{24}$	$120{,}8 \cdot 10^{6}$	$1428 \cdot 10^{9}$	10759,2	11,2	9	36300
Uranus	$87 \cdot 10^{24}$	$47{,}6 \cdot 10^{6}$	$2872 \cdot 10^{9}$	30687	9,40	5	22000
Neptun	$103 \cdot 10^{24}$	$44{,}6 \cdot 10^{6}$	$4498 \cdot 10^{9}$	60184	15,0	2	25100
Pluto	$5{,}4 \cdot 10^{24}$	$14{,}4 \cdot 10^{6}$	$5910 \cdot 10^{9}$	90700	8	0	10730
Monde							
Erdmond	$7{,}35 \cdot 10^{22}$	$3{,}476 \cdot 10^{6}$	$3{,}844 \cdot 10^{8}$ vom Erdmittelpunkt	27,3217	1,62	—	2375
Marsmonde							
Phobos		$16 \cdot 10^{3}$	$9{,}4 \cdot 10^{6}$	0,32			
Daimos		$8 \cdot 10^{3}$	$23{,}5 \cdot 10^{6}$ vom Marsmittelpunkt	1,26			
Größte Planetoiden							
Ceres	$8{,}3 \cdot 10^{20}$	$7{,}4 \cdot 10^{5}$	$413{,}9 \cdot 10^{9}$				
Pallas	$2{,}3 \cdot 10^{20}$	$4{,}8 \cdot 10^{5}$	$413{,}9 \cdot 10^{9}$				
Juno	$0{,}16 \cdot 10^{20}$	$2{,}0 \cdot 10^{5}$	$399{,}4 \cdot 10^{9}$				
Vesta	$1{,}1 \cdot 10^{20}$	$3{,}8 \cdot 10^{5}$	$353{,}2 \cdot 10^{9}$				



2. Sonnensystem mit den inneren Planeten

Zur Entstehung der klassischen Mechanik

Noch aber fehlte den von Kepler gefundenen Gesetzen ein wichtiges Merkmal, das man vom Standpunkt der modernen Physik aus fordern muß. Sie gaben zwar das Beobachtungsmerkmal in ausgezeichneter Genauigkeit wieder und bildeten eine vorzügliche Grundlage, die Position eines jeden Planeten für jeden beliebigen Zeitpunkt genau zu berechnen. Aber niemand vermochte anzugeben, weshalb die Planeten eigentlich auf Ellipsen umlaufen müssen. Den Gesetzen fehlte noch die Begründung und Verknüpfbarkeit mit den übrigen Gesetzen der Physik.
Wie wir heute wissen, handelt es sich hierbei um ganz allgemeine Sätze der Mechanik. Ihnen ist ein Fußball genauso unterworfen wie das donnernde Wurfgeschoß eines Kegelbruders. Auch die Planeten werden in der Physik in keiner Weise vornehmer behandelt.
Bis Galilei (1564···1642) war die Mechanik kaum über die Gesetze der Statik hinausgekommen. Bewegte Vorgänge zu erfassen war noch niemand gelungen, oder niemand hatte es der Mühe wert gehalten, sie zu untersuchen. Wenn ein Stein zur Erde fiel, dann war er eben „an seinen natürlichen Ort" gelangt. So hatte es Aristoteles geschrieben, und jedes weitere Nachdenken war deshalb überflüssig.
Galilei hat nicht nur Fernrohre gebaut und damit viel Neues am Himmel entdeckt. Er war nicht nur ein eifriger Verfechter des kopernikanischen Systems, sondern auch Begründer der wissenschaftlichen Bewegungslehre. Er entdeckte die Gesetze des freien Falls, der Wurfbewegung, die Pendelgesetze und vieles andere mehr. Aber auch er wurde bis zu seinem Lebensende von der Inquisition verfolgt. Unter Androhung lebenslänglichen Kerkers durfte er mit niemand, wer es auch sei, über die verbotene Lehre der bewegten Erde reden. In einem Brief schrieb er: „Ich glaube, daß es in der Welt keinen größeren Haß gibt als den der Unwissenden gegen das Wissen."
Die von Galilei begründete Methode, Naturgesetze durch Experimente und logisches Denken aufzufinden, wurde von Isaac Newton (1643···1727) ergänzt und vervollkommnet. Vor allem bezog er die wichtige Rolle der an den Bewegungen beteiligten Massen in seine Überlegungen ein und schuf den modernen Kraftbegriff. Er ist der Begründer der Dynamik und arbeitete ihre Gesetze so exakt und umfassend aus, daß sie bis in die neueste Zeit hinein die gesamte Mechanik unangefochten beherrschten.
Die Newtonsche Mechanik gilt für jeden beliebigen Körper; nicht nur für alle irdischen, sondern auch für alle kosmischen Objekte. Man nennt sie heute auch die *klassische Mechanik*. So stellte Newton der Astronomie als Beobachtungskunst die theoretische Himmelsmechanik an die Seite und konnte die Keplerschen Gesetze nunmehr aus mathematischen Gleichungen herleiten und exakt begründen.

Die Newtonschen Axiome

Die Trägheit

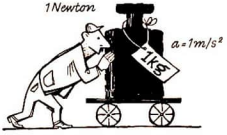
In den Naturwissenschaften ist es Brauch, nur solche Behauptungen gelten zu lassen, die man auch logisch beweisen kann. Da dies nicht ohne gründliches Überlegen vor sich geht, ist es kein Wunder, wenn hier weniger geredet als gedacht und gerechnet wird.
Man verfährt dabei so, daß man jeden Lehrsatz mit Hilfe eindeutiger, meist mathematisch formulierter Beweise aus anderen, einfacheren Sätzen ableitet. Irgendwo hat aber diese Kette von Schlußfolgerungen immer einen Anfang. Das ist jene Stelle, wo allein eine bestimmte elementare Erfahrung den letzten Grund der Erkenntnis liefert. Man kann sie als Lehrsatz aussprechen, aber nicht aus anderen, noch einfacheren Sätzen herleiten. Diese Grundsätze nennt man *Axiome*. Sie selbst sind im Sinne der Logik nicht beweisbar, sondern dienen ihrerseits zum Beweis anderer Lehrsätze. Die Richtigkeit eines Axioms kann daher nur in seiner Übereinstimmung mit der Erfahrung gefunden werden, aber nicht durch gedankliche Schlußfolgerungen von irgendwo anders her. Newton hat drei Axiome an die Spitze seines Werkes gestellt, und es wird gut sein, wenn wir uns mit ihnen beschäftigen. Hier ist zunächst

(4) *Das erste Newtonsche Axiom:*
Jeder Körper verharrt im Zustand der Ruhe oder der gleichförmig geradlinigen Bewegung, solange keine Kraft auf ihn einwirkt.

Diese Eigenschaft eines Körpers bezeichnet man als Trägheit oder Beharrungsvermögen. Von Natur aus widersetzt sich jeder Körper dem Versuch, seinen Bewegungszustand zu ändern. Es gelingt nur, wenn man *Kräfte* auf ihn einwirken läßt, die ihn beschleunigen oder verzögern.
Newton konnte wohl deutlich sehen, daß ein auf dem Tisch stehendes Tintenfaß sich nicht von der Stelle bewegt, solange niemand daran rührt; doch um den zweiten Teil seines Satzes nachzuprüfen, hätte er sich in den Weltenraum begeben müssen. Könnte man dort, weitab von allen nur

3. Trägheit

denkbaren äußeren Einflüssen, einen Körper deponieren, so würde er sich schnurgeradeaus bewegen. Er hat und behält just die Geschwindigkeit, die er in dem Moment besaß, da man ihn aus der Hand ließ. Auf der Erde ist das Experiment undurchführbar. Immer stellen sich Kräfte in den Weg, die den Körper abbremsen, niemals kann man die Schwerkraft beseitigen. Glatter als der schlüpfrigste Aal müßte eine Gleitbahn sein, auf der ein Körper so dahinschlittert, wie es das Trägheitsgesetz fordert. Sogar im Weltenraum müßte man eine ganze Weile suchen, um ein einigermaßen brauchbares Gelände zu finden; denn selbst in den entlegensten Gebieten muß sich die Anziehungskraft der jeweils nächstliegenden Sternensysteme noch störend auf den Versuchskörper auswirken.



4. Die Krafteinheit: 1 Newton

Masse und Kraft

Die einem Körper innewohnende Trägheit sieht man ihm nicht ohne weiteres an. Um sie zu messen, läßt man Kräfte von verschiedener Größe auf ihn einwirken. Je nachdem, wie man es anstellt, wird seine ursprüngliche Geschwindigkeit dadurch kleiner oder größer werden. Er erleidet eine mehr oder weniger große Beschleunigung a, die der Größe der einwirkenden Kraft F genau proportional ist. Den dabei auftretenden Proportionalitätsfaktor nennt man die Masse m des Körpers. Damit entsteht das

(5) *Grundgesetz der Mechanik:* $F = m \cdot a.$

Die Masse m ist daher weder etwas Greifbares oder Substantielles, sondern nichts weiter als ein Maß der Trägheit. Wenn man den Körper abtastet, fühlt man seine Form, wenn man ihn besieht, erkennt man seine Färbung. Sobald man ihn von der Stelle schieben oder ziehen will, verspürt man, wie er sich dagegen sträubt und der Kraft nur widerwillig folgt. Seine Trägheit ist eine Eigenschaft neben vielen anderen und nicht die Substanz selbst. Von der Substanz wissen wir nur, daß sie sich z. B. aus winzigen Atomen zusammensetzt und diese wiederum aus noch kleineren Elementarteilchen bestehen. Sie haben eine unwahrscheinlich große Dichte und können sich gegenseitig nicht durchdringen.
Da hätten wir sie also vor uns, diese Ursubstanz, von der man sich ganz gut vorstellen kann, daß sie in winzigen Körnchen, vielleicht auch Kügelchen, konzentriert ist. Einige ihrer merkwürdigen Eigenschaften werden wir noch kennenlernen. Doch einfach zu sagen, sie bestünden lediglich aus der besagten Masse m, wäre nur ein sehr oberflächliches Provisorium. Erstens käme man damit der Erkenntnis um keinen Schritt näher, und zweitens kann ein Körper ohnehin nicht aus einer seiner Eigenschaften bestehen. Eines allein weiß man mit Sicherheit, nämlich, daß der vorliegende Gegenstand mit allen seinen Eigenschaften eben da ist. Man kann ihn nicht wegzaubern oder aus

einem leeren Zylinderhut hervorholen. Er ist ein Teil der Wirklichkeit oder, wie der Philosoph sagt, der objektiven Realität. Diese Wirklichkeit leugnen zu wollen ist noch keinem vernünftigen Physiker oder Chemiker eingefallen. Man lebt ja davon.
Die Maßeinheit der Trägheit oder Masse ist das Kilogramm. Wünschen wir z. B., daß die Geschwindigkeit des Körpers von der Masse $m = 1$ kg in jeder Sekunde um 1 m/s zunehme, so heißt das, ihm die Beschleunigung $a = 1$ m/s² zu erteilen. Die hierfür notwendige Kraft ist dann

$$F = 1 \text{ kg} \cdot 1 \text{ m/s}^2 = 1 \text{ kg m/s}^2.$$

Zu Ehren dessen, der diesen Zusammenhang das erste Mal richtig erkannte und formulierte, nennt man diese Krafteinheit

$$(6) \quad 1 \text{ N (Newton)} = 1 \text{ kg m/s}^2 .$$

Wem das Kilopond geläufiger ist, kann auch umrechnen

$$(7) \quad 9{,}81 \text{ N} = 1 \text{ kp}.$$

Die Bewegungsgröße

Newton hat das eben erwähnte Gesetz nicht in der Form ausgesprochen, wie wir es hingeschrieben haben. Er beschritt vielmehr einen bemerkenswerten Umweg. Dieser war wohl überlegt und alles andere als etwa altertümliche Umständlichkeit. Newton ging nämlich nicht von der sozusagen „nackten" Masse m aus, sondern von dem Produkt aus Masse und Geschwindigkeit des Körpers. Man nennt es die

$$(8) \quad \textit{Bewegungsgröße oder Impuls:} \quad I = m \cdot v.$$

Vielleicht könnte man den Eindruck haben, hier seien zwei physikalische Größen einigermaßen willkürlich zusammengeleimt worden. Aber wie verhält es sich denn in Wirklichkeit? Wenn einem aus Versehen ein Hammer auf die Zehen fällt, tut das nicht nur deswegen weh, weil dieser eine große Masse m hat, sondern weil er außerdem mit recht unerwarteter Geschwindigkeit unten ankommt. Nicht einer der beiden Faktoren kommt zur Wirkung, sondern nur beide zusammen.

5. Der Impuls

Auf ihr Produkt kommt es an! Ein schwerer Hammer, aus wenigen Zentimetern Fallhöhe losgelassen, wirkt genauso schmerzlich wie ein kleines Hämmerchen aus großer Höhe, wenn nur das Produkt in beiden Fällen den gleichen Wert hat.
Auch der Kraftbegriff wirkt viel lebendiger, wenn man von der Bewegungsgröße ausgeht. Newton spricht das in seinem 2. Axiom aus.

(9) *Das zweite Newtonsche Axiom:*
Die Kraft ist gleich der zeitlichen Änderung der Bewegungsgröße

$$F = \frac{\Delta (m v)}{\Delta t}.$$

Was diese Gleichung bedeutet, wird sofort klar, wenn man an das 1. Axiom zurückdenkt. Dort zeigte sich das Wesen der Trägheit in der fortgesetzt gleichbleibenden Geschwindigkeit. Jetzt kann man sagen, daß beim Fehlen äußerer Kräfte der Impuls $m\,v$ immerfort seinen konstanten Wert behalten muß. Je schneller sich der Impuls ändern soll, desto mehr Kraft muß man aufwenden. Daher kommt auch die erstaunlich große Kraftwirkung, mit der ein Schmiedehammer gegen den Amboß trifft. Im Bruchteil einer Sekunde gibt er seinen gesamten Impuls an das unter seinen Hieben zitternde Werkstück ab.
Wer genau hinsieht, wird übrigens bemerken, daß die Gleichungen (5) und (9) in formaler Hinsicht dasselbe aussagen. Unter der zunächst selbstverständlich erscheinenden Annahme, daß sich die Masse dabei nicht ändert, kann man die letzte Gleichung auch $F = m\,\frac{\Delta v}{\Delta v}$ schreiben. Der Quotient $\frac{\Delta v}{\Delta v}$ stellt nichts anderes dar als die Beschleunigung a.
Newton muß es wohl in den Fingerspitzen gefühlt haben, daß es richtiger ist, vom Impuls $m\,v$ und Gleichung (9) auszugehen. Aber erst runde 200 Jahre später brachte es die Relativitätstheorie zutage, daß die Masse sich mit der Geschwindigkeit ändert (S. 152), was allerdings erst bei sehr großen Geschwindigkeiten bemerkbar wird. In geradezu prophetischer Voraussicht hat Newton den Fehler vermieden, in seinem Kraftgesetz Masse und Geschwindigkeit voneinander zu trennen.

Wirkung und Gegenwirkung

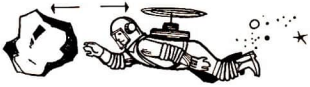
Newton spricht schließlich noch von der Wirkung, die ein Körper auf einen anderen Körper ausübt.

(10) *Das dritte Newtonsche Axiom:*
Zu jeder an einem Körper angreifenden Kraft gehört eine gleich große Kraft, die auf der gleichen Geraden in entgegengesetzter Richtung wirkt.

In der häufig gebrauchten Kurzfassung sagt man auch

Kraft = Gegenkraft.

Über die unmittelbare Bedeutung des Satzes wollen wir hier nicht viel Worte machen. Er bildet die Grundlage der gesamten Statik. Der Kernpunkt ist dabei, daß es in der Natur nirgendwo einzelne Kräfte gibt, sondern diese immer nur paarweise auftreten.
Will man die dynamischen Folgen des Gegenwirkungsprinzips studieren, wird man stets von der lästigen Reibung gestört. Um diesen unkontrollierbaren Einflüssen aus dem Wege zu gehen, begeben wir uns am besten in den Weltenraum. Ein kleiner Planetoid von passender Größe ist leicht gefunden, und wie weiland Münchhausen auf seiner Kanonenkugel segeln wir mit ihm geräuschlos und ohne Gegenwind friedlich dahin. Da sich das Landschaftsbild nur unmerklich ändert, merken wir von der Bewegung rein gar nichts. Mustergültig, um nicht zu sagen zum Gähnen langweilig, ist die Stille der Natur.



6. Wirkung und Gegenwirkung

Das bringt uns auf den frevelhaften Gedanken, den Bewegungszustand unseres ehrwürdigen Felsbrockens irgendwie zu ändern, ihn zu bremsen oder zu beschleunigen. Da uns zunächst nichts weiter einfällt, geben wir ihm einen kräftigen Schubs. Geschickterweise richten wir das so ein, daß die Richtung dieses Stoßes genau in die Verbindungslinie der Schwerpunkte der beiden Massen fällt. Wenn wir das nicht beachten, würden beide Körper außerdem noch in Umdrehung geraten. Der gewünschte Effekt tritt also ein, der Planetoid gibt sofort nach und schwebt lautlos davon.
Könnten wir aber die Stelle im Raum markieren, an der wir das Attentat verübten, würden wir mit Bestürzung feststellen, daß auch unser eigener Körper seine Geschwindigkeit, und zwar in genau entgegengesetzter Richtung, verändert hat. Wir haben den himmlischen Gegenstand nicht nur von uns fortgeschoben, sondern zu gleicher Zeit uns *von ihm* abgestoßen. Eine Kraft wollten wir wirken lassen, und ganz ohne unsere Absicht haben wir deren zwei erhalten. Nichts können wir dagegen tun. Ziemlich hilflos sind wir dem 3. Axiom ausgeliefert. Der leere Raum hat nun einmal keine Haltevorrichtung oder Kilometersteine, an denen wir uns festklammern könnten. Solange uns nichts Neues einfällt, können wir den Versuch nicht einmal wiederholen, denn die Trägheit treibt uns unaufhaltsam immer weiter von unserem Versuchsobjekt fort.
Wir haben inzwischen genügend Zeit, über das Getane nachzudenken. Bringen wir den Nenner

von Gleichung (9) auf die linke Seite, so ergibt sich die neue Gleichung

$$(11)\quad F \cdot \Delta t = \Delta\,(m\,v).$$

Kraftstoß = Impulsänderung

Links steht die Ursache und rechts die Wirkung. Ursache des fatalen und nicht wiedergutzumachenden Auseinanderstrebens der Körper war die Kraft F, mit der wir während der Zeit Δt leichtsinnigerweise auf den Gegenstand drückten. Die Folge davon war, daß sein Impuls um den Betrag $\Delta\,(m\,v)$ zunahm. Die Kraft kann aber nach Satz (10) nur zugleich mit ihrer Gegenkraft existieren. Somit erhält auch der zweite Körper einen Impuls von gleichem Betrag, aber entgegengesetzter Richtung. Man bezeichnet ihn im täglichen Leben meist als *Rückstoß*. Damit wir Stoß und Rückstoß unterscheiden können, geben wir ihnen die Kennziffern 1 und 2 und erhalten

$$(12)\quad m_1 \cdot \Delta v_1 = -\,m_2 \cdot \Delta v_2.$$

(Da wir die Massen als unveränderlich betrachten, kann die Masse m vor das Differenzzeichen gesetzt werden. Das Minuszeichen gibt an, daß die Geschwindigkeiten entgegengesetzte Richtungen haben.) Hieraus ist zu ersehen, daß sich die Geschwindigkeiten der beiden Körper umgekehrt wie ihre Massen verhalten müssen. Dies geht auch aus dem unten angeführten Beispiel[1]) hervor.

[1]) Angenommen, die Masse des Planetoiden betrage $m_1 = 140$ kg und die unseres eigenen Körpers $m_2 = 70$ kg. Die Kraft des Abstoßes werde mit 7 N (etwa 0,7 kp) angenommen und wirke während einer Berührungszeit von 4 Sekunden.
Nach Gleichung (12) ergeben sich die Geschwindigkeitsänderungen

$$\Delta v_1 = \frac{F \cdot \Delta t}{m_1} = \frac{7\ \mathrm{kg\,m/s^2} \cdot 4\ \mathrm{s}}{140\ \mathrm{kg}} = 0{,}2\ \mathrm{m/s}$$

$$-\Delta v_2 = \frac{F \cdot \Delta t}{m_2} = \frac{7\ \mathrm{kg\,m/s^2} \cdot 4\ \mathrm{s}}{70\ \mathrm{kg}} = 0{,}4\ \mathrm{m/s}\,.$$

Beide Körper laufen nach dem Abstoß mit der Geschwindigkeit (0,2 + 0,4) m/s = 0,6 m/s relativ zueinander davon.

Der Impulssatz

Die Erhaltung des Impulses

Noch eine weitere Konsequenz läßt sich aus dem 3. Axiom ziehen, wenn wir Gleichung (12) umstellen. Man kann sie so schreiben:

$$(13)\quad m_1 \cdot \Delta v_1 + m_2 \cdot \Delta v_2 = 0.$$

Sie bedeutet jetzt, daß die Summe der Impulsänderungen der an dem Vorgang beteiligten Körper gleich Null ist. Die beiden Einzelimpulse haben sich zwar geändert, der Gesamtimpuls aber ist konstant geblieben. Wir dürfen jedoch nicht aus dem Auge verlieren: es ist von nichts anderem die Rede, als von zwei Körpern, die von allen sonstigen Einflüssen isoliert betrachtet werden. Man bezeichnet so etwas als ein „abgeschlossenes System" und das entsprechende Gesetz als den

(14) *Impulssatz: Der Gesamtimpuls eines abgeschlossenen Systems bleibt immer konstant.*

Was mit den einzelnen Körpern des Systems auch geschehen mag, niemals wird es möglich sein, den gesamten Impuls auch nur im geringsten zu verändern.
Denken wir wieder an unsere Lage zurück, da wir uns unbedacht und leichtfertig von unserem Versuchskörper trennten. Viele Minuten sind vergangen, hoffnungslos sehen wir den Ausreißer unseren Blicken entschwinden. Verzweifelt rudern wir mit Armen und Beinen. Da unsere Extremitäten aber selbst nur Teile eines auf sich selbst angewiesenen Systems sind, können wir unsere Gesamtbewegung weder aufhalten noch beschleunigen.
Aber wie das in spannenden Situationen oft vorkommt, durchzuckt uns jäh ein rettender Gedanke. Wir greifen in die Jackentasche und fühlen die geladene Pistole, die wir für alle Fälle eingesteckt haben. Man kann ja nicht wissen, was einem da draußen alles begegnen kann. Kurz entschlossen holen wir das Schießeisen hervor, kehren dem Versuchskörper den Rücken und zielen scharf auf den Punkt des Himmels, den wir anzusteuern im Begriff sind, und drücken ab. Ein Ruck, und wir

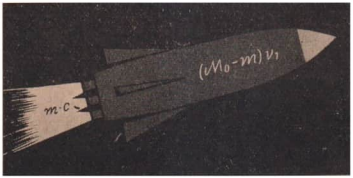
7. Rückstoß

fühlen einwandfrei, wie unsere Geschwindigkeit bedeutend nachläßt. Ein zweiter Schuß bringt unsere Bewegung fast zum Stillstand, und nach einigen weiteren Schüssen sind wir sogar drauf und dran, den Versuchskörper wieder einzuholen.
Fast sieht es so aus, als sei das eine sträfliche Verletzung des soeben feierlich verkündeten Impulssatzes. Das Gegenteil ist jedoch der Fall. Die Pistolenkugel ist und bleibt nämlich Bestandteil unseres Systems. Solange sie friedlich in der Patrone steckt, gehört sie dazu und auch dann noch, wenn sie mit Rauch und Feuerstrahl aus der Mündung fährt; denn knallen kann es im Weltenraum nicht, da sich in Ermangelung von Luft keine Schallwellen bilden. Das Gesamtsystem Schütze — Pistolenkugel wird seinen Impuls daher nicht ändern, wohl aber jeder seiner beiden Bestandteile.
So bietet der Impulssatz die einzige Möglichkeit, im leeren Raum willkürlich zu navigieren. Irgend etwas muß man dort immer bei sich haben, um es wegschleudern oder abschießen zu können. Statt der Pistole könnte es auch eine kleine Hilfsrakete tun. Im äußersten Notfall muß man Brieftasche oder Feuerzeug wegwerfen. Sie sind im Weltenraum sowieso überflüssig.
Für künstliche Satelliten und Raumschiffe kommt allein der Raketenantrieb in Betracht. Die wegzuschleudernde Masse m besteht hierbei aus Verbrennungsgasen, die der Brennkammer mit der Geschwindigkeit v entströmen. Hierzu gehört stets ein Brennstoff (Kohlenwasserstoffe, Wasserstoff, Äthylalkohol, Ammoniak, Terpentin o. ä.) und ein Oxydationsmittel (flüssiger Sauerstoff, Wasserstoffperoxid, Salpetersäure). Beide Stoffe werden meist in flüssiger Form getankt. In sogenannten Feststoffraketen bilden sie ein festes Gemenge. Damit der Impuls $m\,v$ möglichst groß werde, muß die Ausströmungsgeschwindigkeit v recht hoch liegen. Sie ist um so größer, je höher die Verbrennungsenergie der verwendeten Mischung liegt und je niedriger das mittlere Molekulargewicht der Verbrennungsgase ist. Andererseits soll die Dichte des Treibstoffes möglichst groß sein, da dann Umfang und Masse der mitzuführenden Behälter und des sonstigen Zubehörs geringer werden. Bei den bisher verwendeten Treibstoffen liegt die Ausströmgeschwindigkeit bei etwa 2000···2500 m/s. Technisch scheinen günstigstenfalls etwa 3800 m/s erreichbar zu sein.

Die Raketengleichung

Das sind alles Fragen, deren Erörterung uns in allzu viele Einzelheiten führen würde. Jedenfalls kann auch ein „Atomantrieb", sei es mit Hilfe von Kernreaktoren oder pulsierenden Wasserstoffexplosionen, sich allein auf das Rückstoßprinzip, d. h. den Impulssatz, stützen. Die Verwirklichung dürfte indessen wegen der z. Z. noch unüberwindbaren Schwierigkeiten erst in ferner Zukunft möglich sein.
Das physikalische Prinzip der Fortbewegung im leeren Raum ist uns damit bekannt. Der tech-

nische Weg zu seiner Verwirklichung wurde bereits von dem russischen Mathematiker KONSTANTIN ZIOLKOWSKI (1857···1935) angegeben. Nur der Raketenantrieb kann es dem Menschen ermöglichen, die Fesseln der irdischen Schwerkraft zu überwinden.
Wir wollen uns hier nicht mit den technischen Details beschäftigen, sondern lediglich das physikalische Grundprinzip erörtern, wie es Ziolkowski in seinen Arbeiten aufdeckte. Es geht um folgendes Problem: Je Zeiteinheit stößt die Rakete eine bestimmte Masse m an Verbrennungsgasen aus. Sie verlassen die Rakete mit der konstant bleibenden Geschwindigkeit c. Die Rakete verliert dadurch fortgesetzt an eigener Masse, wodurch wiederum die Wirkung des Rückstoßes immer größer wird.
Eine ganz entscheidende Frage ist dann: Wie groß muß die Anfangsmasse, die sogenannte *Startmasse* M_0 einer Rakete sein, wenn die *Leermasse* M eine bestimmte *End*geschwindigkeit v erreichen soll?
Um das klarer zu übersehen, betrachten wir den Vorgang in einzelnen Schritten. Am Ende der ersten Zeiteinheit hat die Rakete die Geschwindigkeit v_1 erlangt, während ihre Masse nur noch $M_1 = M_0 - m$ beträgt. Hierbei lautet die Impulsgleichung (12) $M_1 v_1 = m c$ (Bild 8). Da wir so-



8. Impulsgleichung nach Ablauf der ersten Zeiteinheit

wieso wissen, daß die Richtungen von v und c entgegengesetzt sind, haben wir das Minuszeichen weggelassen. Wegen $m = M_0 - M_1$ können wir auch $M_1 v_1 = (M_0 - M_1)\, c$ schreiben und gewinnen hieraus

$$\frac{M_0}{M_1} = \left(1 + \frac{v_1}{c}\right).$$

Im Laufe der zweiten Zeiteinheit hat sich die Masse wiederum um m verringert und beträgt dann nur noch $M_2 = M_1 - m$. Die Impulsgleichung $M_2 v_2 = m c$ liefert dann $\frac{M_1}{M_2} = \left(1 + \frac{v_2}{c}\right)$. Entsprechend gilt für die weiteren Zeitabschnitte $\frac{M_2}{M_3} = \left(1 + \frac{v_3}{c}\right)$ usw.
v_1, v_2, v_3 sind nicht etwa die jeweiligen Endgeschwindigkeiten, sondern nur die Geschwindigkeitszunahmen in den betreffenden Zeitabschnitten. Sie sind einander nicht gleich. Das Verhältnis

der Anfangs- zur Endmasse ist dann das Produkt

$$\frac{M_0}{M} = \frac{M_0}{M_1} \cdot \frac{M_1}{M_2} \cdot \frac{M_2}{M_3} \cdots = \left(1 + \frac{v_1}{c}\right)\left(1 + \frac{v_2}{c}\right)\left(1 + \frac{v_3}{c}\right)\cdots$$

Es handelt sich jetzt noch darum, diese vielgliedrige Gleichung zusammenzufassen. Die angestrebte Endgeschwindigkeit v ergibt sich dabei als Summe der einzelnen Geschwindigkeitsbeträge $v_1 + v_2 + v_3 + \ldots$
Als Endergebnis[2]) folgt auf diese Weise die

(15) *Raketengleichung ohne Berücksichtigung der Schwerkraft:* $\frac{M_0}{M} = e^{v/c}$.

Das in dieser Gleichung enthaltene Gesetz enthüllt mit unerbittlicher Strenge die Mindestforderung, der jede Rakete unterworfen ist. Die Startmasse M_0 muß um ein Vielfaches größer als die zu befördernde Leermasse M sein. Der weitaus überwiegende Teil der Raketenmasse muß aus dem unterwegs zu verbrennenden Treibstoff bestehen. Ausschlaggebend für dieses Massenverhältnis ist in erster Linie die Geschwindigkeit c der ausströmenden Verbrennungsgase.
Nehmen wir an, diese betrage $c = 3200$ m/s, während die Rakete die Endgeschwindigkeit $v = 8000$ m/s erreichen soll. Dann ergibt sich das Massenverhältnis

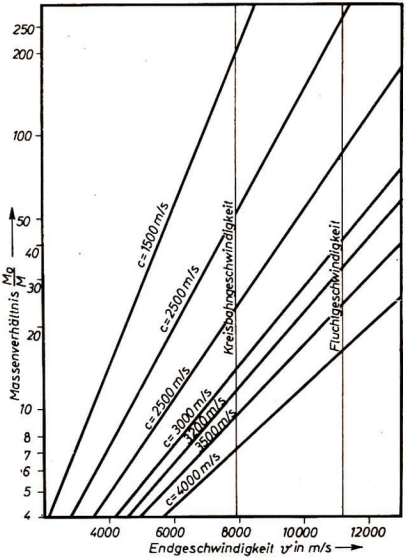
$$\frac{M_0}{M} = e^{\frac{8000}{3200}} = e^{2,5} = 12,2\,.$$

Das heißt: Die Rakete muß beim Start mit einer Treibstoffmasse (Brennstoff + Oxydations-

[2]) Hierzu unterteilt man jeden einzelnen Zeitabschnitt, z. B. den *ersten*, in t Teile. Dann kann man näherungsweise annehmen, daß in diesem relativ kleinen Intervall die entsprechenden Zuwachse $\frac{v_1}{t}$ gleich groß sind. Daraus ergibt sich

$$\frac{M_0}{M_1} = \left(1 + \frac{v_1}{tc}\right)\left(1 + \frac{v_1}{tc}\right)\cdots = \left(1 + \frac{v_1}{tc}\right)^t.$$

Man setzt nun $\frac{v_1}{tc} = \frac{1}{n}$. Dann wird mit $t = \frac{v_1 n}{c}$ für das erste Zeitintervall $\frac{M_0}{M_1} = \left(1 + \frac{1}{n}\right)^{\frac{n v_1}{c}} = e^{v_1/c}$, weil der Ausdruck $\left(1 + \frac{1}{n}\right)^n$ für sehr große Werte von n bekanntlich gleich e, d. h. gleich der Basis der natürlichen Logarithmen $e = 2,718\ldots$, ist. Analog erhält man für die weiteren Faktoren $\frac{M_1}{M_2} = e^{v_2/c}$ usw. Das gesamte Produkt lautet daher $\frac{M_0}{M}\, e^{v_1/c} \cdot e^{v_2/c} \cdot e^{v_2/c} \ldots$.
Dieses Produkt läßt sich zusammenfassen, indem man die Exponenten addiert, wobei $v_1/c + v_2/c + v_3/c \cdots = v/c$ ist. Damit wird $\frac{M_0}{M} = e^{v/c}$.



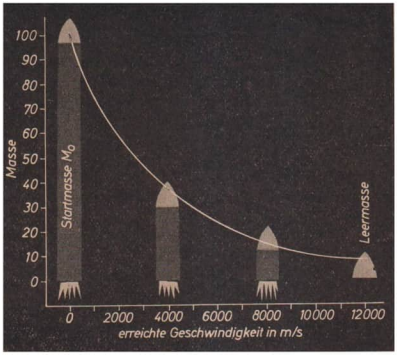
9. Massenverhältnis der idealen Rakete in Abhängigkeit von der Endgeschwindigkeit c (ohne Berücksichtigung der Schwerkraft)

mittel) beladen werden, die das rund 12fache der Masse der ausgebrannten Rakete beträgt, wenn die Kreisbahngeschwindigkeit (S. 38) erreicht werden soll.

Auf Bild 9 sind die Massenverhältnisse in Abhängigkeit von den zu erreichenden Endgeschwindigkeiten v angegeben. Da diese wiederum stark von der Ausströmgeschwindigkeit c abhängen, sind für die besonderen Werte $c = 1500 \cdots 4000$ m/s besondere Kurven gezeichnet. Wie beispielsweise aus der Kurve für $c = 3200$ m/s hervorgeht, wächst das Massenverhältnis auf den noch viel ungünstigeren Wert 33 an, wenn die Fluchtgeschwindigkeit $v = 11\,200$ m/s (S. 54) erreicht werden soll.

Die Verhältnisse verbessern sich jedoch ganz entscheidend, wenn höhere Ausströmgeschwindigkeiten zur Verfügung stehen. Bei der mit chemischen Treibstoffen praktisch erreichbaren Höchstgrenze von $c = 3500$ m/s braucht die Masse des Treibstoffes nur noch das 25fache der Leermasse zu betragen, um Fluchtgeschwindigkeiten zu erzielen.

In welch rapider Weise die gestartete Rakete ihre Masse verliert, zeigt Bild 10, dem eine Ausströmgeschwindigkeit von $c = 3000$ m/s zugrundeliegt. Bei $v = 7900$ m/s beträgt die Restmasse kaum noch 8 %.



10. Massenabnahme einer Rakete bei der Ausströmungsgeschwindigkeit $c = 3000$ m/s

Das alles sind natürlich nur theoretische Zahlen. Vor allem berücksichtigen sie nicht einige beim Start von der Erde aus wichtige Umstände. Der zur Gleichung (15) führende Ansatz geht ja nur vom Impulssatz aus, d. h. von Verhältnissen, bei denen keinerlei äußere Kräfte auf die Rakete einwirken. Abgesehen vom Luftwiderstand in der Atmosphäre ist es aber die Schwerkraft, die in erster Linie zu überwinden ist. Man kann ihren Einfluß ungefähr berücksichtigen, wenn man sich sagt, daß die Rakete nach Ablauf der Zeit t nach Gleichung (23) die Fallgeschwindigkeit $v = gt$ erreichen würde, wobei ihre Eigengeschwindigkeit gleich Null sein müßte. Um diesen Geschwindigkeitsverlust wettzumachen, ist in die Gleichung (15) anstelle von v die Summe $v + g\,t$ einzusetzen.

Die Steigzeit t hängt nun wiederum davon ab, mit welcher Beschleunigung a die Rakete anfährt. Man drückt sie häufig in Vielfachen n der Erdbeschleunigung g aus und hat demnach $a = \frac{v}{t} = ng$. Hiernach ist $g\,t = \frac{v}{n}$, und die Gleichung (15) nimmt die erweiterte Form an:

(16) *Raketengleichung mit Berücksichtigung der Schwerkraft:* $$\frac{M_0}{M} = e^{\frac{v}{c}(1 + 1/n)}$$

Nehmen wir an, die Rakete aus unserem Beispiel auf S. 24 fährt mit dem doppelten Wert der Erdbeschleunigung an, so heißt das, daß sie sich mit der Beschleunigung $g = 9{,}81$ m/s² in senkrechter Richtung von der Erdoberfläche entfernt. Daraus ergibt sich $n = 2$ und $(1 + 1/n) = 1{,}5$. Das Massenverhältnis erhöht sich dadurch auf den Wert

$$\frac{M_0}{M} = e^{2{,}5 \cdot 1{,}5} = e^{3{,}75} = 42\,.$$

Was wir hier berechnet haben, bedeutet lediglich, wie schon gesagt, daß zur Beförderung der Leermasse $M = 1$ kg eine Treibstoffmenge von $M_0 - M = 41$ kg in Form von Verbrennungsprodukten ausgestoßen werden muß. Um diesen Brennstoff mitzuführen, sind Treibstofftanks und all die zum Antrieb gehörenden Aggregate des Triebwerkes mit seinen Steuer- und Hilfsorganen notwendig, die auf Kosten der eigentlichen Nutzmasse gehen. Um den zu transportierenden Ballast auf ein Minimum zu reduzieren, wird bekanntlich das Prinzip der Mehrstufenrakete angewendet, wonach der Antrieb in 2 bis 5 Stufen unterteilt wird. Nach dem jeweiligen Abbrand einer Stufe wird dieser Teil des Aggregates nicht mehr benötigt und deshalb abgeworfen, womit die weitere Beschleunigung viel leichter möglich ist.
Als Beispiel sei hier eine der amerikanischen militärischen „Atlas"-Raketen genannt. Es handelte sich um eine Zweistufenrakete, deren gesamte Anfangsmasse 110 t betrug, davon 100 t Treibstoff. Sie erreichte die Endgeschwindigkeit $v = 7200$ m/s und beförderte eine „Nutz"last von 1,5 t über eine Strecke von 10000 km. Eine noch leistungsfähigere amerikanische Mehrstufenrakete des Typs „Saturn" soll die Startmasse $M_0 = 530$ t haben und einen Satelliten von $M = 8{,}5$ t auf eine Kreisbahn um die Erde bringen. Hierzu muß (S. 38) die Endgeschwindigkeit $v = 7910$ m/s betragen. Die Schubkraft wird mit 680000 kp angegeben und muß naturgemäß größer als das Anfangsgewicht von 530000 kp sein, wenn sich die Rakete vom Boden erheben soll. Wie man nach dem Grundgesetz (5) leicht nachrechnen kann, ergibt das im Augenblick des Startes das $n = 1{,}3$fache der Schwerebeschleunigung. Dieser n-Wert wird aber nach dem Start zunehmend besser, da sich ja die Masse der Rakete rasch verringert.
Man sieht, daß die Raketentechnik außerordentlich schwierige Probleme zu meistern hat, wenn die für den Vorstoß in den Weltenraum erforderlichen Geschwindigkeiten erreicht werden sollen. Wie sie praktisch gelöst werden, sind mehr oder weniger technische Fragen. So wichtig und interessant sie auch sein mögen, es soll uns genügen, daß sie gelöst worden sind. Am eindringlichsten beweisen das die glänzenden Erfolge der sowjetischen Raketentechnik.

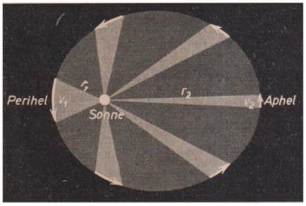
Der Drehimpuls

Das Trägheitsgesetz handelt, so wie es im 1. Axiom Newtons niedergelegt ist, nur von geradlinig bewegten Körpern. Aber verhalten sich rotierende Körper etwa anders? Keineswegs; denn ein tadellos geöltes, auf erstklassigen Kugellagern laufendes Schwungrad zeigt seine Trägheit sogar noch deutlicher als ein gleitender Körper. Viele Minuten lang kann es sich drehen, ehe es müde wird.
Die in einem rotierenden Körper steckende Bewegungsgröße nennt man seinen *Drehimpuls*, der sich nach bestimmten Methoden berechnen läßt. Da es aber am Himmel keine Schwungräder gibt, brauchen wir uns nicht sonderlich damit zu beschäftigen. Es genügt vielmehr zu wissen, daß der Drehimpuls einer auf einer Kreisbahn umlaufenden punktförmigen Masse durch das Produkt

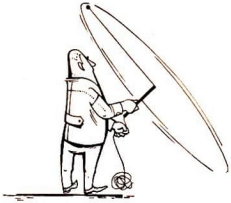
(17) *Drehimpuls einer punktförmigen Masse:* $Ir = m\,r\,v$

ausgedrückt werden kann. Hier bedeuten r den Abstand der Punktmasse vom Drehzentrum und v deren Bahngeschwindigkeit.
Wir hatten gesehen, daß der Impuls eines geradlinig gleitenden Körpers unverändert bleibt, solange keine Kräfte auf ihn einwirken. Dasselbe gilt auch für den Drehimpuls und trifft auch für den Drehimpuls des Systems Erde — Mond zu.
Wenigstens ist es so, wenn man den Drehimpuls als Ganzes betrachtet. Er besteht jedoch aus mehreren Faktoren. Sieht man von der konstant bleibenden Masse m ab, so verbleiben noch r und v. Der Abstand r der Planeten von der Sonne bliebe ebenfalls konstant, wenn sich die Planeten auf Kreisbahnen bewegen würden; sie laufen aber auf Ellipsen. Der Abstand des Planeten von der Sonne hat seinen kleinsten Wert r_1 im sogenannten *Perihel* und seinen größten mit r_2 im *Aphel*. Weil aber das Produkt $r\,v$ auf jeden Fall unverändert bleibt, muß die Geschwindigkeit v_1 im Perihel größer sein als v_2 im Aphel. In jedem Augenblick der Bewegung gilt der

(18) *Flächensatz:* $r_1\,v_1 = r_2\,v_2$.



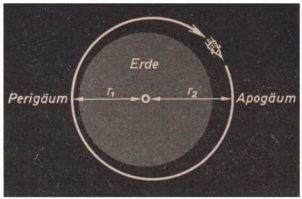
11. Das 2. Keplersche Gesetz



12. Experiment zum Flächensatz

Man kann das in einer Skizze zum Ausdruck bringen, in der man die Strecken einzeichnet, die ein Planet in gleichen Zeitabschnitten zurücklegt (Bild 11). Die Verbindungslinien mit der Sonne sind die dazugehörigen Entfernungen r. Näherungsweise kann man die vom „Fahrstrahl" r in der Zeiteinheit überstrichene Fläche als ein Dreieck von der Grundlinie v und der Höhe r ansehen. Dann müssen die Flächeninhalte aller dieser Dreiecke gleich groß sein.
Kepler hätte sein zweites Planetengesetz mit einem Stück Bindfaden und einem kleinen Ball vorführen können, wenn er den Drehimpulssatz schon gekannt hätte. Wir nehmen noch eine kleine Blechhülse dazu, fädeln die Schnur mit dem daran gebundenen Ball hindurch und schleudern ihn langsam im Kreis herum (Bild 12). Ziehen wir jetzt an der Schnur, so verkürzt sich der Radius r

13. Bahn von Sputnik 3 maßstäblich im Verhältnis zum Erddurchmesser



des Drehkreises, und der Ball vergrößert seine Umlaufgeschwindigkeit ganz beträchtlich. Auffällig ist es, daß wir beim Hereinholen der Schnur mit dem Schwingen sogar aufhören können. Der Ball wirbelt zuletzt ganz von selbst herum.
Solch krasse Änderungen des Abstandes r und damit der Geschwindigkeit, wie sie uns der Ball vorführt, gibt es bei den Planeten natürlich nicht. Ihre Bahn kommt der Kreisform ziemlich nahe, der Abstand r schwankt relativ geringfügig.
Bei den künstlichen Satelliten darf man sich nicht dadurch täuschen lassen, daß ihre Entfernung von der Erdoberfläche beträchtlich differieren kann. Die kleinste bzw. größte Entfernung von der Erde bezeichnet man hier als *Perigäum* bzw. *Apogäum*. Beim Sputnik 3 betrugen diese Entfernungen von der Erdoberfläche 220 km bzw. 1880 km (Bild 13). Die entsprechenden Bahngeschwindigkeiten verhielten sich aber nur wie 1,25 : 1.[3])

Drehung und Gegendrehung

Zwei miteinander in Verbindung stehende Körper, die von außen her keiner Einwirkung unterliegen, hatten wir ein „abgeschlossenes System" genannt. Als Ganzes, so hatten wir gesehen, kann es seinen Impuls nicht ändern. Dasselbe gilt auch für den Drehimpuls.
So denken wir nochmals an unsere abenteuerliche Lage zurück, da wir ziemlich hilflos im Weltenraum schwebten. Um die Langeweile abzukürzen, treiben wir ein wenig Gymnastik. Lassen wir den rechten Arm nach vorn kreisen, so erteilen wir ihm mit Hilfe unserer Muskelkraft einen Drehimpuls von bestimmter Größe. Damit aber der *Gesamt*drehimpuls den Betrag Null beibehält, dreht sich der übrige Körper im entgegengesetzten Sinn. Er bleibt sofort stehen, wenn wir mit der Armbewegung aufhören. Drehen wir den Arm wieder zurück, so tut das auch der übrige Körper. Auf diese Weise können wir uns nach allen Seiten hin drehen und wenden und uns das Weltall nach allen Richtungen hin bequem beschauen.

[3]) Da das gravitierende Zentrum nach Satz 22 im Erdmittelpunkt liegt, müssen die Strecken r von hier aus gemessen werden. Sie betragen dann $r_1 = (6378 + 220)$ km $= 6598$ km bzw. $r_2 = (6378 + 1880)$ km $= 8258$ km. Daraus folgt nach Gleichung (18)

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{8258}{6598} = 1{,}25 : 1 \, .$$

Das ist vor allem für künstliche Satelliten und Raumschiffe wichtig, wenn sie ihre Lage im Raum verändern sollen. In dieser Weise drehte ein vom Sonnenlicht gesteuertes Kreiselsystem Lunik 3 immer so, daß sich seine Objektive genau auf den Mond richteten und so die historisch unvergeßlichen Bilder von seiner Rückseite aufnahmen.

Selbstverständlich gilt auch der Satz vom Drehimpuls universell. Rentner Müller z. B. holt jeden Morgen seine Brötchen. Bedächtig geht er an seinem Haus entlang zum Bäcker. Ob er weiß, daß es dabei um den Drehimpuls geht? Bei jedem Schritt stößt er die Erdkugel ein wenig nach hinten und sich selbst nach vorn. Es ist aber zu bedenken, daß die Masse der Erde unvorstellbar groß ist und sich nicht so leicht erschüttern läßt. Herr Müller darf also ruhig glauben, daß er sich allein bewegt. Auch die zahllosen Fahrräder, Autos und Eisenbahnen, die sich jeden Augenblick in Bewegung setzen, können das nur deshalb, weil die Erde deren Impuls aufnimmt und ihre eigene Bewegung dadurch um einen unmeßbar winzigen Betrag verändert. Vom Fußgänger bis zur Weltraumrakete beherrscht ein einziges Prinzip alle nur denkbaren Arten der Fortbewegung.

14. Jeder Fußgänger erteilt der Erde einen kleinen Drehimpuls

Die Überwindung der Schwerkraft

Die Gravitation

Was wir bis jetzt betrachteten, waren im wesentlichen nur Auswirkungen der in allen Körpern schlummernden Eigenschaft der Trägheit. Ihr zur Seite tritt aber noch eine zweite, deren Entdeckung wohl Newtons größte Leistung war. Bei der theoretischen Untersuchung der Keplerschen Planetenbahnen fand er, daß sich alle Körper dieser Welt nach einem bestimmten Gesetz gegenseitig anziehen.

(19) *Gravitationsgesetz:*
Zwei Körper ziehen sich mit einer Kraft gegenseitig an, die dem Produkt ihrer Massen proportional und dem Quadrat ihres Abstandes umgekehrt proportional ist.

Der Proportionalitätsfaktor ist die Gravitationskonstante f, womit das Gesetz lautet:

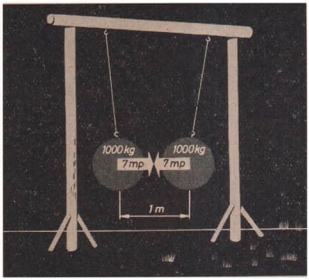
$$(20)\quad F = \frac{f m_1 m_2}{r^2}\,.$$

Hierbei ist die

(21) *Gravitationskonstante:* $f = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \mathrm{m^3/kg\,s^2}$.

Diese auch Massenanziehung genannte Erscheinung bestimmt nicht nur die Bewegung der Planeten, sondern tritt immer auf, wo irgend zwei Körper einander gegenüberstehen. Ob es zwei Bleistifte sind, die man nebeneinanderhält, oder zwei Äpfel, stets ziehen sie sich gegenseitig an. Freilich ist in solchen Fällen die Kraft von derart winziger Größe, daß sie überhaupt nicht spürbar wird. Wenn wir etwa an zwei immerhin recht große Bleikugeln von je 1000 kg Masse denken, deren Mittelpunkte um einen Meter entfernt sind, so ergibt die Rechnung[4]) kaum 10 Millipond (Bild 15).

[4])
$$F = \frac{6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \mathrm{m^3/kg\,s^2} \cdot 1000\ \mathrm{kg} \cdot 1000\ \mathrm{kg}}{1\ \mathrm{m^2}} = 6{,}67 \cdot 10^{-5}\ \mathrm{N} \text{ oder rund } 7 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{kp}\,.$$



15. Masseanziehung zweier Bleikugeln von je 1000 kg (Neigungswinkel der Aufhängung stark übertrieben)

Das Gravitationsgesetz läßt sich am einfachsten auf homogene Kugeln anwenden, da in diesem Falle der Abstand r sofort angegeben werden kann. Es gilt dann der Satz:

(22) *Die Gravitation homogener kugelförmiger Körper wirkt so, als sei ihre gesamte Masse im Mittelpunkt vereinigt.*

Das ist besonders bei Himmelskörpern wichtig, die meistens in dieser Weise behandelt werden können. Man mißt dann ihre Entfernung r von Mitte zu Mitte.
Mit elektrischen oder magnetischen Kräften hat die Gravitation nicht das geringste zu tun. Die Gravitation wirkt durch alle Körper hindurch, sie läßt sich weder abschirmen noch sonstwie beeinflussen. Wollte man deswegen vor dem Problem der Massenanziehung als einem unerforschlichen Geheimnis der Natur resignieren, so hieße das, Aufgabe und Arbeitsweise der Naturwissenschaft gründlich zu verkennen.
Newton konnte nur feststellen, daß die an einem Körper beobachtete Trägheit und seine Gravitationswirkung stets einander proportional sind. Im übrigen liegen hier zunächst zwei vollständig getrennte physikalische Effekte vor. Ein bedeutender Schritt, die beiden Erscheinungen trotzdem unter einen Hut zu bringen, ist die von Albert Einstein entwickelte Relativitätstheorie. Sie geht von dem Gedanken aus, daß Trägheit und Gravitationswirkung eines Körpers nicht nur einander proportional, sondern sogar miteinander identisch sind. Dann ergibt sich die Gravitation aus den allgemeinen Eigenschaften des Raumes und ist nur eine Folge von dessen geometrischer Beschaffenheit. Wir kommen auf S. 161 nochmals darauf zurück.
Der weitere Ausbau der Relativitätstheorie führt schließlich zu der Hypothese, daß sich die Gravitation mit Lichtgeschwindigkeit ausbreite, und zwar in Form von *Gravitationswellen*. In analoger Weise, wie man den Lichtwellen die Photonen oder Lichtquanten zuordnet, könnten den Gravitationswellen auch *Gravitonen* oder Gravitationsquanten entsprechen. Diese wären also winzigste Teilchen oder Portionen von Gravitationsenergie, die von den einander anziehenden Körpern ausgestoßen werden. Obwohl sich Einstein selbst schon seit dem Jahre 1918 mit der von ihm vermuteten Strahlung beschäftigte, ist man noch nicht allzuweit vorangekommen. Auch die Gravitonen selbst konnte man bis jetzt noch nicht nachweisen. Es gibt aber Fachleute, die die Sache gar nicht so aussichtslos beurteilen.

Schwerebeschleunigung und Schwerkraft

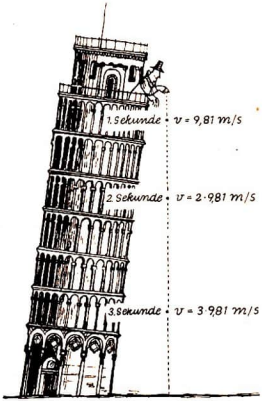
Es gibt verschiedene Möglichkeiten, sich mit der Natur auseinanderzusetzen. Man kann alles so hinnehmen, wie es ist und einfach sagen: „Das ist nun mal so". Man kann auch anfangen zu denken, daß es durchaus nicht so sein müsse, sondern vielleicht ganz anders, vielleicht viel weniger schön, bedeutend unangenehmer und verzwickter. Dann staunt man plötzlich und konstatiert erfreut, wie wunderbar doch alles eingerichtet sei. Mangels genügender Kenntnisse kann man nicht umhin, dieses Sosein einem höheren Willen zuzuschreiben, der das alles so fertigbringe. Damit kommt man zur Religion. Hierbei verzichtet man auf weiteres Nachdenken und überläßt das anständigerweise einem anderen, der sicherlich mehr Verstand hat. Man kann aber auch diesen höheren Willen streichen und darangehen, durch eigenes Nachdenken das Zustandekommen dieses Soseins zu ergründen. Damit kommt man zur Physik.
Man kann sich darüber wundern, wieso ein Gegenstand zur Erde fällt. ARISTOTELES meinte, dies sei einem „Trieb" zuzuschreiben, demzufolge er an seinen „natürlichen Ort" zu gelangen trachte. Das ist keine Erklärung, sondern nur eine mystische Umschreibung des Wortes „fallen". Um eine Erklärung zu finden, bleibt nichts weiter übrig, als den Fallvorgang experimentell zu untersuchen. Das tat zum ersten Mal GALILEI.
Dabei fand er, daß die Endgeschwindigkeit v eines fallenden Körpers während der dabei verstreichenden Zeit t gleichmäßig zunimmt:

(23) *Endgeschwindigkeit eines fallenden Körpers:* $v = g\,t.$

Hierin ist g die *Schwerebeschleunigung* (Bild 16). Ebenso wichtig war seine zweite Feststellung. Die Schwerebeschleunigung hat für alle Körper, mag ihre Masse groß oder klein sein, an der Erdoberfläche stets den gleichen Betrag:

(24) *Schwerebeschleunigung auf der Erde:* $g = 9{,}81\,\mathrm{m/s^2}.$

Wenn sich aber eine Masse m beschleunigt bewegt, so muß man eine Kraft voraussetzen, die als Ursache dieser Beschleunigung in Frage kommt. Diese ist die Schwerkraft, die man gewöhnlich als „Gewicht" des Körpers bezeichnet. Man



16. Galileis Fallversuche auf dem schiefen Turm zu Pisa

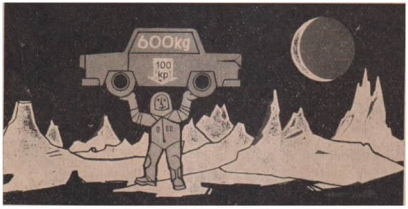
braucht im Newtonschen Grundgesetz (5) nur die beliebige Beschleunigung a durch den besonderen Wert g zu ersetzen und erhält dann das

$$(25)\ \textit{Gewicht:} \quad G = m \cdot g.$$

Wie berichtet wird, sei Newton durch den Anblick eines fallenden Apfels auf die Gravitation gekommen. Als Ursache der Schwerkraft kann nur die zwischen der Erde und dem Apfel bestehende Massenanziehung in Frage kommen. Wenn das richtig ist, trifft dieser Zusammenhang nicht nur für das Verhältnis Erde — Apfel zu, sondern muß von universeller Gültigkeit sein. Bezeichnen wir die Masse eines beliebigen Himmelskörpers mit m_1, seinen Radius mit r_1 und die Masse eines an seiner Oberfläche befindlichen Gegenstandes mit m_2, so erhalten wir $m_2 g_1 = \frac{f m_1 m_2}{r_1^2}$. Da sich die Bezugsmasse m_2 herauskürzt, bekommen wir auf diese Weise die

$$(26)\ \textit{Schwerebeschleunigung auf einem beliebigen Himmelskörper:} \quad g_1 = \frac{f m_1}{r_1^2}.$$

Jeder Himmelskörper hat demnach seine eigene Schwerebeschleunigung. Sie hängt nicht nur von seiner Masse, sondern auch von seiner Größe ab. Sollte es z. B. einmal Fahrscheine nach dem Mond geben, dann werden wir zu unserer vollkommen wörtlich zu nehmenden Erleichterung feststellen, daß die Schwerebeschleunigung dort nur den 6. Teil von derjenigen der Erde beträgt [5]) (Bild 17).

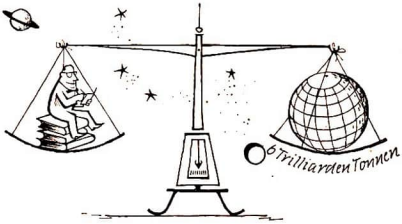


17. Schwerkraft auf dem Mond

[5]) Mit der Mondmasse $m_1 = 7{,}35 \cdot 10^{22}$ kg und dem Mondradius $r_1 = 1738$ km erhält man

$$g = \frac{6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \mathrm{m^3/kg\,s^2} \cdot 7{,}35 \cdot 10^{22}\ \mathrm{kg}}{1{,}738^2 \cdot 10^{12}\ \mathrm{m^2}} = 1{,}62\ \mathrm{m/s^2}.$$

18. Masse der Erde



Um außergewöhnliche Zustände zu erleben, brauchen wir aber gar nicht so weit zu gehen, denn der bekannte Wert $g = 9{,}81\ \mathrm{m/s^2}$ gilt ja nur für einen bestimmten Abstand vom Erdmittelpunkt. Je weiter wir uns von ihm entfernen, desto mehr muß auch der g-Wert abnehmen. Wie aus Gleichung (26) hervorgeht, müssen sich dann die g-Werte in verschiedenen Abständen vom Erdmittelpunkt umgekehrt wie die Quadrate dieser Abstände verhalten. Daraus ergibt sich sofort die

(27) *Schwerebeschleunigung in beliebigem Abstand vom Erdmittelpunkt:* $$g_2 = \frac{g_1 r_1^2}{r_2^2}\,.$$

Der Wert von g kann sich hiernach nur dann wesentlich ändern, wenn die Entfernungen r_1 und r_2 deutlich genug verschieden sind. Selbst wenn man einen 1000 m hohen Berg besteigt, nimmt der g-Wert nur um etwa 0,03 % ab. Es ist wohl kaum anzunehmen, daß sich ein normaler Bergsteiger dafür interessieren wird. Allerdings gibt es Probleme, wie in der Geophysik, wo es auf solch kleine Differenzen gerade ankommt. Dann sind jedoch noch andere Faktoren zu berücksichtigen, wie die von der Erdrotation hervorgerufene Fliehkraft, die Abweichung der Erdgestalt von der Kugelform, der Einfluß der Gesteinsdichte usw. Gleichung (27) werden wir aber brauchen, wenn es um die Umlaufszeit von künstlichen Satelliten geht, da sich dann r_1 und r_2 schon ganz beträchtlich unterscheiden.

Mit der Gleichung (26) allein können wir noch mehr anfangen. Mit nichts weiter als Bleistift und Papier läßt sich die Erde wägen. Wir brauchen diese Gleichung nur nach m_1 umzustellen und erhalten $m_1 = \frac{g r_1^2}{f}$. Mit den bekannten Werten für Erdradius und Schwerebeschleunigung liefert sie als Ergebnis rund $6 \cdot 10^{24}$ kg.[6])

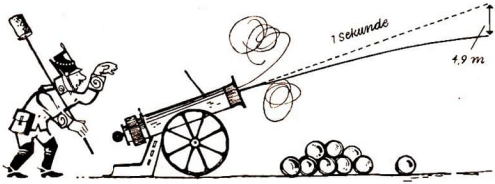
Ganze 6 Trilliarden Tonnen müssen also herhalten, damit ein Körper von 1 kg Masse mit der Kraft von 1 kp angezogen wird!

[6]) Mit dem mittleren Erdradius $r_1 = 6378$ km und $g = 9{,}81\ \mathrm{m/s^2}$ ergibt die letzte Gleichung

$$m_1 = \frac{9{,}81\ \mathrm{m/s^2} \cdot 6{,}378^2 \cdot 10^{12}\ \mathrm{m^2}}{6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \mathrm{m^3/kg\,s^2}} = 5{,}98 \cdot 10^{24}\ \mathrm{kg}\,.$$

Die Kreisbahngeschwindigkeit

Es hat den Menschen immer schon Spaß gemacht, mit allen möglichen Gegenständen zu werfen. Ungezogene Jungen tun das nach antiken Vorbildern mit Steinen, Blasrohren und Katapulten. Meist zielen sie gerade dorthin, wo es verboten ist. Wenn sie dann größer und vernünftiger werden, gehen sie schon mit mehr Ernst an die Sache heran, begeben sich auf den Sportplatz und setzen dort ihre Tätigkeit nicht minder eifrig mit Eisenkugeln und anderen Geräten fort. In beiden Fällen hängen innere Befriedigung und äußerer Erfolg von der Entfernung ab, die solche Gegenstände in der Luft zurücklegen. Der unsichtbare Gegner ist die Schwerkraft. Er ist fair bis zum äußersten, läßt sich aber nie unterkriegen. Nur für Sekunden fliegen die Kugeln und Steine durch die Luft. Auf gar so einfache Weise läßt sich die Schwerkraft nicht überrumpeln.



19. Fallhöhe eines Geschosses

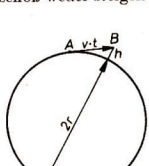
Auch Gewehre und Kanonen können sie nicht überwinden. Nicht ein einziger Schuß fällt geradlinig aus. So schnell das Geschoß auch fliegen mag, unfehlbar greift die Schwerkraft ein und krümmt seine Bahn nach unten. Sie zwingt dem Geschoß die gleiche Fallhöhe auf wie einem Stein, den man zu Boden fallen läßt. Wie es bereits Galilei feststellte, fällt ein Körper im Zeitraum t um die

$$(28)\quad \textit{Fallhöhe:} \qquad h = \frac{g}{2}\, t^2.$$

In einer Sekunde legt er die Strecke 4,9 m zurück, in einer zehntel Sekunde 4,9 cm.[7]) Auch das schnellste Geschoß kann sich diesem Gesetz nicht entziehen (Bild 19). Die Kunst kann nur darin bestehen, die Flugzeit geschickt auszunutzen. Man erteilt dem Geschoß eine solche Geschwindigkeit, daß es während dieser kurzen Zeitspanne möglichst weit kommt, ehe es von der Erde wieder eingefangen wird.

[7]) Die Fallhöhe in 0,1 s ist $h = \frac{g}{2}\, t^2 = \frac{9{,}81\ \mathrm{m/s^2} \cdot 0.1^2\ \mathrm{s^2}}{2} = 0{,}049\ \mathrm{m}$.

Was bei diesem Wettrennen zwischen Schußgeschwindigkeit und Fallbeschleunigung jedenfalls immer herauskommt, sind Kurven von stets der gleichen Art. Es sind Wurfparabeln, die immer wieder auf der Erde landen. Die irdische Schießkunst interessiert aber nur am Rande. Hartnäckig verfolgt uns vielmehr der Gedanke, der Schwerkraft dennoch ein Schnippchen zu schlagen.
Sie hat durchaus ihre schwachen Stellen. Eine davon ist der Umstand, daß die Erde rund ist. Gäbe es keine Schwerkraft, dann müßte ein horizontal abgefeuertes Geschoß nach dem Trägheitsgesetz schnurstracks in den Weltenraum fliegen, genau in Richtung der Tangente, die man an die gekrümmte Erdoberfläche legen kann. Je weiter es auf der Tangente fortschreitet, desto mehr entfernt es sich vom Erdboden. Gerade das aber verhindert die Schwerkraft, indem sie die Tangente zur Parabel verbiegt. Die Schwerkraft ist jedoch nicht allmächtig. Das Äußerste, was sie in der ersten Sekunde schaffen kann, ist eine Fallhöhe von 4,9 m. Wenn sich also ein genau horizontal abgeschossener Körper so schnell bewegt, daß er bei Nichtvorhandensein der Schwerkraft innerhalb einer Sekunde den Abstand 4,9 m von der Erde erreichen würde, hat die Schwerkraft ihr Spiel verloren. Von der Erde aus gesehen, gewinnt dann der Körper in jeder Sekunde ebensoviel an Höhe, wie ihn die Schwerkraft nach unten zieht. Sein Abstand von der Erde muß immer der gleiche bleiben, und das kann am Ende nichts anderes ergeben als eine um die Erde verlaufende *Kreisbahn*. Ein dieses Schauspiel bewundernder Beobachter muß den Eindruck haben, als sei plötzlich eine Kraft aufgetaucht, die der Schwerkraft das Gleichgewicht hält. Doch ist sie ganz anderer Art, als es Kräfte sonst sind.
Wenn man eine Zigarre erstehen will, braucht man Geld dazu und muß über die nötige Kaufkraft verfügen. Da hält einem der gute Freund eines Tages mit verbindlichem Lächeln sein Kistchen hin. Man ist nicht ganz abgeneigt und greift natürlich freudig zu. Ursache dieser unverhofften Kaufkraft – mit welchem Ausdruck wir die Liebenswürdigkeit des Geschenkes beileibe nicht untergraben wollen – ist eine unter Männern übliche freundliche Gewohnheit. Bei dem abgefeuerten Geschoß ist es ebenfalls eine Gewohnheit, die eine Kraft hervorruft. Vermöge seiner Trägheit, immer nur auf einer Geraden zu fliegen, widersetzt es sich jeder Kraft, die es von der geraden Bahn abbringen möchte. Es sieht so aus, als stäke eine Kraft in dem Geschoß, die der Schwerkraft entgegengerichtet ist. Solche Kräfte, deren Dasein nur der Trägheit eines Körpers zu verdanken ist, nennt man *Trägheitskräfte*. In diesem Fall hat die Trägheitskraft eine Kreisbahn zur Folge, und man bezeichnet sie als *Fliehkraft*. Ihr zufolge wird das Geschoß weder steigen noch fallen, sondern immer dieselbe Höhe über der Erde beibehalten.
Um die Fliehkraft zu berechnen, gehen wir davon aus, daß der Körper mit der Geschwindigkeit v in der Zeit t ein Stück der Tangente $\overline{AB}$ (Bild 20) zurücklegt. Es ist demnach $\overline{AB} = v \cdot t$. Damit er nicht zur Erde fällt, muß, wie gesagt, die erreichte Höhe gleich der Fallhöhe $h = \frac{g}{2} t^2$ sein. Den weiteren Zusammenhang liefert jetzt der Tangentensatz der Geometrie. Er lautet



20. Zur Berechnung der Kreisbahngeschwindigkeit

$$\overline{AB}^2 = h\,(2r + h).$$

Wenn wir aber bedenken, daß der Körper im Zeitraum einer Sekunde nur das kleine Stück $h = 4{,}9$ m zurücklegt, so ist das

im Vergleich zum Erddurchmesser $2r$ so winzig wenig, daß h gegenüber $2r$ ohne Bedenken wegfallen und die letzte Gleichung zu $\overline{AB}^2 = 2rh$ vereinfacht werden kann. Jetzt brauchen wir nur noch für $\overline{AB}$ und h die eben angegebenen Größen $v \cdot t$ und $\frac{g}{2} t^2$ einzusetzen und erhalten $v^2 t^2 = \frac{2rgt^2}{2}$, oder nach Kürzen

$$(29)\quad v^2 = r \cdot g.$$

Multiplizieren wir noch beide Seiten mit der Masse m, so folgt

(30) *Fliehkraft = Schwerkraft*

$$\frac{mv^2}{r} = mg\,.$$

Natürlich sind wir jetzt neugierig, die Geschwindigkeit v zu kennen, bei der dieses wichtige Ereignis eintritt. Einfaches Auflösen der Gleichung (29) ergibt die

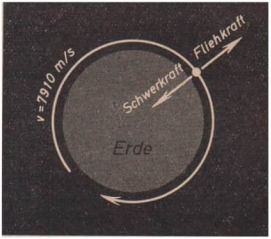
(31) *Kreisbahngeschwindigkeit in der Nähe der Erdoberfläche:* $v_1 = \sqrt{r_1 \cdot g_1}\,.$

Mit den bekannten Werten für Erdradius und Schwerebeschleunigung errechnet sich der Betrag,[8]) den man auch die

(32) *1. kosmische Geschwindigkeit:*

$$v_k = 7910 \text{ m/s}$$

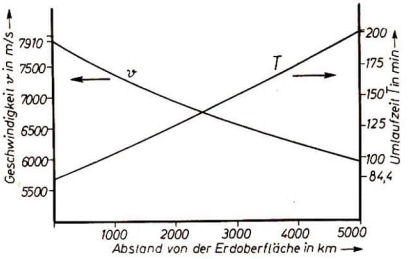
nennt (Bild 21).



21. Die Kreisbahngeschwindigkeit (1. kosmische Geschwindigkeit)

[8]) Mit dem mittleren Erdradius $r_1 = 6378$ km und $g = 9{,}81$ m/s² ergibt sich $v = \sqrt{6{,}378 \cdot 10^6 \text{ m} \cdot 9{,}81 \text{ m/s}^2} = 7910$ m/s.

22. Kreisbahngeschwindigkeit v und Umlaufzeit T bei verschiedenem Abstand von der Erde



Inzwischen wird man schon bemerkt haben, worauf das praktisch hinausläuft. Die soeben errechnete Geschwindigkeit ist diejenige, mit der ein künstlicher Satellit tangential zur Erdoberfläche, d. h. in horizontaler Richtung, starten muß, wenn er die Erde umkreisen soll. Allein in den ersten 6 Jahren nach dem am 4. 10. 1957 erfolgten Start von Sputnik 1 ist das Experiment an die 200mal gelungen. Es gelingt um so besser, je weiter die Bahn von der Erde entfernt ist und je genauer der Flugkörper beim Erreichen der Endgeschwindigkeit in die Kreisbahn einschwenkt; denn es handelt sich darum, dem Reibungswiderstand der Lufthülle möglichst zu entgehen, der die Bewegung immer wieder abbremst und die kostbaren Objekte in der Atmosphäre verglühen läßt. Die ideale Kreisbahn hat noch kein Satellit erreicht. Stets waren es mehr oder weniger langgestreckte Ellipsen.

In größeren Höhen stimmt jedoch die mit (32) angegebene Startgeschwindigkeit 7910 m/s nicht mehr. Hier muß dann der größere Abstand r_2 vom Erdmittelpunkt eingesetzt werden und anstelle von g_1 der entsprechend Gleichung (27) veränderte Wert. Tun wir das, so ändert sich Gleichung (31) um in die

(33) *Kreisbahngeschwindigkeit bei beliebigem Abstand vom Erdmittelpunkt:* $$v_2 = r_1 \sqrt{\frac{g_1}{r_2}}\,.$$

Allerdings macht der Unterschied in den meisten Fällen gegenüber dem unter (32) genannten Wert nicht allzuviel aus. Beim Sputnik 5 vom 19. 8. 1960, dessen mittlere Entfernung von der Erde 325 km betrug, errechnet sich die Kreisbahngeschwindigkeit zu 7716 m/s.[9]) Wie groß diese Geschwindigkeit bei anderen Erdabständen sein muß, ist aus Bild 22 zu ersehen.

[9]) Mit $r_1 = 6378$ km und $r_2 = (6378 + 325)$ km $= 6307$ km findet man nach (33) $v = 6{,}378 \cdot 10^6\,\mathrm{m} \sqrt{\frac{9{,}81\,\mathrm{m/s^2}}{6{,}703 \cdot 10^6\,\mathrm{m}}} = 7716\,\mathrm{m/s}$.

Umlaufszeiten und Synchronsatelliten

Anstelle der Umlaufsgeschwindigkeit von Himmelskörpern wird jedoch meist deren Umlaufszeit genannt, da sie mit der Uhr leicht gemessen und nachgeprüft werden kann. Man erhält sie nach der bekannten Beziehung Zeit $= \frac{\text{Weg}}{\text{Geschwindigkeit}}$ und braucht nur daran zu denken, daß der um das anziehende Zentrum laufende Körper bei einer einmaligen Umkreisung den Weg $2\pi r$ zurücklegt. Das gibt unmittelbar die

$$(34)\quad \textit{Umlaufszeit:}\quad T = \frac{2\pi r}{v}\,.$$

Mit dieser Gleichung und den vorangegangenen können wir viele mit der Kreisbewegung von Himmelskörpern zusammenhängende Rechnungen durchführen. Ob es sich aber um Planeten oder künstliche Satelliten handelt, die allgemeinen Bewegungsgesetze müssen dieselben sein. Wenn wir uns für die Umlaufszeit eines auf nahezu kreisförmiger Bahn laufenden Satelliten interessieren,[10]) so brauchen wir in Gleichung (33) lediglich $v_2 = \frac{2\pi r_2}{T_2}$ einzusetzen und erhalten für die

$$(35)\quad \textit{Umlaufszeit eines Satelliten auf einer Kreisbahn:}\quad T_2 = 2\pi \frac{r_2}{r_1}\sqrt{\frac{r_2}{g_1}}$$

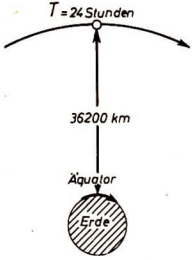
(r_1 Erdradius, g_1 Schwerebeschleunigung an der Erdoberfläche, r_2 Abstand des Satelliten).
Damit sind wir wieder einen Schritt weitergekommen und können uns jetzt sogar einem besonders interessanten Problem zuwenden. Es handelt sich um einen Satelliten, der parallel zum Erdäquator umläuft, und zwar so, daß er für eine Erdumkreisung genau 24 Stunden benötigt. Bewegt er sich dabei von Westen nach Osten, dann wird es von der Erde aus so aussehen, als ob er über einem bestimmten Punkt des Äquators wie ein künstlicher Fixstern stillstünde. Fast könnte man meinen, der Gedanke an einen solchen *Synchronsatelliten* sei eine ausgemachte Spielerei, so recht dazu angetan, die staunende Mitwelt von der frappierenden Kunst seiner Erbauer zu überzeugen. Aber das genaue Gegenteil ist der Fall: es wäre der erste Satellit, der sich wirklich schnell bezahlt machen würde. Er könnte als passiver Nachrichtensatellit, und zwar als Reflektor ultrakurzer Wellen, dazu dienen, eine vollkommen ungestörte Fernseh- und Nachrichtenverbindung über weiteste Strecken und Ozeane hinweg herzustellen. Man kann ihn auch als Relaissender ausbauen, der von der Erde aus gesteuert wird und weite Gebiete der Erdoberfläche gleichmäßig überstrahlt.

[10]) Für Sputnik 5 erhält man mit dem Erdradius $r_1 = 6378$ km, seiner mittleren Entfernung vom Erdmittelpunkt $r_2 = (6378 + 325)$ km $= 6703$ km und $g_1 = 9{,}81\ \text{m/s}^2$ nach Gleichung (35)

$$T = \frac{2\pi \cdot 6{,}703}{6{,}378}\sqrt{\frac{6{,}703 \cdot 10^6\ \text{m}}{9{,}81\ \text{m/s}^2}} = 5458\ \text{s} = 90{,}9\ \text{min}\,.$$

Beobachtet wurden 90,7 min.

23. Der Synchronsatellit steht über dem Äquator still



Die Genauigkeit des einzuhaltenden 24-Stunden-Kurses hängt nach Gleichung (35) lediglich von dem richtigen Abstand r_2 ab. Man kann sich leicht ausrechnen,[11]) daß er in 36200 km Höhe über dem Äquator laufen muß (Bild 23). Es wurde festgestellt, daß bereits drei solcher ständiger Stationen genügen, um die ganze Erde gleichmäßig zu bestrahlen. Gar so einfach dürfte die technische Realisierung indessen nicht sein. Der Satellit müßte beispielsweise in der Lage sein, seine Position aus eigener Kraft ständig zu korrigieren, da sich auch bei großer Präzision des Abschusses kleinste Abweichungen vom Sollkurs nicht vermeiden lassen und auch hinterher noch auftreten können. In Anbetracht der in der Sowjetunion entwickelten minutiösen Raketentechnik dürfte jedoch die Verwirklichung des Synchronsatelliten in greifbare Nähe gerückt sein.

Zweierlei Jahre

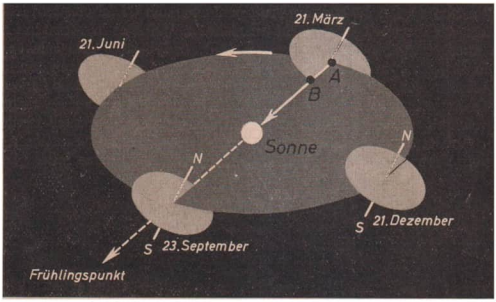
Wenn man die Umlaufszeit eines Himmelskörpers bestimmen will, so genügt nicht allein eine Uhr. Erforderlich ist außerdem noch ein fester Punkt am Himmel, den der Himmelskörper wenigstens zweimal nacheinander passieren muß, damit man die dazwischenliegende Zeitspanne messen kann. Erfreulicherweise sind solche markante Punkte am Himmel keine Mangelware, wenngleich es immerhin auch Sterne gibt, die aus bestimmten Gründen (S. 47) kleine Eigenbewegungen ausführen. Abgesehen davon aber ist der Fixsternhimmel ein gutes Bezugssystem für solche Zeitmessungen.

[11]) Da die Umlaufszeit $T = 24$ Stunden oder 86400 Sekunden gegeben ist, muß Gleichung (35) nach r_2 aufgelöst werden. Es ergibt sich $r_2 = \sqrt[3]{\frac{T^2 r_1^2 g_1}{4\pi^2}}$ und mit $r_1 = 6378$ km und $g_1 = 9{,}81$ m/s²

$$r_2 = \sqrt[3]{\frac{86400^2\,\mathrm{s}^2 \cdot 6{,}378^2 \cdot 10^{12}\,\mathrm{m}^2 \cdot 9{,}81\,\mathrm{m/s}^2}{4\pi^2}} = 4{,}257 \cdot 10^7\,\mathrm{m}\,.$$

Dies ist der Abstand vom Erdmittelpunkt, von dem der Erdradius abzuziehen ist, um die Höhe über dem Erdboden zu erhalten.

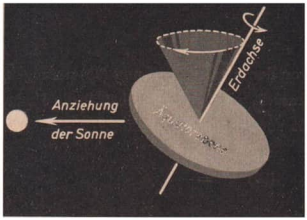
Die für unser Leben wichtigste Umlaufszeit ist die der Erde um die Sonne. Wir können sie nur dadurch bestimmen, daß wir die scheinbare Bewegung der Sonne am Himmel beobachten und dabei die tägliche Rotation der Erde um ihre eigene Achse außer acht lassen. Nimmt man einen bestimmten Fixstern als Bezugsmarke und mißt die Zeit, die zwischen zwei Durchgängen der Sonne durch diesen Punkt vergeht, so erhält man die *siderische Umlaufzeit*. Sie beträgt 1 siderisches Jahr, und dieses dauert 365,25636 Tage.
Die Bewegung der Erde um die Sonne wird jedoch dadurch komplizierter, daß die Erdachse erstens schräg (unter einem Winkel von 23°27′) zur Erdbahn steht und zweitens im Laufe langer Zeiträume ihre Stellung verändert. Sehen wir von dieser Bewegung vorerst ab, so schneidet die ebenfalls schräg stehende Äquatorebene die Erdbahnebene (die sogenannte Ekliptik) in einer Geraden AB (Bild 24). Diese bleibt bei feststehender Erdachse immer zu sich selbst parallel.



24. Zur Definition des Jahres

Bei ihrem jährlichen Umlauf um die Sonne passiert die Erde zweimal einen Punkt, wo diese Schnittlinie AB durch den Sonnenmittelpunkt läuft. Es sind das die Zeitpunkte, in denen Tag und Nacht die gleiche Länge haben, d. h. Frühlingsanfang (21. März) oder Herbstanfang (23. September). Verlängert man die Gerade A–B–Sonne am 21. März, so weist sie nach einem bestimmten Punkt des Himmels, den man *Frühlingspunkt* nennt. Die zwischen zwei Durchgängen der Sonne durch den Frühlingspunkt vergehende Zeit ist das *tropische Jahr*. Stünde die Erdachse unveränderlich im Raum fest, dann müßten siderisches und tropisches Jahr einander gleich sein, da es ja gleichgültig ist, welchen Punkt des Sternenhimmels man als Bezugspunkt der Erdbewegung auswählt.
Nun ist aber die Erde keine vollkommene Kugel, sondern ein wenig abgeplattet. Man kann es so auffassen, als habe sie rings um den Äquator einen Wulst. Er wird von der Anziehungskraft der Sonne erfaßt, und die Sonne möchte ihn gern so drehen, daß die Äquatorebene mit der Erdbahn-

25. Die Präzessionsbewegung der Erde



ebene zusammenfällt. Die rotierende Erde reagiert auch darauf; aber nicht so, wie es die Sonne haben möchte. Die Erde benimmt sich nämlich so, wie es jeder Kreisel tut, den eine äußere Kraft umzukippen versucht. Seine Achse weicht rechtwinklig zur einwirkenden Kraft aus und läuft langsam auf einem Kegelmantel um (Bild 25). Es ist die bekannte *Präzession*, die man an jedem schräg auf dem Boden gesetzten Spielkreisel beobachten kann.
Die Präzession der Erdachse geht äußerst langsam vor sich. Im Laufe von 25730 Jahren beschreibt die Erdachse einen Kegelmantel, dessen halber Öffnungswinkel den genannten Betrag von 23° 27′ hat. Somit schwankt auch die stets senkrecht zur Erdachse stehende Äquatorebene im Raum. Ihre Schnittlinie AB mit der Erdbahnebene bleibt, auf die Dauer gesehen, nicht mehr parallel zu sich selbst und weist daher nicht erst am 21. März, sondern jedes Jahr ein wenig früher nach der Sonne. Der Frühlingspunkt verschiebt sich daher langsam im Laufe der Jahrhunderte. Im Altertum lag er im Sternbild des Widders und wird daher auch heute noch Widderpunkt genannt, obwohl er sich bereits im Sternbild der Fische befindet.
Während also für das siderische Jahr die Visierlinie A–Sonne–Fixstern festbleibt, ändert die Linie A–B–Sonne ihre Richtung. Das dadurch bestimmte tropische Jahr ist mit 365,24220 Tagen um 20 min 23 s ein wenig kürzer als das siderische Jahr.[12])
Unserem Zeitmaß der Sekunde und auch der heute üblichen Kalenderrechnung liegt das tropische Jahr zugrunde.

Umlaufszeiten und Massen

Die Bahnbewegung der Erde um die Sonne ist kein einmaliges Naturphänomen. Alle Körper, die irgendein Zentralgestirn umkreisen, sind den gleichen Gesetzen unterworfen. Der Unterschied kann nur in den individuellen Zahlenwerten bestehen. So haben wir uns bereits mit der Umlaufszeit von Erdsatelliten beschäftigt und gefunden, wie sie von der Erdentfernung abhängt. Es gibt jedoch noch ein allgemeineres Gesetz, mit dem man die Umlaufszeiten zweier um das gleiche Zentrum kreisender Himmelskörper unmittelbar vergleichen kann.

[12]) Dieser Zeitunterschied ergibt sich fast genau, wenn man die Dauer des tropischen Jahres durch die Präzessionsdauer dividiert: $\frac{365{,}2422 \text{ Tage}}{25730} = 0{,}01420$ Tage. Die noch verbleibende kleine Differenz rührt von zusätzlichen Schwankungen der Erdachse her, die wir der Einfachheit halber nicht berücksichtigt haben.

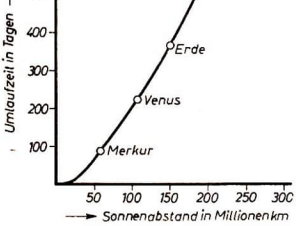
Anstatt von der letzten Gleichung (35) auszugehen, greifen wir noch einmal auf Gleichung (29) $v^2 = rg$ zurück, setzen hier nach (34) die Umlaufzeit T ein und nach Gleichung (26) $g = \frac{fm}{r^2}$. Das ergibt zunächst die Gleichung $\frac{4\pi^2 r^2}{T^2} = \frac{rmf}{r^2}$ oder kürzer

$$(36)\quad T^2 = \frac{4\pi^2 r^3}{mf}.$$

Für einen zweiten Körper, der um denselben Zentralkörper der Masse m läuft, gilt natürlich dieselbe Gleichung, nur mit dem Unterschied, daß T und r andere Beträge annehmen. Die übrigen Größen $4\pi^2$, m und f aber bleiben unverändert. Wenn wir jetzt das Verhältnis der Umlaufszeiten bilden, so kürzen sich die konstant bleibenden Größen heraus, und es verbleibt das

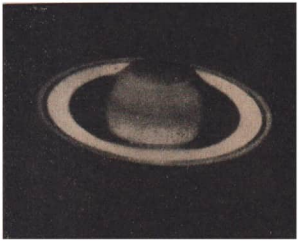
$$(37)\quad \textit{3. Keplersche Gesetz}\ (\text{Bild 26}):\ \frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{r_1^3}{r_2^3}.$$

Um den Inhalt dieses Gesetzes zu verdeutlichen, geht man am besten von einem Beispiel aus, in dem es gerade nicht gilt. Man könnte sich nämlich ein sehr primitives Modell des Sonnensystems denken: Die Sonne sei der Mittelpunkt eines gewaltigen Rades, und die Planeten seien in verschiedenen Abständen auf seinen Speichen befestigt. Dreht sich das Rad, so hätten aber alle Planeten trotz ihrer unterschiedlichen Abstände zwangsläufig dieselben Umlaufszeiten. Das Modell ist also falsch und muß verbessert werden.
Nehmen wir zwei Planeten, deren Abstände sich wie 1:2 verhalten mögen, dann dürfen ihre Umlaufszeiten demnach nicht gleich groß sein, sondern deren Quadrate müssen nach dem Keplerschen Gesetz in dem Verhältnis $1^3 : 2^3 = 1:8$ zueinander stehen. Die Umlaufszeiten müssen sich wie $\sqrt{1} : \sqrt{8} = 1:2{,}82$ zueinander verhalten. Der weiter außen liegende Planet braucht für einen Umlauf fast die dreifache Zeit des weiter innen liegenden! Um ein richtig funktionierendes Planeten-



26. Das 3. Keplersche Gesetz

27. Der Planet Saturn mit seinem Ringsystem



modell zu bauen, müßte man anstelle des Rades lauter konzentrische Ringe montieren, die nach außen hin immer langsamer rotieren. Es wäre eine ziemlich schwierige Bastelei.
Aber man kann sich die Mühe sparen. Das Modell existiert bereits fix und fertig und ist schon ziemlich alt. Es ist der Planet Saturn mit seinem schönen Ring, ein wahres Schmuckstück der Planetenfamilie. Wenn dieser Ring ein massiver Körper wäre, würde das dem soeben erläuterten 3. Keplerschen Gesetz widersprechen. Er müßte zumindest in lauter konzentrische Ringzonen zerfallen. Man erkennt in der Tat sehr deutlich, daß mehrere ausgeprägte konzentrische Ringsysteme vorhanden sind (Bild 27). Außerdem weiß man heute, daß das ganze System aus winzigen Körnchen und Stäubchen besteht, die den Saturn als eine Wolke von Miniatursatelliten umkreisen und das Sonnenlicht glitzernd reflektieren.
In unseren himmelsmechanischen Betrachtungen sind wir bis jetzt noch einer wichtigen Größe aus dem Weg gegangen: der Masse der Himmelskörper. Die Keplerschen Gesetze schweigen sich darüber aus. Sie gelten für einen mikroskopischen Massenpunkt ebenso wie für den größten Planeten. Auch für die Bewegung eines künstlichen Satelliten ist es völlig gleichgültig, wie groß seine Masse ist. In der vorletzten Gleichung (36) haben wir jedoch ein Werkzeug gefunden, auch diese Frage in Angriff zu nehmen. Das Zeichen m bedeutet hier die Masse des anziehenden Zentrums. Lösen wir die Gleichung nach m auf, so erhalten wir die

$$(38)\quad \textit{Masse des anziehenden Körpers:} \quad m = \frac{4\pi^2 r^3}{f T^2}\,.$$

Man kann sie hiernach berechnen, wenn Abstand r und Umlaufszeit T eines beliebigen umlaufenden Körpers bekannt sind. Auf diese Weise ergibt sich beispielsweise[13]) die Masse der Sonne $m = 1{,}99 \cdot 10^{30}$ kg, wenn die entsprechenden Daten der umlaufenden Erde eingesetzt werden.

[13]) Aus trigonometrischer Messung (S. 67) ergibt sich die Entfernung $r_1 = 149{,}6 \cdot 10^6$ km und damit die Sonnenmasse nach (38)

$$m_1 = \frac{4\pi^2 \cdot 1{,}496 \cdot 10^{33}\ \mathrm{m}^3}{365{,}25^2 \cdot 86400^2\ \mathrm{s}^2 \cdot 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \mathrm{m}^3/\mathrm{kg\ s}^2} = 1{,}99 \cdot 10^{30}\ \mathrm{kg}$$

(1 Tag = 86400 Sekunden).

Bei diesen Überlegungen haben wir allerdings eine stillschweigende Voraussetzung gemacht, die uns die Arbeit recht leicht machte. Wir haben einfach so getan, als ob der Zentralkörper, etwa im letzten Beispiel die Sonne, fest im Raum verankert wäre. Das ist aber nur zulässig, solange seine Masse im Vergleich zum umlaufenden Körper so groß ist, daß er durch dessen Bewegung nicht nennenswert beeinflußt wird. Im Beispiel Sonne—Erde brauchen wir uns über diese Rückwirkung keine Gedanken zu machen. Es gibt aber Fälle, bei denen eine solche Vereinfachung zu falschen Ergebnissen führen würde.

Mondmasse und Doppelsterne

Das Hammerwerfen gehört wohl zur Leichtathletik, ist aber doch nur etwas für schwere Männer. Über 7 Kilo wiegt die eiserne Kugel, die am stählernen Seil zu schwingen ist, um sie mit höchstmöglicher Geschwindigkeit in die Luft zu befördern. Dem Mann reißt es fast die Arme heraus, die Fliehkraft ist gewaltig. In gerader und aufrechter Haltung könnte er ihr nicht standhalten. Die Kugel und der nach der entgegengesetzten Seite verlagerte Körper rotieren um die Stelle, wo sich die sehnigen Beine des Athleten gegen den Boden stemmen. Sie liegt unterhalb des gemeinsamen Schwerpunktes.

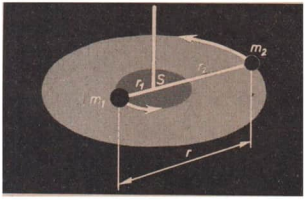
Ganz ähnlich macht es die Erde mit dem Mond, nur mit dem Unterschied, daß sie den Mond niemals los wird. Die Gravitation hält sie ewig zusammen. Die Erde hat auch keinen festen Stützpunkt, gegen den sie sich stemmen kann. Wenn man gewöhnlich sagt, daß der Mond um die Erde laufe, so ist das nur zur Hälfte wahr, denn beide kreisen umeinander. Was in Ruhe bleibt, ist allein der gemeinsame Schwerpunkt beider Körper.

Es steht somit die Aufgabe, die gegenseitige Bewegung zweier Himmelskörper zu berechnen, die keiner anderen Kraft als allein der Gravitation unterliegen. Man spricht hier vom *Zweikörperproblem*. Es ist leicht lösbar und wird unsere Einsichten etwas vertiefen helfen.

Der gemeinsame Schwerpunkt läßt sich nach dem Hebelgesetz finden. Dabei muß man Erde und Mond so behandeln, als seien ihre Massen in den Mittelpunkten vereinigt, was nach Satz (22) erlaubt ist. Es ist also nach Bild 29 $r_1 : r_2 = m_2 : m_1$, oder auch $r : r_2 = (m_1 + m_2) : m_1$. Der Abstand der Masse m_2 vom gemeinsamen Drehpunkt ist daher $r_2 = \frac{r m_1}{m_1 + m_2}$. Dieser, und nicht der volle

28. Hammerwerfer und geschwungene Masse rotieren um den gemeinsamen Schwerpunkt

29. Rotation zweier Massen um ihren gemeinsamen Schwerpunkt



Abstand der Masse m_2, ist für die erzeugte Fliehkraft maßgebend. Der mit Gleichung (30) gegebene Ansatz „Fliehkraft = Schwerkraft" muß also korrigiert werden, da dort angenommen wurde, daß die Masse m_1 stillsteht. Führt man diese Rechnung durch,[14]) so gelangt man zur

(39) *Gesamtmasse zweier umeinander laufender Körper:* $$m_1 + m_2 = \frac{4\pi^2 r^3}{f T^2}.$$

Man erkennt die Verbesserung, wenn man mit Formel (38) vergleicht.
Die auf S. 45 abgeleitete Gleichung (38) war also nur ein Notbehelf. Man darf sie nur anwenden, wenn die Masse des umlaufenden Körpers gegenüber dem Zentralgestirn so klein ist, daß kein gröberer Fehler entsteht. Wie sehen aber jetzt, daß man nach (39) immer nur die Summe beider Massen erhält. Das ermöglicht uns jetzt, mit Gleichung (39) die Mondmasse abzuschätzen. Man erhält dabei etwa $6 \cdot 10^{22}$ kg.[15])
Das Ergebnis ist jedoch nicht genau, sondern nur ein erster Anhaltspunkt, da die Bewegung des Mondes auch von der Sonne stark beeinflußt wird. Es handelt sich in diesem Fall nicht um ein reines Zwei-, sondern um ein Dreikörperproblem, und wenn man die Einflüsse der übrigen Planeten hinzunimmt, sogar um ein Vielkörperproblem. Die mathematische Behandlung ist dann außerordentlich schwierig. Die richtige Mondmasse kann nur erhalten werden, indem man den störenden Einfluß der Sonne berechnet und durch Vergleich der sich daraus ergebenden theoretischen mit der wirklichen Mondbahn die Masse des Mondes entsprechend korrigiert. Die sehr mühevollen Berechnungen ergaben für die Masse des Mondes $7{,}35 \cdot 10^{22}$ kg. Das ist nur etwa $\frac{1}{81}$ Erdmasse.
Die Keplerschen Gesetze gelten nicht nur für den eng begrenzten Raum des Sonnensystems. Sie gelten ebenso in der Welt des Mikrokosmos, wo sie sich bei der Berechnung des Bohrschen Atommodells glänzend bewährten, wie für die Verhältnisse der Fixsterne. Hier kommt es in vielen Fällen vor, daß zwei Sterne so nahe beisammen liegen, daß sie einander auf geschlossenen Bahnen umlaufen. Etwa ein Viertel aller sichtbaren Sterne sind solche Doppelsterne, mitunter sogar mehrfache Sternsysteme – viel mehr als man zunächst glauben möchte. Ähnlich wie das System Erde–Mond laufen sie auf Ellipsenbahnen um ihren gemeinsamen Schwerpunkt. Die Bestimmung ihrer, oft nur andeutungsweise erkennbaren, gegenseitigen Bewegung ist eine komplizierte Angelegenheit. Am Ende ist es aber doch gelungen, Umlaufszeit und große Halbachse der Bahnellipse bei vielen solcher Sternenpaare auszumessen.

[14]) In Gleichung (30) ergab sich bei stillstehender Masse m_1 für die Fliehkraft $\frac{m_2 v^2}{r}$, wofür wegen (34) auch $\frac{4\pi^2 m_2 r}{T^2}$ geschrieben werden kann. Setzt man für r den richtigen Wert r_2 ein, so erhält man $\frac{4\pi^2 m_2 m_1 r}{T^2(m_1 + m_2)} = \frac{f m_1 m_2}{r^2}$, wobei in dem nach (20) gegebenen Ausdruck für die Gravitation der volle Abstand r unverändert bleiben muß. Durch Kürzen dieser Gleichung erhält man (39).
[15]) Mit der Erdmasse $m_1 = 5{,}977 \cdot 10^{24}$ kg, dem mittleren Mondabstand $r = 384\,400$ km und der auf den Fixsternhimmel bezogenen Umlaufszeit von 27,32 Tagen erhält man

$$m_2 = \frac{4\,\pi^2 \cdot 3{,}844^3 \cdot 10^{24}\,\mathrm{m}^3}{6{,}67 \cdot 10^{-11}\,\mathrm{m}^3/\mathrm{kg\,s}^2 \cdot 27{,}32^2 \cdot 86400^2\,\mathrm{s}^2} - 5{,}977 \cdot 10^{24}\,\mathrm{kg} = 6 \cdot 10^{22}\,\mathrm{kg}$$

Um einfacher rechnen zu können, drückt man die im Gesetz (39) enthaltene große Halbachse r der Ellipse in „astronomischen Einheiten" (1 AE = Entfernung Erde–Sonne),[16] die Massen in Einheiten der Sonnenmasse und die Umlaufszeiten in Jahren aus. Dann fallen die Konstanten f und $4\pi^2$ weg, und man erhält[17] die

(40) *Gesamtmasse eines Doppelsterns:* (in Einheiten der Sonnenmasse) $$M_1 + M_2 = \frac{r^3}{T^2}.$$

Der bekannteste aller Doppelsterne ist der Sirius. Er ist auch der hellste aller Sterne, und man findet ihn leicht am nächtlichen Winterhimmel, wenn man durch die 3 Gürtelsterne des Orion eine Linie schräg nach dem Horizont zieht. Schon vor 100 Jahren stellte man fest, daß er die Bezeichnung „Fix"stern nicht ganz zu Recht verdient, sondern im Laufe der Zeit eine kleine Ellipse am Himmel beschreibt, deren große Halbachse 20,3 AE beträgt. Die Ursache dieser Bewegung mußte ein unsichtbarer Begleiter sein. Man nennt ihn Sirius B, der dem unbewaffneten Auge wegen seiner geringen Helligkeit verborgen bleibt. Aus der Umlaufszeit von 49,9 Jahren resultiert die Gesamtmasse des Systems zu

$$M_1 + M_2 = \frac{20{,}3^3}{49{,}9^2} = 3{,}35 \text{ Sonnenmassen}.$$

Mit den weiteren Daten dieses Doppelsterns werden wir uns auf S. 98 noch beschäftigen.

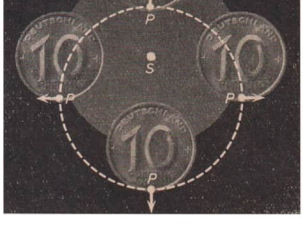
Ebbe und Flut

Es gibt für uns angenehme und unangenehme Naturerscheinungen. Mit vielen sind wir einverstanden, weil wir vernünftigerweise einsehen, daß wir ohne sie nicht leben können, andere bereiten uns aber nur Ärger und Sorgen. Zu den Übeln, die man am besten abschaffen sollte, gehören vor allem die *Gezeiten*. Leider kann man nichts anderes dagegen tun, als fleißig Dämme zu bauen. Daß Ebbe und Flut von der Anziehungskraft des Mondes verursacht werden, kann man sich leicht denken. Es kommt jedoch noch ein zweiter Umstand hinzu, der damit zusammenhängt, daß Erde und Mond um den gemeinsamen Schwerpunkt rotieren. Dabei fällt auf, daß uns der Mond immer dieselbe Seite zukehrt. Wie es auf der anderen Seite aussieht, hat die Menschheit ja erst nach dem denkwürdigen Flug von Lunik 3 erfahren. Die Erde selbst ist nicht so schamhaft veranlagt. Da sie sich täglich einmal um ihre Achse dreht, zeigt sie sich dem Mond ausgiebig von allen Seiten,

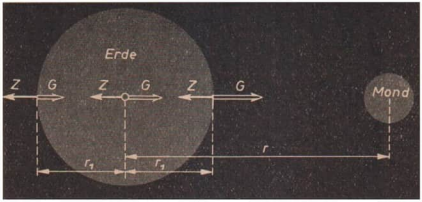
[16]) Bei elliptischer Bahn hat der in Gleichung (39) stehende Abstand r die Bedeutung der großen Halbachse.

[17]) Schreibt man Gleichung (38) mit besonderen Zeichen, die nur in bezug auf die Sonne gelten, $M = \frac{4\pi^2 R^3}{f\Theta^2}$ und dividiert (39) durch (38), so erhält man $m_1/M + m_2/M = \frac{(r/R)^3}{(T/\Theta)^2}$. Dann bedeuten die Quotienten $m_1/M = M_1$ und $m_2/M = M_2$ Sonnenmassen, r/R astronomische Einheiten (AE) und T/Θ Jahre. Man muß also beachten, daß die in Gleichung (40) stehenden Größen diese veränderte Bedeutung haben.

was umgekehrt darauf hinausläuft, daß die Bewohner aller Erdteile den Mond regelmäßig zu sehen bekommen. Nehmen wir aber einmal an, die tägliche Eigenrotation wäre nicht vorhanden. Auch dann könnte sie der Mond von allen Seiten betrachten. Die Erde kreist zwar ebenso wie der Mond um den Systemschwerpunkt, behält aber im Raum immer dieselbe Orientierung bei.
Man nehme ein 10-Pfennig-Stück und bewege es auf dem Tisch in einem kleinen Kreis umher, aber so, daß man die Zahl 10 immer aufrecht vor sich sieht (Bild 30). Ein Bierdeckel tut es zur Not auch. Wenn man sich dabei vorstellt, daß der Mittelpunkt dieser Kreisbewegung der Systemschwerpunkt Erde–Mond ist, so hat man ein einfaches Modell der wirklichen Verhältnisse. Um es kürzer zu sagen: die Erde *rotiert nicht* um den Systemschwerpunkt, als ob sie dort aufgespießt wäre, sondern führt eine sogenannte *Exzenterbewegung* aus. Sie bewegt sich wie das Scheuertuch einer Putzfrau oder wie die Gondel eines Riesenrades stets parallel zu sich selbst im Kreis herum.
Nun kommt das Wichtigste. Jeder beliebige Punkt, sowohl der Mittelpunkt als auch jeder Punkt des Umfanges, beschreibt dabei im Laufe einer Umdrehung Kreisbahnen von genau gleicher Größe. Bei der Erde ist der Radius dieser Bahnen gleich dem Abstand Erdmittelpunkt-Systemschwerpunkt. Auch der letztere steht im Verhältnis zur Erde nicht etwa fest, sondern wandert ebenfalls auf einer solchen Kreisbahn. Als Folge davon entsteht eine für alle Punkte gleich große Fliehkraft, die – und auch das ist sehr wichtig – stets vom Mond weggerichtet ist. Wenn das Scheuertuch sehr naß ist, spritzt das Wasser nach allen Seiten davon. Denken wir uns einen kleinen Mond dazu, der selbstverständlich die gleiche Umlaufzeit wie das Scheuertuch hat, so fliegen, von ihm aus gesehen, alle Tropfen radial von ihm weg.
Auf diese Weise wirken somit zwei Kräfte: erstens die Gravitation des Mondes und zweitens die Fliehkraft. Beide wirken in entgegengesetzter Richtung. Ihre Resultierende, die im einfachsten Fall die Differenz ist, stellt die Gezeitenkraft dar.
Auf Bild 31 sehen wir die Verhältnisse noch einmal im geometrisch einfachsten Fall. Die Pfeile der Fliehkraft Z müssen überall gleich groß sein. Die Gravitation G aber ist auf der mondfernen Seite der Erdoberfläche kleiner als auf der mondnahen Seite, weil hier der Abstand um einen Erddurchmesser größer ist. Außerdem ist sie, wie wir gleich sehen werden, links ein wenig kleiner als Z und rechts ein wenig größer als Z. Daher kommt es, daß die Gezeitenkräfte auf beiden Erdhälften in etwa gleicher Größe auftreten.
Das alles läßt sich rechnerisch leicht erfassen, da wir im vorigen Abschnitt das Problem Erde–Mond bereits betrachtet haben. Es lief darauf hinaus, daß die Fliehkraft im Erdmittelpunkt mit



30. Exzenterbewegung eines 10-Pfennig-Stückes um Punkt S. Alle Punkte der Münze beschreiben Kreisbahnen von gleichem Radius, wie z. B. Punkt P.
Kleine Pfeile: Richtung der Fliehkräfte



31. Gezeitenkraft als Differenz von Fliehkraft Z und Gravitation G

der Gravitation im Gleichgewicht ist. Daher können wir gemäß (20) die Fliehkraft auch durch die Gravitationskraft $\frac{f m_1 m_2}{r^2}$ ausdrücken. Da nun, wie wir gefunden haben, auch alle anderen Punkte der Erde derselben Fliehkraft unterworfen sind, gilt dieser Ausdruck ebenso für einen Punkt der Erdoberfläche, wenn wir unter m_1 nicht die ganze Erdmasse, sondern nur einen einzelnen Massenpunkt verstehen. Die Gravitationskraft G aber schreibt sich nach derselben Formel, nur mit dem Unterschied, daß für den Punkt an der Erdoberfläche anstelle des Abstandes r auf der mondfernen Seite (mit dem Erdradius r_1) der Abstand $(r + r_1)$ und auf der mondnahen Seite der Abstand $(r - r_1)$ einzusetzen ist. Dividieren wir noch durch die Masse m_1, so erhalten wir die von den Gezeitenkräften hervorgerufenen Beschleunigungen

$$\text{auf der mondnahen Seite: } g - a_2 = f m_2 \left[\frac{1}{(r - r_1)^2} - \frac{1}{r^2}\right]$$

$$\text{und auf der mondfernen Seite: } a_2 - g = f m_2 \left[\frac{1}{r^2} - \frac{1}{(r + r_1)^2}\right].$$

Mit den bekannten Werten für die Mondmasse $m_2 = 7{,}35 \cdot 10^{22}$ kg, Mondentfernung $r = 384\,400$ km und Erdradius $r_1 = 6378$ km erhält man für beide Seiten etwa $11 \cdot 10^{-7}$ m/s². Die Differenz zwischen mondnaher und mondferner Seite ist nur sehr geringfügig.

Das Ergebnis überrascht. Man erwartet nicht, daß die Gezeitenkraft gegenüber der Schwerkraft von so winziger Größe ist. Die gewaltigen Kräfte der von der Flut bewegten Wassermassen ergeben sich erst dadurch, daß zu beiden Seiten der Flutberge tangential gerichtete Komponenten auftreten, die das Wasser der Ozeane nach den berechneten Maxima der Gezeitenkräfte strömen lassen.

Die tägliche Rotation der Erde läßt die beiderseitigen Flutberge täglich einmal um die Erde wandern. Da aber der Mond seinerseits und gleichsinnig mit der Erdrotation um die Erde läuft, muß sich die Erde um ein Stück weiterdrehen, wenn er wieder an derselben Stelle des Himmels stehen soll. Daher verstreichen zwischen zwei Flutperioden nicht 12 Stunden, sondern 12 Stunden 25 Minuten. Man nimmt übrigens an, daß auch der Mond in früheren Zeiten bedeutend schneller um seine Achse rotierte. Als er noch glutflüssig oder plastisch weich sein mochte, unterlag er ebenfalls starken Gezeitenkräften, die von der Erde ausgingen. Das mußte eine erhebliche Reibung zwischen den mächtigen Flutbergen und dem inneren Kern des Mondes ergeben. Sie bremste dessen Rotation immer mehr ab, bis diese schließlich mit der Dauer eines Mondumlaufes um die Erde zusammenfiel und keine Mondgezeiten mehr möglich waren. Seitdem sich dies begab, sieht man vom Mond auch nur die Vorderansicht.

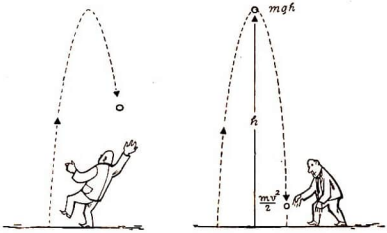
Die Flucht von der Erde

Die Entweichgeschwindigkeit

Bei der Vorführung eines Kulturfilmes konnte man kürzlich ein merkwürdiges Schauspiel bewundern. Ein harmlos auf der Erde liegender Stein erhob sich mit einem Mal von selbst und stieg wie von Geisterhand getragen kerzengerade in die Luft. Dann machte er oben eine Kehrtwendung, kam wieder herunter und landete in der hochgereckten Hand eines Mannes. Nach einigen sonderbaren Körperverrenkungen griff er sich den Stein aus der Luft und legte ihn auf den Boden zurück. Da ging plötzlich das Licht wieder an: „Verzeihung", hörte man den Vorführer mit verlegenem Räuspern stottern, „ich habe den Film verkehrt eingelegt – einen Augenblick bitte." Leider fiel ihm nichts Besseres ein. Es wäre nämlich gar nicht peinlich gewesen, wenn er zum Beispiel großspurig verkündet hätte: „Meine Herrschaften, ich habe den Film absichtlich verkehrt eingelegt! Jetzt werde ich ihn richtigherum laufen lassen, und dann werden Sie sehen, wie der Vorgang des Steigens und der Vorgang des Fallens beim senkrechten Wurf nach oben vollkommen symmetrisch verlaufen. Anfangs- und Endgeschwindigkeit des Steines sind einander genau gleich. Es liegt nichts weiter vor, als eine gegenseitige Umwandlung von kinetischer in potentielle Energie. . ." Keinem wäre es eingefallen, boshaft nach hinten zu schielen, und der Vorführer hätte die Panne in einen pädagogischen Volltreffer verwandelt.
Denn es stimmt alles ganz genau. Der hochfliegende Stein sammelt unterwegs potentielle Energie und verliert gleichzeitig an Geschwindigkeit. Im höchsten Punkt ist die erstere gleich derjenigen Arbeit, die man braucht, um ihn auf die Höhe h zu heben. Die potentielle Energie ist das Produkt

32. Der umgekehrte Wurf

33. Potentielle und kinetische Energie



aus Gewicht und Höhe:

(41) *potentielle Energie bei konstanter Schwerebeschleunigung:* $W_{pot} = m\,g\,h.$

Kommt der Stein wieder heruntergefallen, so berechnet sich die Fallhöhe bekanntlich (28) zu $h = \frac{g}{2} t^2$, während man die Beschleunigung g als Quotient aus der Geschwindigkeitszunahme v und der Fallzeit t darstellen kann, also $g = \frac{v}{t}$. Setzt man beide Ausdrücke in $m\,g\,h$ ein, so erhält man die

(42) *kinetische Energie:* $W_{kin} = \frac{m\,v^2}{2}.$

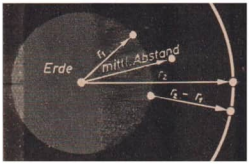
Da in unserem Fall nichts weiter vor sich ging als eine Umwandlung von W_{kin} in W_{pot}, ist $\frac{m\,v^2}{2} = m\,g\,h$ (Bild 33). Hieraus findet man sofort die Anfangs- bzw. Endgeschwindigkeit beim senkrechten Wurf nach oben bzw. beim freien Fall nach unten.

Man kann sich aber anstrengen wie man will, immer wieder fällt der Körper zur Erde zurück. Auch Satelliten und Planeten sind der Erdenschwere nur scheinbar entrückt. Selbst wenn sie in ihrer Bewegung niemals müde werden, bleiben sie doch Gefangene der Gravitation. Sie können ihren eigenen Kreisen nicht entfliehen. Wie ein unsichtbares Gummiseil hindert sie die Schwerkraft daran, sich allzuweit vom Zentrum zu entfernen. Jeder Ausreißversuch wird unbarmherzig im Keim erstickt.

So wenigstens war es bis zum 2. 1. 1959, als die sowjetische Rakete Lunik 1 knapp am Mond vorbeijagend die Erde für immer verließ. Bis dahin hatte es noch kein Geschoß fertiggebracht, die Gravitation zu überwinden, obschon man genau wußte, was dazu gehört. Es klingt sehr einfach: ein Körper, der die Gravitation der Erde durchbrechen soll, muß mit mindestens derselben Geschwindigkeit starten, mit der ein aus unendlicher Entfernung gegen die Erde fallender Körper dort ankommt.

Es gilt also wiederum die Gleichung $W_{kin} = W_{pot}$. Aber mit der potentiellen Energie hat es doch einen Haken. Der mit Gleichung (41) gegebene Ausdruck $m\,g\,h$ ist unbrauchbar, weil die Schwerebeschleunigung und damit das Gewicht bei sehr großen Erdabständen immer kleiner wird. Um dennoch zum richtigen Ergebnis zu gelangen, denken wir an einen Körper der Masse m_2, der von der Erdoberfläche aus bis zur Entfernung r_2 vom Erdmittelpunkt gehoben werden soll (Bild 34). Da die Anziehungskraft nicht konstant ist, gehen wir von einer Kraft $f\frac{m_1 m_2}{r^2}$ (Gleichung 20) aus, die in einem bestimmten *mittleren* Abstand r besteht. Zweifellos kann aber r nicht das arithmetische Mittel von r_1 und r_2 sein, da die Kraft nicht linear, sondern mit dem Quadrat des Abstandes abnimmt. Wir setzen vielmehr $r^2 = r_1 \cdot r_2$, wie es auch der große französische Mathematiker FERMAT weiland getan hat.[18]) Der zwischen den Abständen r_1 und r_2 zurückgelegte Weg ist

[18]) Diese Aufgabe kann eigentlich nur mit Hilfe der Integralrechnung gelöst werden. Da diese aber zu Lebzeiten Fermats noch nicht bekannt war, hat auch er mit mathematischem Einfühlungsvermögen richtig erraten, daß hier das geometrische Mittel $r = \sqrt{r_1 \cdot r_2}$ genommen werden muß.



34. Zur Berechnung der Fluchtarbeit

35. Potentielle Energie eines ins Unendliche gehobenen Körpers

$(r_2 - r_1)$, so daß die aufzuwendende Arbeit das Produkt aus Kraft · Weg $\frac{f\, m_1\, m_2}{r_1\, r_2}(r_2 - r_1)$ oder gekürzt $f\, m_1\, m_2\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$ ist. Wenn wir jetzt verlangen, daß der Körper ins Unendliche gehoben werden soll, so ist $\frac{1}{r_2} = 0$ und mit (26) die

(43) *potentielle Energie eines im Unendlichen befindlichen Körpers der Masse m_2 in Bezug auf die Masse m_1:*

$$W_{\text{pot}} = \frac{f\, m_1\, m_2}{r_1} = m_2\, r_1\, g_1$$

Da sich dieser Energiebetrag nach dem Herabfallen des Körpers restlos in die kinetische Energie $\frac{m_2\, v^2}{2}$ umgewandelt hat, können wir die Gleichung aufstellen

$$\frac{m_2\, v^2}{2} = \frac{f\, m_1\, m_2}{r_1} = m_2\, r_1\, g_1\,.$$

Daraus leiten wir ohne Mühe die Mindestgeschwindigkeit ab, die ein Körper haben muß, um das Schwerefeld der Erde vollkommen zu überwinden. Man nennt sie die *Entweich- oder Fluchtgeschwindigkeit*, bisweilen auch *zweite kosmische Geschwindigkeit:*

(44) *Entweichgeschwindigkeit von der Erde:*

$$v_e = \sqrt{\frac{2\, f\, m_1}{r_1}} = \sqrt{2\, r_1\, g_1}\,.$$

Man kann sich das leicht merken, wenn man Gleichung (31) gegenüberstellt:

(45) *Die Entweichgeschwindigkeit v_e ist gleich der $\sqrt{2}$fachen Kreisbahngeschwindigkeit an der Erdoberfläche.*

Die zahlenmäßige Ausrechnung ergibt [19]) dann die

(46) *2. kosmische Geschwindigkeit* $v_e = 11\,186$ m/s oder rund 11,2 km/s

Dazu gäbe es natürlich allerlei zu sagen. Unsere Rechnung berücksichtigt beispielsweise nicht den Luftwiderstand, der auch in großen Höhen noch wirksam ist. Praktisch muß also mit einem etwas größeren Wert gerechnet werden. Wie man einem Flugkörper diese Anfangsgeschwindigkeit v_e erteilt, ist wohl physikalisch, aber nicht technisch gleichgültig. In Jules Vernes Roman „Von der Erde zum Mond" baute man eine Riesenkanone und machte sich keine weiteren Sorgen darüber, wie die Insassen der als Raumschiff ausstaffierten Granate mit der ungeheuren Abschußbeschleunigung fertig wurden. Bei unseren modernen Weltraumfahrzeugen kann man nicht so barbarisch verfahren und verwendet verhältnismäßig sanft anfahrende Raketentriebwerke. Nach dem Erreichen der Geschwindigkeit 11,2 km/s haben sie ihre Aufgabe erfüllt, da dann der Körper vermöge seiner Trägheit von selbst weiterfliegt.
Nach der glücklichen Landung auf irgendeinem Himmelskörper ist der Flugkörper aber wiederum in dessen Schwerefeld gefangen. Man steht zum zweiten Mal vor dem Problem, den unsichtbaren Panzer der Gravitation zu durchstoßen, wenn es wieder heimwärts gehen soll. Da jeder Himmelskörper andere Daten (Radius, Masse, Schwerebeschleunigung) aufweist, ist aber jetzt die Entweichgeschwindigkeit eine andere. Beim Start vom Mond beträgt sie beispielsweise [20]) nur 2,4 km/s und liegt auch beim Mars mit nur 5,1 km/s erheblich niedriger als beim Start von der Erdoberfläche aus.

[19]) Mit dem Erdradius $r_1 = 6378$ km ergibt sich

$$v_e = \sqrt{2 \cdot 6{,}378 \cdot 10^6\,\mathrm{m} \cdot 9{,}81\,\mathrm{m/s^2}} = 11186\,\mathrm{m/s}.$$

[20]) Mit der Mondmasse $m_1 = 7{,}35 \cdot 10^{22}$ kg und dem Mondradius $r_1 = 1738$ km erhält man nach Gleichung (44)

$$v_e = \sqrt{\frac{2 \cdot 6{,}67 \cdot 10^{-11}\,\mathrm{m^3/kg\,s^2} \cdot 7{,}35 \cdot 10^{22}\,\mathrm{kg}}{1{,}738 \cdot 10^6\,\mathrm{m}}} = 2375\,\mathrm{m/s}\,.$$

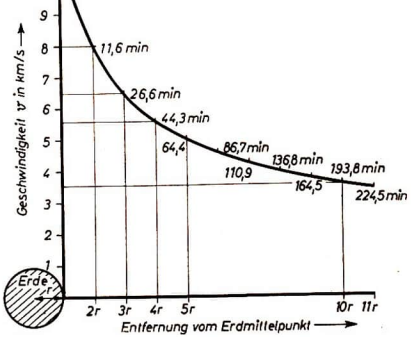
Geschwindigkeit und Flugdauer der Fluchtrakete

Der weitere Verlauf der Flucht nach dem Start ist dann ähnlich wie bei einem Geschoß, das man senkrecht in die Höhe geschickt hat. Hier zehrt die Schwerkraft solange an seiner Geschwindigkeit, bis das Geschoß zum Stillstand kommt und wieder zur Erde zurückkehrt. Auch die Fluchtrakete wird immer langsamer. Doch erst im Unendlichen, dort, wo das Schwerefeld der Erde verschwunden ist, kommt sie zur Ruhe, um nie wieder zurückzukehren. In welcher Weise die Geschwindigkeit mit zunehmender Höhe abnimmt, läßt sich leicht berechnen, wenn man davon ausgeht, daß der Start gerade mit der Mindestgeschwindigkeit v_e erfolgt. Ganz gleich nämlich, welche Höhe der Flugkörper erreicht haben wird, stets steht er vor derselben Aufgabe, den unendlich fernen Punkt zu erreichen. Um dies zu garantieren, muß er in jedem Augenblick die Fluchtgeschwindigkeit haben, die seiner jeweiligen Höhe entspricht. Es gilt immer wieder dieselbe Gleichung (44), in die man anstatt des Erdradius r_1 die jeweilige Erdentfernung und für g_1 den entsprechend verringerten Wert der Schwerebeschleunigung einsetzen muß. Wie sich leicht begründen läßt,[21]) beträgt die

(47) *Geschwindigkeit in der n-fachen Entfernung des Erdradius* r_1: $$v = \frac{1}{\sqrt{n}}\sqrt{2 r_1 g_1}\,.$$

Ist beispielsweise $n = 100$, so ist die Rakete 637 800 km vom Erdmittelpunkt entfernt. Ihre Geschwindigkeit beträgt dann nur noch $^1/_{10}$ des Anfangswertes (Bild 36).

[21]) Bei der n-fachen Entfernung des Erdradius ist in Gleichung (44) für r_1 der Wert nr_1 und für g_1 der nach Gleichung (27) gültige Schwerewert einzusetzen. Man erhält $v = \sqrt{\frac{2 n r_1 g_1 r_1^2}{(n r_1)^2}} = \frac{1}{\sqrt{n}}\sqrt{2 r_1 g_1}\,.$



36. Fluchtgeschwindigkeit und Flugdauer der Fluchtrakete in zunehmender Entfernung von der Erde

In dem Maße, wie sich die Geschwindigkeit der Fluchtrakete mit zunehmender Entfernung verlangsamt, wächst die Flugdauer immer mehr an.
Da die Ableitung der entsprechenden Formel etwas umständlicher ist, sei das fertige Ergebnis genannt:

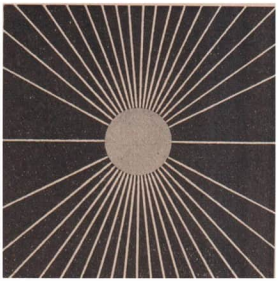
(48) *Flugdauer der Fluchtrakete bis zur n-fachen Entfernung des Erdradius* r_1: $$T = \frac{r_1}{v_e} \cdot \frac{2}{3} \left(n \sqrt{n} - 1\right).$$

Hiernach erhält man z. B. für die Reisezeit bis zum Mond etwa 42 Stunden.[22]) Die Flugbahn ist jedoch in Wirklichkeit nicht geradlinig und geht kurz vor dem Erreichen des Mondes in eine Fallbewegung über. Außerdem kürzt sich die nach (48) berechnete Flugdauer ab, wenn die Anfangsgeschwindigkeit größer als die Fluchtgeschwindigkeit ist. Aus diesem Grunde erreichte die erste sowjetische Mondrakete Lunik 2 vom 12. 9. 1959 ihr Ziel bereits nach 38 Stunden.

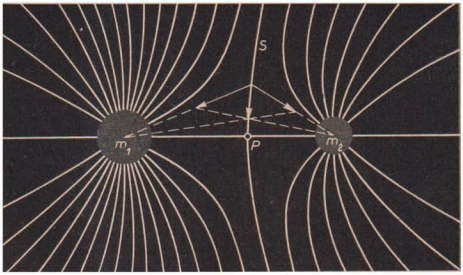
Überlagerung von Schwerefeldern

Um einem Anfänger verständlich zu machen, wie ein magnetisches Kraftfeld aussieht, legt man ein Blatt Papier auf einen Magneten und streut ein wenig Eisenfeilspäne darüber. Sofort bildet sich ein anmutiges System von bogenförmigen Linien, und man sagt: „Dieses sind die Feldlinien. Sie geben die Richtung der im Feld wirkenden Kraft an, und ihr gegenseitiger Abstand ist ein Maßstab für die Größe dieser Kraft."
Leider gibt es kein Pulver, das beim Aufstreuen auf ein Schwerefeld derartige Linien hervorzaubert. Doch kann man sich leicht vorstellen, wie die Kraftlinien der Schwere aussehen müßten. Von einem einzelnen kugelförmigen Körper müßten sie wie die Stacheln eines Igels in radialer

[22]) Bis zum schwerefreien Punkt (S. 57) hat die Rakete 345 960 km zurückzulegen. Dann ist $n = \frac{345960}{6378} = 54{,}24$. Mit $v_e = 11\,200$ m/s wird dann $T = \frac{6{,}378 \cdot 10^6 \text{ m}}{1{,}12 \cdot 10^4 \text{ m/s}} \cdot \frac{2}{3} \left(54{,}24 \sqrt{54{,}24} - 1\right) = 1{,}5127 \cdot 10^5$ Sekunden = 42 Stunden.



37. Meridionaler Schnitt durch das Schwerefeld einer kugelförmigen Masse

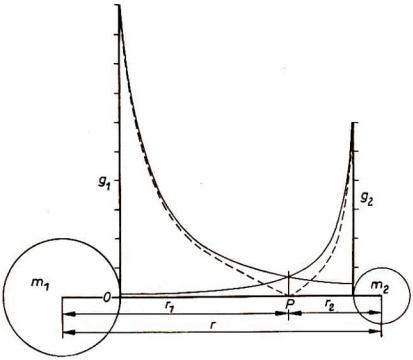


38. Meridionaler Schnitt durch das resultierende Schwerefeld zweier kugelförmiger Massen ($m_1 : m_2 = 2 : 1$). P schwerefreier Punkt. Auf der Feldlinie S sind die von den beiden Massen ausgehenden Anziehungskräfte gleich groß

Richtung auseinanderlaufen (Bild 37).[23]) Aber ein Körper existiert nie allein. So ist die Erde mitsamt ihrem Schwerefeld in das der Sonne, des Mondes und aller übrigen Planeten eingebettet. Alle diese Felder überlagern sich, und erst ihr Zusammenwirken gibt Größe und Richtung der Kraft an, die auf einen dort befindlichen Körper wirkt. Beides muß man dann aus den hier wirkenden Einzelkräften berechnen. Berücksichtigt man nur zwei Körper, so findet man die resultierende Kraft durch Konstruktion des bekannten Parallelogramms der Kräfte. Wie das resultierende Feld in diesem Fall etwa aussieht, zeigt Bild 38.
In diesem Feld muß es einen merkwürdigen Punkt geben, in dem die von den beiden Massen ausgehenden Anziehungskräfte von genau gleicher Größe, jedoch entgegengesetzter Richtung sind (Bild 39). Hier ist die Schwerkraft verschwunden. Die Lage dieses *schwerefreien Punktes* läßt sich leicht errechnen. Zwischen Erde und Sonne liegt er in einer Erdentfernung von 259100 km. Das Entsprechende gilt für das System Erde–Mond, wo der schwerefreie Punkt 38440 km vom Mondmittelpunkt entfernt liegt.[24])
Eine nach dem Mond oder einem Planeten abzuschießende Rakete benötigt daher strenggenommen nicht die volle Fluchtgeschwindigkeit, sondern nur jene, die zum Erreichen dieses neutralen Punktes notwendig ist. Von hier aus wird sie ihr Ziel im freien Fall von selbst erreichen.

[23]) Um eine korrekte Wiedergabe des räumlichen Feldlinienbildes in der Ebene zu erhalten, muß man davon ausgehen, daß aus gleich großen Flächenteilen einer Kugeloberfläche die jeweils gleiche Anzahl von Feldlinien heraustritt. Auf Bild 37 wurden hierzu parallel zur Äquatorebene liegende, gleich große Kugelzonen gewählt.

[24]) Aus den im schwerefreien Punkt gleich großen Schwerebeschleunigungen $\frac{f m_1}{r_1^2} = \frac{f m_2}{r_2^2}$ folgt mit $r_1 = (r - r_2)$ die Gleichung $\frac{(r - r_2)^2}{r_2^2} = \frac{m_1}{m_2}$. Aus dem Massenverhältnis Erde : Mond = 81 : 1 (S. 47) erhält man die Gleichung $r_2 = 0{,}1\ r = 0{,}1 \cdot 384400$ km $= 38440$ km (Abstand Erde – Mond $r = 384400$ km).



39. Verlauf der Schwerebeschleunigung auf der Verbindungslinie zweier verschieden großer Massen Gestrichelt: resultierende Schwerebeschleunigung, P schwerefreier Punkt

Flucht aus dem Sonnensystem

Obschon uns das eigene Schwerefeld der Erde genug zu schaffen macht, sind wir zugleich (wenn wir von dem des Mondes absehen) von dem der Sonne umfangen. Wir bemerken im allgemeinen nichts davon, weil die nach der Sonne hin wirkende Schwerebeschleunigung wegen der großen Entfernung noch nicht ein hundertstel Prozent von unserem g-Wert ausmacht. Nur Küstenbewohner bekommen sie gelegentlich in der *Springflut* zu spüren, wenn Mond und Sonne nach der gleichen Seite hin in einer Geraden wirken und sich die gewöhnlich nur vom Mond erzeugte Flutwirkung entsprechend verstärkt. Stehen beide auf entgegengesetzten Seiten, so subtrahieren sich die Kräfte, und es kommt lediglich zur *Nippflut*.

Trotzdem ist das Schwerefeld der Sonne nicht zu unterschätzen, da seine Reichweite die des Erdfeldes bedeutend übertrifft. Auf große Entfernungen hat es den längeren Atem und ist dort noch merklich vorhanden, wo das Feld der Erde praktisch verschwunden ist. Weshalb wir überhaupt davon reden, hat seinen Grund in dem verständlichen Ehrgeiz des Menschen, dereinst einmal in die fernen Weiten jenseits des Sonnensystems vorzustoßen. Die Aufgabe besteht also darin, nicht nur dem Schwerefeld der Erde, sondern auch dem der Sonne zu entkommen.

Das erfordert naturgemäß einen zweifachen Aufwand an Fluchtenergie. Der erste entspricht der schon errechneten Entweichgeschwindigkeit $v_1 = 11\,200$ m/s. Ein zweiter Energiebetrag wird bestimmt durch die Geschwindigkeit, die zum Entweichen aus dem Schwerefeld der Sonne nötig ist. Wir berechnen sie nach Satz (45) aus der Kreisbahngeschwindigkeit der Erde während ihres Sonnenumlaufes,[25]) die sich zu $v_k = 29\,800$ m/s ergibt. Der $\sqrt{2}$fache Betrag hiervon wäre die Ent-

[25]) Mit dem Erdbahnradius $r = 149{,}6 \cdot 10^6$ km und der Umlaufszeit der Erde $T = 365{,}256$ Tage $= 3{,}1558 \cdot 10^7$ Sekunden erhält man die Bahngeschwindigkeit (34) $v = \frac{2\pi r}{T} = \frac{2\pi \cdot 1{,}496 \cdot 10^{11}\,\mathrm{m}}{3{,}1558 \cdot 10^7\,\mathrm{s}} = 29\,800$ m/s.

weichgeschwindigkeit aus dem Sonnenfeld, d. h. $v_e = \sqrt{2} \cdot v_k = 42300$ m/s. Das ist erschreckend viel, und fast könnte das geplante Unternehmen daran scheitern, wenn nicht die Natur selbst der Technik zu Hilfe käme. Unsere eigene Erde hat selbst schon die soeben berechnete Eigengeschwindigkeit von 29800 m/s. Man wäre ja geradezu töricht, wenn man von dieser billigen Möglichkeit keinen Gebrauch machen würde. Sie erlaubt es, die Erde als völlig kostenloses Katapult zu benutzen. Natürlich darf man nicht aus Versehen in die verkehrte Richtung starten! Wenn der Start im Umlaufsinn der Erdbewegung erfolgt, braucht man nur noch den zusätzlichen Betrag $v_2 = (42300—29800)$ m/s $= 12500$ m/s aufzuwenden (Bild 40).
Mit der Startmasse m setzt sich der gesamte Energieaufwand aus den beiden zum Entweichen aus dem Erd- und Sonnenfeld erforderlichen Beträgen an kinetischer Energie zusammen:

$$\frac{m v^2}{2} = \frac{m v_1^2}{2} + \frac{m v_2^2}{2}.$$

Man sieht sofort, daß sich der Faktor $\frac{m}{2}$ überall herauskürzt und erhält die Gesamtgeschwindigkeit

$$v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2},$$

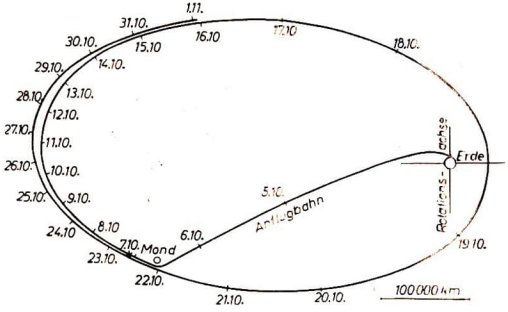
und nach Einsetzen der berechneten Werte die

(49) *Entweichgeschwindigkeit aus dem Sonnensystem (3. kosmische Geschwindigkeit):* $v_e' = 16{,}7$ km/s.

40. Wegen der Eigenbewegung der Erde kann deren Kreisbahngeschwindigkeit v_k von der Fluchtgeschwindigkeit v_e abgezogen werden

Die Flugbahnen

Die Kenntnis der erforderlichen Startgeschwindigkeit reicht aber noch nicht aus, um eines der im Weltraum verstreuten Objekte zu treffen. Zwar sind die Ziele bei schönem Wetter gut zu erkennen; sie wackeln nicht und lassen sich in aller Ruhe aufs Korn nehmen. Doch was geschieht nicht alles in der langen Zeit, während das Geschoß noch unterwegs ist! Das zu treffende Objekt bewegt sich auf komplizierter Bahn und ändert zugleich seine Entfernung. Im gleichen Sinn verschiebt sich auch das mit ihm verbundene Schwerefeld, das die Geschoßbahn schon lange vorher beeinflußt, ehe es ans Ziel gelangt. Aber damit nicht genug. Da ein blinder Absturz auf den angesteuerten Himmelskörper mit der unfehlbaren Zerstörung des Flugkörpers enden müßte, ist unbedingt eine „weiche Landung" anzustreben. Dazu muß man sich vorher eine gründliche Kenntnis der Oberflächenbeschaffenheit verschaffen und den Himmelskörper aus nächster Nähe studieren können. Das ist möglich, wenn man ihn in tunlichst niedriger Höhe umfliegt und dann zurückkehrt. Die Lösbarkeit einer solchen Aufgabe ist bereits praktisch erwiesen. Am 4. 10. 1959 umflog Lunik 3 auf vorher genau berechneter Schleifenbahn den Mond und machte 40 Minuten lang Aufnahmen von seiner Rückseite (Bild 41).



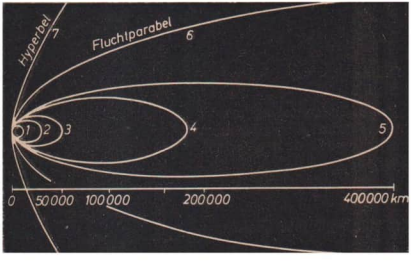
41. Flugbahn von Lunik 3 zum Mond

Es leuchtet ein, daß wir die Lösung aller damit verbundenen Einzelfragen den astronautischen Experten überlassen müssen. Für uns bleibt aber eine grundsätzliche Frage: Wie bewegt sich ein fliegendes Geschoß in den großräumigen Bezirken eines Schwerefeldes, sei es in denjenigen der Erde oder in denen des angesteuerten Himmelskörpers im allgemeinen Falle? Bis jetzt haben wir ja nur die Kreisbahn und die radiale Durchquerung des Schwerefeldes besprochen. Wie aber verhält sich ein Körper, der mit beliebiger Geschwindigkeit in einem Schwerefeld kreuzt? Diese

42. Flugbahnen künstlicher Erdsatelliten

Anfangsgeschwindigkeiten:

Kreisbahn 1:	7,9 km/s
Ellipse 2:	10 km/s
Ellipse 3:	10,5 km/s
Ellipse 4:	11 km/s
Ellipse 5:	11,1 km/s
Fluchtparabel 6:	11,2 km/s
Hyperbel 7:	16,7 km/s



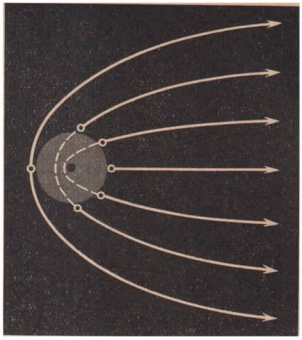
Frage ist nicht etwa neueren Datums, sondern wurde bereits vor 250 Jahren vollständig und mathematisch exakt von Newton bearbeitet und gelöst.
Wir können dabei wieder von der Annahme ausgehen (Satz 22), daß das anziehende Zentrum punktförmig ist. Die wirkliche Ausdehnung der Himmelskörper hat auf die Bewegung selbst keinen Einfluß, da diese nahezu kugelsymmetrisch gebaut sind. Ihre tatsächliche Größe wirkt sich lediglich dahin aus, daß die theoretische Bahn in bestimmten Fällen nicht vollständig durchflogen wird. Sie bricht mit dem Erreichen der Oberfläche ab oder kann beim Start erst von hier aus beginnen.
Die geometrische Gestalt der Flugbahn ist dann nur durch zwei Größen bestimmt: der kinetischen Energie W_{kin} und der potentiellen Energie W_{pot} in einem bestimmten Bahnpunkt. Es ist dabei gleichgültig, ob sich der Körper vom anziehenden Zentrum entfernt oder sich ihm nähert. Das Gesetz der Bahnkurve gilt in gleicher Weise sowohl für den Start als auch für die Annäherung ans Ziel.
Es sind dann folgende drei Bahnkurven möglich:

1. *Die Parabel:* $W_{kin} = W_{pot}$,
2. *Die Hyperbel:* $W_{kin} > W_{pot}$,
3. *Die Ellipse:* $W_{kin} < W_{pot}$.

Alle drei Kurven gehören zu den sogenannten „Kegelschnitten" (Bild 42). Da wir uns nur in groben Umrissen orientieren wollen, verzichten wir auf mancherlei geometrische Einzelheiten und genauere Berechnungen.

1. Die Parabelbahn

Die Parabel ist eine einseitig offene Kurve, deren beide freie Äste im Unendlichen parallel laufen. Das anziehende Zentrum steht im *Brennpunkt*. Damit eine parabolische Bahn zustande kommt, muß also die kinetische Energie des Flugkörpers in jedem Augenblick genau gleich derjenigen potentiellen Energie sein, die er in bezug auf den anziehenden Körper hat. Es gilt daher



43. Parabelbahnen bei verschiedenem Startwinkel
Äußere Bahn: horizontaler Start
Waagerechte Bahn: vertikaler Start
Gestrichelt: hypothetischer Verlauf im Erdinnern

die auf Seite 53 abgeleitete Gleichung

$$\frac{m v_1^2}{2} = \frac{f m m_1}{r_1}.$$

Hieraus haben wir bereits die Geschwindigkeit $v_1 = \sqrt{\frac{2 f m_1}{r_1}}$ errechnet und diese als „Entweichgeschwindigkeit" aus dem Schwerebereich des betreffenden Himmelskörpers bezeichnet. Wenn sich also ein Flugkörper aus einer beliebigen Richtung der Erde nähert und er in irgendeinem Punkt seiner Bahn die Entweichgeschwindigkeit hat, die für eben diese Entfernung gilt, so wird er den Erdmittelpunkt auf parabolischer Bahn umlaufen und dann wieder ins Unendliche verschwinden. Vom Einfluß des Schwerefeldes der Sonne sehen wir der Einfachheit halber dabei ab.
Diese Rückkehr kann aber nicht stattfinden, wenn der Erdumfang die Parabel irgendwo schneidet (Bild 43). An dieser Stelle muß er dann mit der Geschwindigkeit $v = 11{,}2$ km mehr oder weniger schräg gegen die Erdoberfläche treffen.
So, wie dieser Aufschlag erfolgt, kann der Flugkörper – wiederum mit 11,2 km/s – auch gestartet werden. Die Flugbahn ist genau die gleiche und kann auch wieder nur aus einem Parabelast bestehen. Deswegen nennt man die 2. kosmische Geschwindigkeit bisweilen auch *parabolische Geschwindigkeit*. Wie man sieht, ist es demnach auch möglich, tangential zur Erdoberfläche zu starten, wobei dann diejenige Parabel beschrieben wird, deren Scheitel die Erdoberfläche gerade tangiert. Erfolgt der Start senkrecht zur Erdoberfläche, dann wird das Schwerefeld in radialer Richtung durchstoßen. Die Parabel artet in eine Gerade aus, deren beide Äste zusammenfallen.

2. Die Hyperbelbahn

An sich besteht jede Hyperbel aus zwei getrennt und symmetrisch zueinander liegenden Ästen mit je einem Brennpunkt. In der Himmelsmechanik interessiert aber nur einer dieser Äste, in dessen Brennpunkt das gravitierende Zentrum liegt. Im Gegensatz zur Parabel weichen die beiden Schenkel der Hyperbel nicht parallel auseinander, sondern nähern sich im Unendlichen immer mehr zwei Geraden (Asymptoten), die einen bestimmten Winkel miteinander einschließen. Die Hyperbelbahn wird durchlaufen, wenn die Geschwindigkeit in einem Bahnpunkt größer ist als die dort gültige Entweichgeschwindigkeit. Für die Annäherung an einen Himmelskörper gilt das entsprechende wie bei der Parabelbahn. Einem Start mit hyperbolischer Geschwindigkeit steht selbstverständlich nichts im Wege.

3. Die Ellipsenbahn

Wie es im 1. Keplerschen Gesetz steht, stellt das gravitierende Zentrum einen der beiden Brennpunkte der Ellipse dar. Die Kurve ist in sich geschlossen und kann nur zustande kommen, wenn die Geschwindigkeit des Flugkörpers kleiner als die Entweichgeschwindigkeit für einen ins Auge gefaßten Bahnpunkt ist. Jeder Körper, der mit weniger als 11,2 km/s von der Erde gestartet wird, muß daher eine elliptische Bahn durchlaufen, ganz gleich unter welchem Winkel er abgeschossen wird. Eine Ausnahme bildet der vorhin erwähnte senkrechte Abschuß, wobei die Ellipse unendlich schmal wird und zu einer Geraden entartet.

Auch den Kreis kann man als eine Ellipse auffassen, und wir wissen noch, daß ein mit der Geschwindigkeit $v_k = 7{,}9$ km/s horizontal gestarteter Körper die Erde auf einer Kreisbahn umläuft. Wenn nun dieser Körper mit der gleichen Geschwindigkeit, jedoch in schräger Richtung nach oben abgeschossen wird, dann kann es auch mit der Kreisbahn nichts werden. Es entsteht eine Ellipse, deren Bahn auf dem absteigenden Ast die Erdoberfläche schneidet. Ebenso ergeht es einem Körper, der zwar horizontal, aber mit einer geringeren Geschwindigkeit als 7,9 km/s gestartet wird. Auch dieser Körper wird auf die Erde aufschlagen müssen (Bild 44).

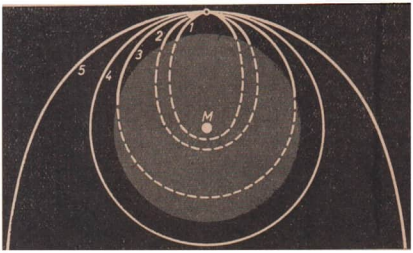
An und für sich stellt der letzte Fall nichts anderes dar als einen gewöhnlichen waagerechten Wurf. Man wird daher sofort einwenden, daß hierbei doch eine „Wurf*parabel*" herauskommen müsse. Der Widerspruch erledigt sich aber durch Praxis. Bei den einfachen irdischen Bewegungen kann man nämlich das Schwerefeld als homogen betrachten und mit praktisch ausreichender Genauigkeit annehmen, daß die Schwerebeschleunigung in jeder Höhe konstant sei. Exakt trifft dies jedoch nicht zu, so daß alle Wurfparabeln in Wahrheit Ellipsenbögen sind, deren Abweichung von der Parabelform jedoch nur theoretische Bedeutung hat.

Alle diese Beziehungen kehren sich um, wenn der Flugkörper sich einem anderen Himmelskörper nähert. Sofern seine Anfluggeschwindigkeit kleiner als die Entweichgeschwindigkeit ist, wird er vom angesteuerten Objekt eingefangen. Erwartet man beispielsweise, daß ein Projektil vom Mond eingefangen werde, so muß seine Geschwindigkeit in Mondnähe auf jeden Fall kleiner als die dort gültige Fluchtgeschwindigkeit (S. 54) von 2,4 km/s sein. Ist dies der Fall, so gibt es wieder zwei Möglichkeiten: Entweder wird er zu einem Trabanten, der den Mond auf elliptischer Bahn umläuft, oder die Ellipse hat Pech und wird von der Mondoberfläche geschnitten. Eine genaue Kreisbahn um den Mond zu erzielen dürfte nach dem heutigen Stand der Technik ein wahres Kunststück sein, da dann drei Größen genau aufeinander abgestimmt sein müssen: Abstand vom Mondmittelpunkt, die zugehörige Kreisbahngeschwindigkeit und genau tangentiale Flugrichtung.

44. Elliptische Flugbahnen bei horizontalem Start in 1600 km Höhe (gestrichelt: hypothetischer Verlauf, wenn die Erdmasse im Mittelpunkt M konzentriert wäre)

Startgeschwindigkeiten:

Bahn 1	3,0 km/s
Bahn 2	4,1 km/s
Bahn 3	6,1 km/s
Kreisbahn 4	7,0 km/s
Bahn 5	8,7 km/s

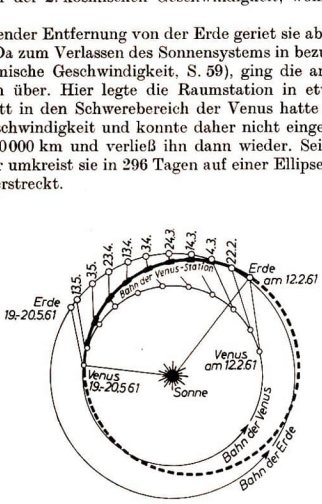


Zusammengesetzte Bahnen

Wie schon angedeutet wurde, entspricht die wahre Kurve eines in den Raum geschossenen Projektils nicht immer den genannten drei Idealfällen. Von vornherein aber ist die gesamte Flugbahn in zwei Abschnitte zu zerlegen. Im *aktiven Teil* wird der Bahnverlauf willkürlich vom Raketentriebwerk und den Steuerorganen bestimmt. An der Länge der Gesamtstrecke gemessen, ist er relativ kurz und dient dazu, dem Flugkörper die erforderliche Anfangsgeschwindigkeit und -richtung zu erteilen. Nach dem *Brennschluß* beginnt der *passive Teil* der Flugbahn. Erst dieser kann nach den Gesetzen der Himmelsmechanik verlaufen, da der Körper von jetzt an allein seiner Trägheit und den Gravitationskräften unterliegt. Eine reine Ellipse, Parabel oder Hyperbel kann dann aber nur entstehen, wenn die Existenz eines einzigen Schwerefeldes vorausgesetzt werden kann. Praktisch kann man nur solange damit rechnen, als sich der Einfluß anderer Himmelskörper wegen ihrer großen Entfernung vernachlässigen läßt.

Wie die gesamte Flugbahn einer Rakete aussehen kann, sei am Beispiel der am 12. 2. 1961 nach der Venus gestarteten Raumstation geschildert (Bild 45). Im großen und ganzen handelte es sich darum, sie auf eine elliptische Bahn um die Sonne zu schicken, die auf der Erde beginnen und auf der Venus enden sollte. Um dies zu erreichen, wurde zunächst eine Mehrstufenrakete auf eine Kreisbahn in etwa 250 km Höhe über der Erdoberfläche gebracht. Von diesem ersten Stützpunkt löste sich dann ein Satellit, dessen Triebkraft ihn auf etwa 11 860 m/s beschleunigte. Dieser zweite Stützpunkt stieß nun die eigentliche, 634,5 kg schwere Raumstation aus, deren weiterer Flug passiv, d. h. ohne eigentlichen Antrieb vonstatten ging. Ihre Geschwindigkeit lag damit um 661 m/s über der 2. kosmischen Geschwindigkeit, womit sie die Erde auf einer Hyperbelbahn verließ.

Mit zunehmender Entfernung von der Erde geriet sie aber mehr und mehr in den Schwerebereich der Sonne. Da zum Verlassen des Sonnensystems in bezug auf die Erde aber 16,7 km/s notwendig sind (3. kosmische Geschwindigkeit, S. 59), ging die anfängliche Hyperbel in die beabsichtigte Ellipsenbahn über. Hier legte die Raumstation in etwa 3 Monaten 270 Millionen km zurück. Beim Eintritt in den Schwerebereich der Venus hatte sie in bezug auf diesen Planeten hyperbolische Geschwindigkeit und konnte daher nicht eingefangen werden. Sie näherte sich ihm bis auf etwa 100000 km und verließ ihn dann wieder. Seit dieser Zeit hat die Sonne einen neuen Planeten. Er umkreist sie in 296 Tagen auf einer Ellipse, deren Bahn sich zwischen der von Erde und Venus erstreckt.



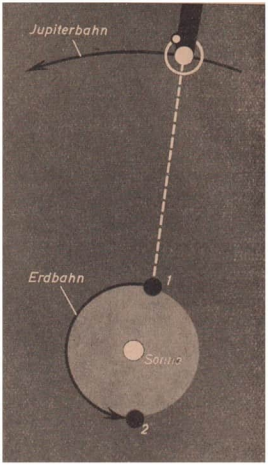
45. Bahn der Venussonde

Maßstab Licht

Die Lichtgeschwindigkeit

Um etwas über die Zustände und Vorgänge im Weltall zu erfahren, stand und steht bis heute der Menschheit fast nur ein einziges Mittel zur Verfügung. Es sind die dünnen Fäden des Lichtes. Gleich einem schimmernden Gespinst verbinden sie die fernsten Gestirne mit der Erde. Wären es aber nur simple Fäden, dann könnten wir nicht allzu viel mit ihnen anfangen. Vielmehr stellen sie ein kompliziertes Gemisch elektromagnetischer Strahlungen dar, deren nähere Untersuchung immer reichere Erkenntnisse brachte, je mehr man sich mit ihnen beschäftigte. Es ist erstaunlich, was aus dem bißchen Sternenlicht herauszuholen ist. Fast alle wissenswerten Einzelheiten, die man über die Sterne erfahren möchte, sind aus ihren Strahlungen zu erkennen.
Davon abgesehen, ist auch das Licht selbst noch die genaueste Grundlage aller irdischen und astronomischen Längenmessungen und von allem, was indirekt damit zusammenhängt. Seine Wellenlängen sind von wunderbarem Gleichmaß, was wiederum daran liegt, daß die Geschwindigkeit des Lichtes im Vakuum offenbar einen unveränderlichen festen Wert hat. Früher neigte man dagegen allgemein zu der Ansicht, daß sich das Licht mit unendlich großer Geschwindigkeit ausbreite. Die Begründung war sehr einfach: es gab keinen Anhaltspunkt, der das Gegenteil hätte beweisen können. Man behauptete also allen Ernstes, das Licht sei schon hier, im gleichen Augenblick, da es irgendwo anders entsteht.
Olaf Römer (1644···1710), dem dänischen Astronomen, erschien das unglaubhaft, als er den Mond Jo des Jupiters in seinen Fernrohren beobachtete. Man sieht dessen Bahn von der Seite her und den Mond als helles Pünktchen. Bei jedem Umlauf muß er einmal durch den Schatten des Jupiters gehen und verschwindet dort für eine Weile, bis er auf der anderen Seite wieder hervorkommt. Zwischen je zwei Verfinsterungen des Mondes vergehen 42 h 28 min. Sie entsprechen seiner Umlaufszeit. Wenn alles glatt ginge, könnte man die Uhr danach stellen.
Aber der Direktor der Pariser Sternwarte, Cassini, und sein damaliger Assistent Römer merkten, daß es nicht geht. Wenn sich die Erde auf ihrer Bahn um die Sonne vom Jupiter entfernt (Bild 46), geht die Jo-Uhr von Woche zu Woche immer mehr nach. Im Punkt 2 beträgt die Verspätung gegenüber Punkt 1 1000 Sekunden. Während aber die Erde die zweite Hälfte ihrer Bahn zurücklegt, wird diese Verspätung wieder aufgeholt. Römer fand eine einleuchtende Erklärung: Zwischen je zwei Verfinsterungen muß das von Jo ausgehende Licht noch diejenige Strecke zurücklegen, um die sich die Erde von ihm wegbewegt hat. Für diese Wegdifferenz braucht das Licht eine gewisse zusätzliche Zeit, und die Summe aller Einzelverspätungen sind diese 1000 Sekunden. Die

46. Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit nach *Römer*



Summe aller Wegdifferenzen wiederum ist der Erdbahndurchmesser von rund $2 \cdot 150 \cdot 10^6$ km. Die Lichtgeschwindigkeit ist dann $c = \frac{300 \cdot 10^6 \text{ km}}{1000 \text{ s}} \approx 300000$ km/s.
Römers Theorie war richtig, woran auch nichts ändert, daß sie von Cassini und der ganzen Pariser Akademie prompt abgelehnt wurde. Später und bis in die jüngste Zeit wurden auch irdische Messungen mit größerer Präzision ausgeführt. Danach beträgt die

(50) *Lichtgeschwindigkeit im Vakuum:*

$$c = (299790 \pm 6) \text{ km/s}.$$

Gern hätte man den Zahlenwert noch genauer, da es um die wichtige Frage geht, ob die Vakuumlichtgeschwindigkeit wirklich eine absolute Konstante ist, wie es die Relativitätstheorie verlangt. Aber die Messungen sind sehr schwierig, und man wird sich noch viel damit beschäftigen müssen.

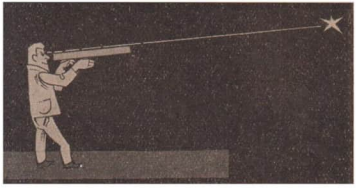
Entfernungen

Vom allereinfachsten Lineal verlangt man mindestens, daß es gerade sei. Man hält es der Länge nach vors Auge, visiert über Anfangs- und Endpunkt hinweg und prüft nach, ob sich alle Punkte seiner Kante genau decken (Bild 47). In Wirklichkeit liegen aber die Punkte nicht aufeinanders, sondern hintereinander. Ein Lichtstrahl huscht über die Reihe hinweg und fädelt die Punkte auf, die in seinem Weg liegen. An den anderen geht er vorbei. Blindlings verlassen wir uns darauf und sind überzeugt davon, daß der Lichtstrahl die denkbar vollkommenste gerade Linie ist. Alle Messungen von Längen und Winkeln wären ohne das Licht unvorstellbar schwierig. Nicht nur, weil es im Finstern dunkel ist, sondern weil es kein anderes physikalisches Gebilde gibt, von dem man mit ruhigem Gewissen behaupten kann, daß es einwandfrei gerade sei.
Da Zollstöcke und Bandmaße für die Abmessungen des Weltenraumes zu kurz sind, ist man dort vollends auf das Licht allein angewiesen. Die Entfernungen werden dann so gemessen, wie es der Geometer auf dem Felde tut. Man geht von einer Basis aus, deren Länge vorher bekannt sein muß, und zielt von deren Endpunkten nach dem Objekt hin. Die beiden Visierlinien schließen einen

Winkel miteinander ein, aus dem man die Entfernung berechnen kann. Diesen Winkel nennt man die *Parallaxe* des Gestirns. Man kann auch ebensogut von dem Objekt selbst ausgehen und sagen:

Die Parallaxe eines Gestirns ist der Winkel, den die nach zwei verschiedenen Beobachtungspunkten gezogenen Geraden miteinander einschließen.

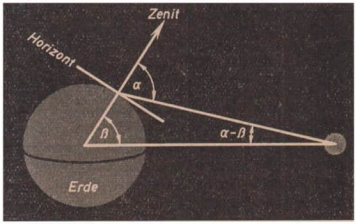
Bei den großen Entfernungen im Weltenraum muß auch die Basis entsprechend lang sein. Soll innerhalb des Sonnensystems vermessen werden, so verwendet man den Erdradius als Basis (Bild 48). Wenn der Himmelskörper im Laufe der täglichen Erdumdrehung seinen höchsten Stand erreicht hat, bildet er mit der durch den Beobachtungsort gehenden Senkrechten den Winkel α. Würde man ihn direkt mit dem Erdmittelpunkt verbinden, so ergäbe sich der Winkel β. Die Differenz dieser beiden Winkel $(\alpha - \beta)$ nennt man die *tägliche Parallaxe* des Himmelskörpers. Der Winkel α hat seinen größtmöglichen Wert, nämlich 90°, wenn ein Gestirn im Horizont steht. Befindet sich der Beobachter zugleich am Äquator, so erhält man den Sonderfall der *Äquatorialhorizontal-Parallaxe* (Bild 49). Obwohl das über dem Erdradius stehende Dreieck dann rechtwinklig ist, kann man wegen der Kleinheit des Winkels $(\alpha - \beta)$ die bekannte Beziehung



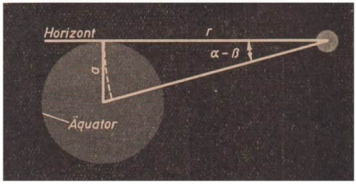
(51) Winkel im Bogenmaß $= \dfrac{\text{Bogenlänge}}{\text{Entfernung}}$

anwenden, da der zum Winkel $(\alpha - \beta)$ gehörige Kreisbogen mit dem Erdradius praktisch zusammenfällt. Hiernach finden wir die

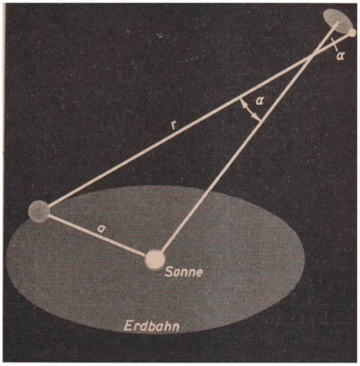
(52) Entfernung $r = \dfrac{\text{Erdradius } a}{\text{Parallaxe}}$.



Im betrachteten Fall ist die Parallaxe des Mondes beispielsweise $\alpha = 0{,}95068°$. Dieser Winkel beträgt im Bogenmaß $\alpha = \dfrac{\alpha \cdot \pi}{180} = 0{,}01659$ und die Entfernung Erde–Mond $r = \dfrac{6378\text{ km}}{0{,}01659} = 384400$ km.



47. Prüfung eines Lineals
48. Tägliche Parallaxe
49. Äquatorialhorizontal-Parallaxe



50. Jährliche Parallaxe

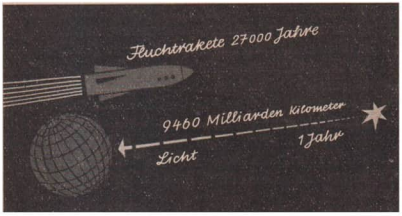
Um die Entfernung von Fixsternen festzustellen, erweist sich der Erdradius als viel zu klein. Man muß zu einer viel größeren Basis übergehen und verwendet hierzu den Halbmesser der Erdbahn. Es zeigt sich dann, daß viele näher gelegene Sterne im Laufe des Jahres größere oder kleinere Ellipsen am Himmelsgewölbe durchlaufen. Diese Bewegung ist jedoch nur scheinbar und nur die Folge unseres Standortwechsels. Mißt man die große Halbachse dieser Ellipse im Winkelmaß, so stellt dieses die *jährliche Parallaxe* des Sterns dar (Bild 50).
Obwohl auch diese Basis im Vergleich zu den in Frage kommenden gigantischen Entfernungen ziemlich schmal ist, reicht sie für viele relativ nahe gelegene Sterne noch aus. Der Erde am nächsten gelegen ist „Proxima Centauri", ein sehr lichtschwacher Stern, der in unseren Breiten nicht sichtbar ist. Seine Parallaxe wurde mit 0,765″ gemessen. Mit dem Halbmesser der Erdbahn $149{,}6 \cdot 10^6$ km errechnet sich eine Entfernung nach dem gleichen Verfahren, das wir soeben beim Mond anwandten, zu $4{,}034 \cdot 10^{13}$ km.
Angesichts solch riesenhafter Zahlen versagt unser Vorstellungsvermögen vollständig. Um wenigstens handlichere Werte und bequemere Vergleichsmöglichkeiten zu schaffen, haben sich für solche Fälle zwei besondere Maßeinheiten eingebürgert. Die eine ist die *Parallaxensekunde*, kurz pc geschrieben. Sie bedeutet diejenige Entfernung eines Objektes, dessen Parallaxe in bezug auf den Erdbahnradius 1 Winkelsekunde beträgt. Der letztgenannte Stern hat demnach die Entfernung $\frac{1''}{0{,}765''} = 1{,}31$ pc. Hieraus findet man auch leicht:

$$(53)\quad 1 \text{ pc} = 3{,}0857 \cdot 10^{13} \text{ km}.$$

Vielleicht ein wenig anschaulicher ist die gleichfalls viel verwendete Einheit 1 *Lichtjahr*. Es ist diejenige Entfernung, die das Licht in einem Jahr zurücklegt, genauer: während der Zeit von $31{,}557 \cdot 10^6$ Sekunden. Da die Lichtgeschwindigkeit $c = 299\,790$ km/s beträgt, ist diese Strecke gleich dem Produkt dieser Zahlen, und zwar

$$(54)\quad 1\ \textit{Lichtjahr} = 9{,}4605 \cdot 10^{12}\ \mathrm{km};\ 1\ \mathrm{pc} = 3{,}26\ \textit{Lichtjahre}.$$

Ein Lichtjahr – das sagt sich so leicht dahin. Aber kann man sich diese Strecke vorstellen? Es ist unmöglich, und alle Vergleiche enden immer wieder am Rand neuer schreckenerregender Abgründe. Man könnte versuchen, die Strecke mit der vollen Anfangsgeschwindigkeit einer Fluchtrakete abzufahren. Da müssen wir die Insassen vor dem Einsteigen darauf aufmerksam machen, daß ihre Reise 27000 Jahre dauern wird (Bild 51). Man könnte die Strecke mit der Entfernung Erde–Sonne vergleichen und findet dann, daß 1 Lichtjahr mehr als 6 Millionen mal länger ist. Auch kein Schneidermeister kann es wagen, an einen Zwirnsfaden dieser Länge zu denken, da dessen Masse 200 Millionen Tonnen betragen würde. Es bringt also nicht viel ein, sich darüber besonders zu beunruhigen. Mehr oder weniger gekünstelte Versuche, das Lichtjahr den gewohnten Begriffen verständlicher zu machen, ändern nichts an seiner Länge und auch nichts daran, daß der nächstgelegene Fixstern Proxima Centauri 4,26 Lichtjahre von der Erde entfernt ist. Gegenüber den übrigen Sternen und Sternsystemen ist dieser Abstand noch sehr klein zu nennen.
Da aber die Meßgenauigkeit der trigonometrischen Methode mit etwa $\pm 0{,}03''$ begrenzt ist, kommt man damit nicht beliebig weit. Die äußerstenfalls noch erfaßbare Entfernung beträgt etwa 100 Lichtjahre.



51. 1 Lichtjahr

Für noch größere Weiten müssen grundsätzlich andere Methoden angewandt werden, von denen noch die Rede sein wird. Man hat es hier mit Millionen von Lichtjahren zu tun. Von den am weitesten entfernten Objekten trennen uns mutmaßlich 3 Milliarden Lichtjahre. Besser gesagt: vor 3 Milliarden Jahren waren sie einmal an der Stelle, von der aus das Licht heute zu kommen scheint. Was zur Zeit mit ihnen los ist, werden wir erst in 3 Milliarden Jahren wissen. Wer es eilig damit hat, wird es nie erfahren.

Das Milchstraßensystem

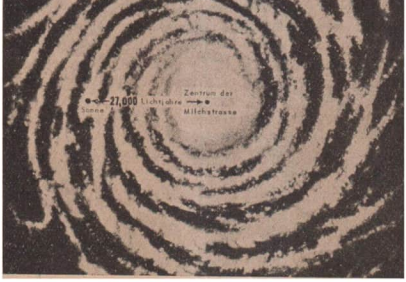
Damit haben wir den engen Raum unseres Planetensystems in Gedanken schon weit überschritten und sind drauf und dran, unsere Betrachtung mehr und mehr auf die Verhältnisse in der Sternenwelt auszudehnen. Noch lange nach Kopernikus' Zeiten stand diese in keinerlei Beziehung zum

Sonnensystem. *Fixsterne* hatte man diese Himmelskörper genannt, weil sie im Gegensatz zu den Wandelsternen, den Planeten, unverrückbar fest am Himmelsgewölbe zu sitzen scheinen. In kühner Vorausschau hatte es der Dominikanermönch GIORDANO BRUNO gewagt, an dieser seit Aristoteles überkommenen Vorstellung zu rütteln. Vor seinem visionären Blick löste sich die Himmelskugel auf in einen unermeßlichen Raum, in dem die Sterne als unzählige ferne Sonnen schwebten. Diese waren ihrerseits wieder von Planeten umringt, ähnlich der Erde, und von Lebewesen bevölkert. Aber die Zeit war noch nicht reif für solch ketzerische Ideen. Aufs Ärgste von der Kirche verfolgt, floh er rastlos von einem Land in das andere, bis ihn das bittere Schicksal ereilte. Ruhig und aufrecht bis zum letzten Augenblick und angewidert von dieser Art des Christentums betrat er im Jahre 1600 in Rom den Scheiterhaufen.

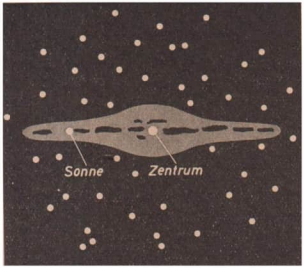
Brunos Gedanken waren stärker als die Flammen und bornierten Geister im Vatikan. Die weitere Entwicklung der Astronomie und Astrophysik gab ihm nur allzu recht: unser Planetensystem ist nur ein winziger Teil des Universums, und es gibt keinen Grund, ihm eine bevorzugte Stellung einzuräumen. Auch den Ausdruck „Fixstern" wollen wir künftig fallen lassen und alle sonnenähnlichen Himmelskörper schlechthin *Sterne* nennen.

Alle mit dem bloßen Auge und gewöhnlichen Fernrohr erkennbaren Sterne bilden ein System höherer Ordnung, das man *Milchstraßensystem* nennt. Besonders die in den letzten Jahren mit Hilfe der „21-cm-Wasserstofflinie" (S. 119) betriebenen Forschungen haben ein ziemlich deutliches Bild dieses gigantischen Sternensystems geliefert. Obwohl unser Sonnensystem darin eingebettet ist, kann seine Struktur mit optischen Mitteln nicht ausgemacht werden, da uns riesige Dunkelwolken die Sicht nach den wichtigsten zentralen Teilen versperren. Lediglich das schwach leuchtende, über den Nachthimmel dahinziehende Band, die Milchstraße, ist ein schmaler Ausschnitt, der sich bei starker Vergrößerung in eine ungeheure Anzahl von Sternen auflöst.

Das Milchstraßensystem in seiner Gesamtheit dürfte aus etwa 100 Milliarden Sternen bestehen. Es hat die Gestalt einer in der Mitte verdickten Diskusscheibe, die sich nach außen hin in eine Anzahl spiraler Arme auflöst (Bild 52). Sein Durchmesser beträgt etwa 80000 Lichtjahre, die Dicke in der Mitte 16000 Lichtjahre. Die Sonne liegt fast genau in der Symmetrieebene und 27000 Lichtjahre vom Zentrum entfernt am Rande eines weit außen liegenden Spiralarmes. Das



52. Wahrscheinlicher Anblick der Ebene des Milchstraßensystems

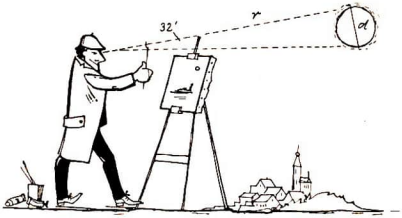


53. Schematische Seitenansicht des Milchstraßensystems mit angedeuteten Dunkelwolken
Weiße verstreute Punkte: Kugelsternhaufen

ganze Milchstraßensystem rotiert mit nach außen hin abnehmender Bahngeschwindigkeit. Die Sonne hat dabei die Geschwindigkeit 220 km/s und benötigt für einen Umlauf 230 Millionen Jahre.
Dieses scheibenähnliche Hauptsystem ist in ein annähernd kugelförmiges Gebiet von etwa 140000 Lichtjahren Durchmesser eingehüllt, in dem sich weitere Sterne befinden. Sie sind hier zumeist in „Kugelsternhaufen", deren jeder 50000 bis 50 Millionen Sterne enthalten mag, vereinigt (Bild 53). Das alles soll nur eine grobe Übersicht sein, da es uns weniger auf astronomische Einzelheiten als auf die hier waltenden physikalischen Gesetze ankommt. Wir werden aber noch sehen (S. 156), daß sich der Gesamtaufbau der Welt nicht im Milchstraßensystem allein erschöpft. Auch dieses ist nur eine kleine Insel im Ozean des Universums, über das sich heute wohl einiges vermuten, aber nichts Endgültiges sagen läßt.

Die Größe der Himmelskörper

Neben der Frage nach der Entfernung der Himmelskörper steht die nach ihrer Größe. Auch sie ist nicht so leicht zu beantworten; denn schon beim Mond gehen die Meinungen offenkundig weit auseinander. Nicht etwa Laien, sondern sogar Kunstmaler, die als Fachleute über ein besonders gutes Augenmaß verfügen, geben seine Größe recht unterschiedlich an. Ob aus eigener schwärmerischer Begeisterung oder aus gutgemeintem Dienst am Kunden, sie malen ihn immer viel zu groß. Man würde den Maler mit Verachtung strafen, der es wagen sollte, ihn in richtiger Größe abzubilden. Hier ist sie nämlich: Man betrachte diesen kleinen Kreis von 2,3 mm Durchmesser aus einem Abstand von 25 cm: ○. Er gibt den Monddurchmesser maßstäblich so wieder, wie er am Himmel erscheint! Man kann es auf einer photographischen Aufnahme einwandfrei nachprüfen und dabei auch den weitverbreiteten Irrtum korrigieren, daß der Mond im Zenit kleiner sei als am Horizont. Denn auch hier liegt nur eine optische Täuschung vor. Wenn der auf- oder untergehende Mond am Horizont steht, vergleicht man ihn unbewußt mit anderen dort befindlichen Gegenständen, etwa einem Haus oder einer Baumgruppe. In Erinnerung an die wahre Größe schätzt man deren Bild unwillkürlich zu groß ein und zugleich damit auch den Mond. Fehlt dann diese Umgebung, so ist man plötzlich enttäuscht und glaubt, der Mond sei kleiner geworden.

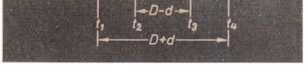


54. Scheinbarer und wahrer Durchmesser des Mondes

Wie auch bei den übrigen Himmelskörpern mißt man seine Größe im Winkelmaß. Dieser *scheinbare Durchmesser* schwankt beim Mond zwischen 29,3′ und 33,4′ (Winkelminuten), da seine Bahn um die Erde ein wenig elliptisch ist (Bild 54). Zufälligerweise erscheint er nahezu ebensogroß wie die Sonne mit 32′. Den linearen, d. h. den *wahren Durchmesser*, erhält man nach der bereits benutzten Beziehung (51) als Produkt

$$\text{wahrer Durchmesser} = \text{scheinbarer Durchmesser} \cdot \text{Abstand}.$$

Für den Mond ergibt sich [26]) $d = 3476$ km, d. i. reichlich ein Viertel des Erddurchmessers.
Viel kleiner als der Mond erscheinen die Planeten. Immerhin können sie in guten Fernrohren noch deutlich als kleine Scheiben gesehen werden, deren scheinbarer Durchmesser gut meßbar ist. Beim Mars schwankt er z. B. je nach seiner Entfernung von der Erde zwischen 3″ und 25″.
Alle Bemühungen, auch die Größe von Fixsternen durch einfache Winkelbeobachtung zu bestimmen, scheitern aber an deren ungeheueren Entfernung. Wie aus anderen Meßmethoden folgt, liegt der scheinbare Durchmesser eines Sterns in der Größenordnung von 0,02″. In demselben Bereich liegt aber die Grenze des Auflösungsvermögens der besten Teleskope (S. 78). Die Sterne erscheinen daher auch im größten Instrument nur als einfache Lichtpunkte, so daß eine direkte Bestimmung ihres Durchmessers nicht möglich ist.



55. Vorbeigang des Begleiters vor dem Hauptstern

[26]) Der scheinbare Durchmesser ist wieder im Bogenmaß einzusetzen. Legt man als Mittelwert 31′5′ zugrunde und für den Mondabstand 384 400 km, so erhält man $d = r \cdot \alpha = \frac{384\,400\text{ km} \cdot 31{,}083 \cdot 2\pi}{360 \cdot 60}$ $= 3\,476$ km.

Um dennoch etwas über ihre Größe zu erfahren, müssen andere Wege eingeschlagen werden. Einer der erfolgreichsten beruht darauf, daß viele Sterne *Doppelsterne* sind, die um ihren gemeinsamen Schwerpunkt kreisen. Wenn man die Bahnebene von der Seite her sieht, geht der eine von beiden Sternen während eines Umlaufes einmal vor dem anderen vorbei und verdeckt den dahinterliegenden (Bild 55). Man nennt diesen Typ von Doppelsternen daher *Bedeckungsveränderliche.* Während der Bedeckung nimmt die Helligkeit des Systems wie bei einer Sonnenfinsternis ab und dann langsam wieder zu. Da es sich hierbei um sehr eng beieinander stehende Sterne handelt, ist diese periodische Lichtschwankung überhaupt das einzige Anzeichen dafür, daß es sich um zwei Sterne handelt.
Wie man aus der Helligkeitsschwankung die Durchmesser D und d der beiden Sterne berechnen kann, sei an folgendem schematischen Beispiel gezeigt, dem besonders einfache und willkürlich angenommene Zahlen zugrunde liegen. Die Umlaufszeit möge 30 Stunden betragen. Vom Beginn bis zum Ende der Verdunkelung sollen $(t_4 - t_1) = 5$ h vergehen, die maximale Verdunkelung (wobei der vorn liegende Stern in voller Größe vor dem hinteren liegt) betrage $(t_3 - t_2) = 2$ h. Nach einem besonderen Verfahren (S. 83) sei die Bahngeschwindigkeit zu $v = 10^5$ m/s bestimmt worden.
Dann gilt für die aus Bild 55 ersichtlichen Strecken $D + d = v(t_4 - t_1)$ und $D - d = v\,(t_3 - t_2)$. Hieraus erhält man

$$D = \frac{(D+d)+(D-d)}{2} = v\,\frac{(t_4 - t_1) + (t_3 - t_2)}{2} = 1{,}26 \cdot 10^9\,\mathrm{m}$$

und

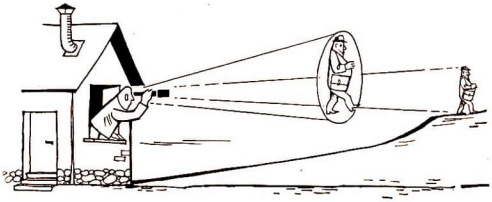
$$d = \frac{(D+d)-(D-d)}{2} = v\,\frac{(t_4 - t_1) - (t_3 - t_2)}{2} = 5{,}4 \cdot 10^8\,\mathrm{m}\,.$$

Es handelt sich also um zwei Sterne von etwa Sonnengröße.
Im allgemeinen sind die wahren Sternendurchmesser äußerst unterschiedlich. Die Sonne ist ein sogenannter „normaler Zwergstern". Viel kleiner sind jedoch die „weißen Zwerge", deren Durchmesser mit dem der Erde vergleichbar ist. Am größten sind die Riesen und Überriesen, deren Größe die der Sonne um ein Vielhundertfaches übertreffen kann.

Das Prinzip des Fernrohres

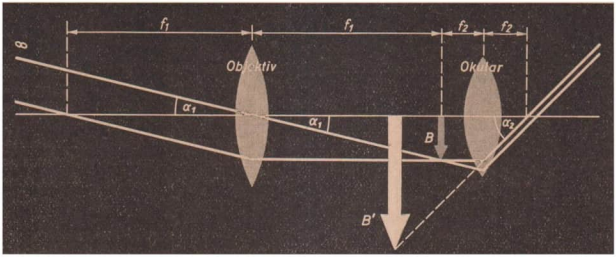
Um den Mitmenschen das Gruseln beizubringen, erzählte man ihnen einst erschreckliche Geschichten mit viel Spuk und Gespenstern. Sie sind heute nicht mehr so recht an den Mann zu bringen. Der Geschmack an Gänsehaut und Zähneklappern hat sich verloren, seitdem man immer mehr dahinterkam, daß doch die wirkliche Welt der Natur und der modernen Technik mehr an Bestaunenswertem zu bieten haben als alle Märchen zusammengenommen. Unser Zeitalter hat die Phantasie auf neue Wege gebracht und bietet ständig Stoff dazu. Immer stärker werden die Motoren, immer größer die Schiffe, immer schneller rast der Mensch durch die Lüfte, und noch sind keine Grenzen abzusehen. Auch die neugierig in den Weltenraum blickenden Fernrohre

scheinen diesen Wettlauf mitzuhalten. Ungeduldig wartet der Laie darauf, wann denn nun endlich das erste Photo eines Marsmenschen auf dem Tisch liegen wird. Er meint wohl, daß sich die Vergrößerung eines optischen Instrumentes ebenso ins Gigantische steigern lassen müsse wie die Leistung eines Großkraftwerkes.
Leider müssen wir ihm mitteilen, daß es höchstwahrscheinlich gar keine Marsmenschen, dafür aber vielleicht viel Interessanteres da oben gibt. Von der Erde aus wird sich das mit einem Fernrohr kaum jemals feststellen lassen. Noch weniger ist bei der Betrachtung der Sterne zu erkennen. Auch mit dem größten Riesenteleskop der Welt sind diese kaum größer zu sehen als im ersten Fernrohr Keplers.
Mit der Vergrößerung der Fernrohre scheint es demnach irgendwie zu hapern. Das hat weniger technische Gründe als seine Ursache in einer etwas störrischen Eigenschaft des Lichtes selbst. Man kann mit dem Licht nicht umspringen, wie man will. Es verlangt zwar sorgfältigsten Schliff der Spiegel und einwandfreie Korrektur der Linsensysteme, setzt aber selbst die Grenze, bis zu der eine Vergrößerung möglich ist. Seine Wellenlänge weist der Technik eine kategorische Schranke.
Zuerst muß man wissen, was man unter der *Vergrößerung* eines Fernrohres zu verstehen hat. Sie wird so ausgedrückt, wie man die Größe eines gesehenen Gegenstandes auch sonst einschätzt. Der Gerichtsvollzieher erscheint um so größer, je größer Winkel ist, den die von seinen äußeren Begrenzungen nach dem Auge gezogenen Strahlen miteinander einschließen (Bild 56). Wenn der Mann zu unserer Erleichterung wieder davongeht, wird dieser Sehwinkel immer spitzer. In der Ferne schrumpft die gefährliche Person zu einem harmlosen Pünktchen zusammen, der Seh-



56. Sehwinkel

winkel beträgt nur noch Bruchteile eines Winkelgrades. Das Fernrohr hat nun die Aufgabe, diesen zu klein gewordenen Sehwinkel wieder zu vergrößern. Wir sehen dann, wie der Mann mit weit ausholenden Schritten seinem nächsten Opfer zustrebt und komischerweise kaum von der Stelle zu kommen scheint, weil sich die ganze Perspektive verändert hat.
Da man mit einem richtigen Fernrohr üblicherweise in die Ferne sieht, ist das von dort kommende Licht fast vollkommen parallel. Das von der Frontlinse des Fernrohres, dem Objektiv, entworfene Bildchen liegt daher in dessen Brennebene. Beim astronomischen Fernrohr stört es nicht, daß es auf dem Kopf steht. Man richtet es nun so ein, daß dieses Bild *B* zugleich in der Brennebene einer zweiten Linse, dem Okular, steht, in das man hineinschaut. Auf Bild 57 sieht man sofort, daß der



57. Vergrößerung eines Fernrohres. α_1 = Sehwinkel ohne Instrument. Das vom Objektiv entworfene Bild B wird unter dem Winkel α_2 gesehen und erscheint daher größer

Sehwinkel α_2 gegenüber α_1 größer ist. Drückt man die beiden Winkel trigonometrisch aus, so ist $\tan\alpha_2 = \frac{B}{f_2}$ (f_2 = Brennweite des Okulars) und $\tan\alpha_1 = \frac{B}{f_1}$ (f_1 = Brennweite des Objektives). Da diese Winkel aber sehr klein sind, kann man die Tangenswerte durch die im Bogenmaß ausgedrückten Winkel selbst ersetzen und bekommt für das Verhältnis $\frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \frac{B/f_2}{B/f_1}$. Dieses Verhältnis der Sehwinkel nennt man die

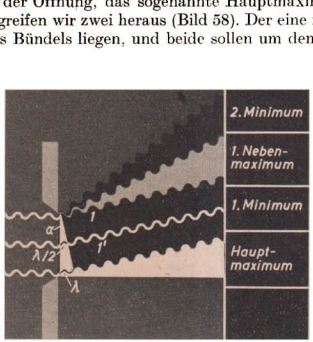
(55) *Vergrößerung eines Fernrohres:* $v = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \frac{f_1}{f_2}$.

Hieraus sieht man, worauf es bei starker Vergrößerung ankommt. Die Brennweite des Objektives f_1 muß möglichst groß und die des Okulars f_2 möglichst kurz sein. Nichts scheint dem im Wege zu stehen, die Vergrößerung v beliebig hoch zu treiben. Es sollte sich wohl einrichten lassen, das Verhältnis f_1/f_2 so groß zu machen, wie man es sich nur wünscht. Leider aber hat das von einem bestimmten Betrag an keinen Sinn. Denn es geht ja nicht um das Vergnügen an einem möglichst großen Sehwinkel, sondern darum, möglichst viele *Einzelheiten* des betrachteten Objektes zu erkennen. Das eine folgt nicht etwa zwangsläufig aus dem anderen. Um das einzusehen, denkt man sich am besten alle Linsen aus dem Fernrohr herausgenommen, so daß nichts übrigbleibt als eine leere Hülse, ein mit Blech eingerahmtes Loch. Wie wir nämlich gleich sehen werden, kommt es lediglich auf den Durchmesser der Öffnung an.

Die Leistung der Fernrohre

Läuft ein paralleles Lichtbündel an einer undurchsichtigen Kante vorbei, so muß auf der gegenüberliegenden Wand ein Schatten entstehen. Sieht man genauer hin, so ist der Schatten jedoch nicht scharf begrenzt, sondern ein wenig verwaschen. Das Licht geht nicht einfach an der Kante

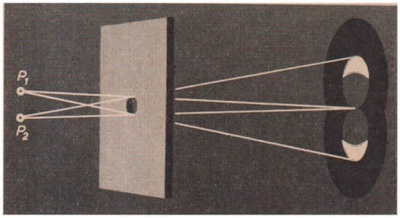
vorüber, sondern ist der Ausgangspunkt eines schmalen Strahlenkegels, der sich nach der Wand hin ständig verbreitert. Das Licht weicht hier von seiner geraden Richtung ab, es wird gebeugt.
Alle Einzelstrahlen eines solchen Bündels erfahren die gleiche *Beugung*, wenn es durch eine spaltförmige Öffnung läuft, die von zwei solchen Kanten gebildet wird. Der Einfachheit halber nehmen wir an, es handele sich um ein Bündel parallelen Lichtes. Es wird daher zum überwiegenden Teil auch nach dem Durchgang durch den Spalt geradeaus weiterlaufen. Auf dem Bildschirm entsteht ein helles Abbild der Öffnung, das sogenannte Hauptmaximum. Von den vielen seitlich abgebeugten Strahlen greifen wir zwei heraus (Bild 58). Der eine mag in der oberen, der andere in der unteren Hälfte des Bündels liegen, und beide sollen um den gleichen Winkel α von der geraden



58. Beugung des Lichtes am einfachen Spalt; Strahl 1 und 1′ sind um eine halbe Wellenlänge gegenseitig verschoben und löschen sich daher aus

Richtung abweichen. Der Winkel α sei nun so gewählt, daß der untere Strahl 1′ gegenüber dem Strahl 1 gerade um eine halbe Wellenlänge verschoben ist. In den Strahlen 1 und 1′ laufen also Wellenberge und Wellentäler nebeneinander her. Sie überlagern sich gegenseitig, sie *interferieren*, und zwar so, daß sich ihre Wirkungen gegenseitig aufheben. Das gleiche trifft auch für alle anderen Strahlen zu, die die Öffnung unter diesem Winkel verlassen. An der entsprechenden Stelle auf dem Bildschirm bleibt es daher dunkel. Betrachtet man einen größeren Beugungswinkel, der so bemessen sei, daß die Verschiebung der beiden Strahlen 2 und 2′ gerade eine ganze Wellenlänge λ ausmacht, dann bewirkt die Interferenz eine gegenseitige Verstärkung, da jetzt immer zwei Wellenberge bzw. zwei Wellentäler zusammenfallen. Auf dem Bildschirm wird es wieder heller; allerdings nicht so hell wie im Hauptmaximum, weil ja die Intensität des gebeugten Lichtes nach den Seiten hin immer mehr abnimmt.
Das Ergebnis ist: Beiderseits des Hauptmaximums entsteht ein System von dunklen und hellen Interferenzstreifen. Für den Winkel, unter dem das erste Minimum vom Hauptmaximum abweicht, gilt mit der Spaltbreite d die Beziehung:

(56) *Lage des ersten Minimums bei der Beugung am einfachen Spalt:* $\sin\alpha = \frac{\lambda}{d}$.



59. Optische Trennbarkeit zweier abzubildender Punkte P_1 und P_2

Dies läßt sich aus den geometrischen Verhältnissen auf Bild 58 ohne weiteres ablesen. Ganz analog sieht es aus, wenn die Öffnung kreisförmig wie in der leeren Fernrohrhülse ist. Sie liefert ein System von konzentrischen Interferenzringen, das auch die beste Linse nicht beseitigen kann (Bild 59).
Aus Gründen der Deutlichkeit sind die Bilder 58 und 59 gegenüber den wahren Verhältnissen stark vergröbert gezeichnet. Damit Interferenzstreifen bzw. -ringe von ausreichender Breite entstehen, müssen die verwendeten Spalten bzw. Lochblenden sehr klein sein.
Die Ausrechnung[27]) führt dann zu dem Ergebnis:

(57) *Winkelabstand des 1. Beugungsminimums bei kreisförmiger Öffnung:* (Durchmesser d in Millimetern) $\alpha = \frac{140''}{d}$.

Wenn das Licht von zwei verschiedenen Punkten herkommt, entstehen also auf dem Bildschirm statt zweier Bildpunkte zwei solcher Ringsysteme. Liegen die Punkte sehr eng beieinander, so werden sich diese Ringsysteme zu einem einzigen überdecken. Um zu erkennen, daß es sich um zwei Punkte handelt, müssen die beiden Systeme wenigstens so weit gegenseitig verschoben sein, daß anstelle eines Lichtfleckes im Hauptmaximum zwei getrennte helle Stellen entstehen. Die geringste Verschiebung, bei der das eintritt, liegt dann vor, wenn das 1. Minimum des einen Ringsystems etwa in die Mitte des Hauptmaximums des anderen fällt; denn jetzt entstehen zwei durch eine dunkle Zone getrennte Lichtflecke.
Die Formel (57) gilt demnach zugleich auch für den kleinsten Winkel, den zwei Punkte mindestens einschließen müssen, wenn sie noch getrennt abgebildet werden sollen. Je größer der Durch-

[27]) Bei kreisförmigen Öffnungen erhält die rechte Seite der Gleichung (56) noch den Faktor 1,22. Nehmen wir eine mittlere Wellenlänge des sichtbaren Lichtes $\lambda = 550 \cdot 10^{-6}$ mm an und bedenken, daß bei den hier in Frage kommenden sehr kleinen Winkeln sin α gleich dem Bogenmaß α ist:

$$\alpha \text{ (Bogenmaß)} = \frac{1{,}22 \cdot 550 \cdot 10^{-6}\,\text{mm}}{d} \quad \text{oder}$$

$$\alpha \text{ (Gradmaß)} = \frac{1{,}22 \cdot 550 \cdot 10^{-6}\,\text{mm} \cdot 180^\circ}{d \cdot \pi} = \frac{0{,}03845^\circ}{d} = \frac{140''}{d}.$$

messer d der Öffnung ist, durch die das Licht in das optische Gerät gelangt, um so enger können die abzubildenden Punkte nebeneinander liegen. Damit haben wir den Angelpunkt des ganzen Problems gefunden:

Das Auflösungsvermögen eines optischen Instrumentes wird um so besser, je größer sein Öffnungsdurchmesser ist.

Ab 1 m Öffnungsdurchmesser werden heute nur noch Spiegelteleskope gebaut. Das derzeit größte Instrument, das Hale-Teleskop auf dem Mount Palomar, hat einen Spiegel von 5,1 m Durchmesser und 16,8 m Brennweite. Nach Gleichung (57) ist sein Auflösungsvermögen $\alpha = \frac{140''}{5100} = 0{,}028''$.

Was sich damit auf dem Mond noch erkennen läßt, ist leicht ausgerechnet. Der kleinste lineare Abstand a zweier Punkte, die noch getrennt gesehen werden können, liegt hier bei etwa 52 m.[28]) Um die Gestalt eines bestimmten Gegenstandes, z. B. die eines Mondkalbes, in den gröbsten Umrissen zu erkennen, sind mindestens einige Dutzend Bildpunkte im genannten Abstand notwendig (Bild 60). Ein solches Tier müßte etliche Kilometer groß sein, wenn es von der Erde aus identifiziert werden soll.

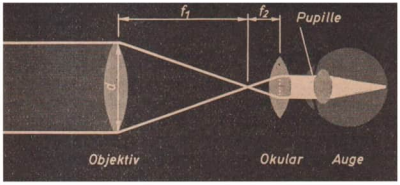
60. Rekonstruktion eines Mondkalbes aus einzelnen Bildpunkten

Nun hat das menschliche Auge, das ja auch ein optisches Instrument darstellt, ein ebenfalls begrenztes Auflösungsvermögen. Man kann es mit $\alpha = 120''$ veranschlagen oder auch auf $140''$ aufrunden. Die Aufgabe des Fernrohres besteht dann darin, den durch Formel (57) gegebenen Winkel auf diesen Wert zu vergrößern. Es muß mithin nach (55) $v = \frac{140''}{140''/d}$ sein. Somit ergibt sich die sogenannte nützliche oder

(58) *förderliche Vergrößerung eines Fernrohres:* $v = d$.
(*d* Objektivdurchmesser in mm)

[28]) Der lineare Abstand zweier Punkte bei gegebenem Winkel ist nach (51) $a = r \cdot \alpha$. Hier ist r die Mondentfernung 384 400 km und

$$\alpha = 0{,}028''; \quad a = \frac{3{,}844 \cdot 10^8\,\mathrm{m} \cdot 0{,}028 \cdot \pi}{3600 \cdot 180} = 52\,\mathrm{m}\,.$$



61. Normalvergrößerung: Das ins Objektiv vom Durchmesser d fallende Lichtbündel wird auf Pupillendurchmesser eingeengt

Bei dem genannten Spiegelteleskop mit seinem Durchmesser $d = 5{,}1$ m ist also die förderliche Vergrößerung $v = 5100$. Die damit erzielten Bilder könnte man zwar mühelos auf ein beliebiges Format bringen. Sie würden aber keine weiteren Einzelheiten mehr enthüllen, sondern nur zunehmend verwaschener erscheinen.
Es hat demnach nicht viel Wert, ausgedehnte Objekte, die sich aus vielen Bildpunkten zusammensetzen (wie die Oberfläche von Planeten, Mond oder Sonne) noch stärker zu vergrößern.
Durch Verwendung eines entsprechenden Okulars kann man zwar das Bild beliebig groß machen. Aber die Anzahl der je Flächeneinheit erkennbaren Bildpunkte nimmt nicht weiter zu. Was man an Größe gewinnt, büßt man an Bildschärfe ein, und der ganze zusätzliche Aufwand ist praktisch umsonst.
Anders dagegen liegt das Problem, wenn man punktförmige Objekte beobachtet, wie sie bei Fixsternen gegeben sind. Infolge ihres winzigen scheinbaren Durchmessers widersetzen sie sich auch den stärksten Vergrößerungen und bleiben eben einfache Punkte, die dann zu Beugungsscheibchen werden. Bei ihnen muß das Fernrohr eine andere Aufgabe erfüllen. Es soll möglichst viel von dem spärlichen zu uns gelangenden Licht sammeln und auch noch Sterne sichtbar machen, die mit dem bloßen Auge nicht mehr zu bemerken sind. Das Objektiv soll wie eine Schüssel wirken, die möglichst viel Licht auffängt und dieses Licht durch das Okular in die Pupille unseres Auges leiten.
Auf Bild 61 ist ein paralleles, von einem Stern kommendes Lichtbündel dargestellt, das auf das Objektiv vom Durchmesser d trifft. Das Fernrohr schnürt dieses Bündel zusammen und führt es in die Augenpupille. Soll das ganze erfaßte Licht ins Auge eindringen, so darf der Durchmesser des konzentrierten Bündels nicht größer als der Durchmesser der Pupille sein. Bei Nacht beträgt dieser etwa 8 mm. Man kann aus Bild 61 ablesen, daß die Durchmesser von Objektiv und Pupille im gleichen Verhältnis wie die Brennweiten f_1 und f_2 zueinander stehen. Dieses Verhältnis ist aber nach (55) gleich der Vergrößerung v des Fernrohres. Daher ist in diesem Fall

$$v = \frac{\text{Durchmesser des Objektives}}{\text{Durchmesser der Pupille des Auges}}$$

Setzt man hier den Pupillendurchmesser 8 mm ein, so erhält man die

(59) *Normalvergrößerung eines Fernrohres:* $v = \frac{d}{8}$.

(d Objektivdurchmesser in mm)

Das sieht nun so aus, als ob auch hier eine stärkere Vergrößerung ohne Wert wäre; denn die ins Auge gelangende Lichtmenge wird nicht größer, wenn das vom Okular erzeugte Bündel noch schmaler wird. Doch hier macht es sich bemerkbar, daß der Untergrund des Himmels mit zunehmender Vergrößerung immer dunkler wird und sich dann Sterne noch abheben, die vorher nicht zu erkennen sind.
Einfacher sind die Überlegungen bei photographischer Beobachtung, weil die lichtempfindliche Platte unmittelbar in die Brennebene des Objektives gesetzt wird. Dann hängt die Lichtstärke bei sonst gleichen Umständen nur vom Durchmesser des Objektives ab. Da es auf die auffangende Fläche ankommt, wächst sie mit dem Quadrat des Objektivdurchmessers.
Daß die Leistung des Fernrohres durch die verschiedensten Nebenumstände, wie Lichtverluste in der Optik, unvermeidliche Abbildungsfehler, Trübung und Unruhe der Atmosphäre, selbstverständlich stark beeinträchtigt werden kann, sei hier nur erwähnt.

Der Dopplereffekt

Zehntausende hat das Motorradrennen aus nah und fern herangelockt. In dichten Reihen umsäumen sie die asphaltierte Strecke, atmen begierig die von Benzindunst, Rizinus und Sensationen schwangere Luft. Der ferne Gesang der Motoren ist Musik in ihren Ohren. Dann kommen die Maschinen herangejagt, einzeln und in Rudeln, silbern schimmernd. Auf ihnen ducken sich groteske Gestalten und steuern sie mit ihren Fäusten von Kurve zu Kurve. Nur für Sekunden sieht man sie im Vorüberhuschen, so schnell, daß man die großen Nummern kaum erkennen kann. Der Kampf Mann gegen Mann, der zugleich ein Kampf zwischen Menschen und Maschinen ist, berauscht die Menge.
Wohl sind es Zehntausende, die es mit hellwachen Sinnen hören können, nur einige Hundert, denen es auffällt, aber wohl kaum einer, der darüber nachdenkt, daß in diesem ohrenbetäubenden Brüllen der Motoren ein seltsames physikalisches Phänomen zu hören ist. Mit hellem Klang kommen die Maschinen heran, und im Moment des Vorbeifahrens schlägt der hohe Ton plötzlich in einen tieferen Ton um. Eine volle Terz oder auch Quarte macht dieser Sprung in der Tonhöhe aus. Der in rasender Umdrehung gleichmäßig singende Motor hat zwei Stimmen. Mit hoher Stimme fährt er auf uns zu, mit tieferer Stimme saust er davon (Bild 62). Wäre es dem weiland Prager Mathematikprofessor Christian Doppler (1803···1853) vergönnt gewesen, an dem Rennen teilzunehmen, so hätte er gewiß seine helle Freude daran gehabt. Vielleicht wäre er voll Begeisterung während einer Pause auf eine der herumstehenden Leitern gestiegen und hätte den verdutzten Zuschauern etwa folgende Rede gehalten:
„Meine hochverehrten Damen und Herren! Das aus diesen neumodischen Maschinen kommende Geräusch besteht aus einer dichten Folge von Verdichtungsstößen, mit denen der schnell laufende Motor die Verbrennungsgase entläßt. Die Anzahl der in einer Sekunde stattfindenden Schwingungen ist so groß, daß man einen Ton hört. Schließen Sie also die Augen und belieben Sie genau hinzuhören! Entsprechend der Drehzahl des Motors hat der Ton eine bestimmte Frequenz f. Die Schwingungen breiten sich im Luftraum aus und legen hier in der Sekunde eine der Schallgeschwindigkeit entsprechende Strecke c zurück. In der Luft laufen die Verdichtungsstöße hinter-

62. *Dopplers* Ansprache beim Motorradrennen

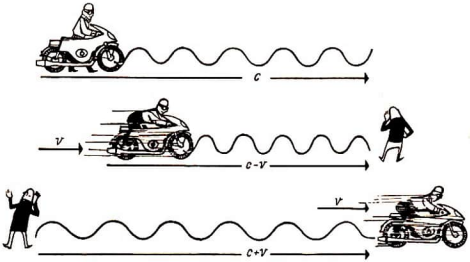
einander her, womit sich also f Schwingungen auf die Strecke c verteilen. Den Abstand von einem Verdichtungsstoß bis zum nächsten nennt man die Wellenlänge. Es ist demnach die

$$(60)\quad \textit{Wellenlänge:}\ \lambda = \frac{c}{f}.$$

Fährt die Feuermaschine mit der Geschwindigkeit v auf Sie, meine hochgeschätzten Zuschauer, zu, so müssen sich die f Schwingungen auf die kürzere Strecke $c—v$ verteilen, weil die Schallgeschwindigkeit c sich nicht ändern kann. Damit verkürzen sich die Schallwellen, und auf Ihre allerwertesten Ohren treffen in der Sekunde mehr Schwingungen, als wenn die Maschine stillstünde. Anstatt der Originalfrequenz f hören Sie einen entsprechend höheren Ton. Bitte haben Sie die Güte, einmal genau darauf zu achten. Was Sie dabei hören, ist mehr wert als der ganze Eintrittspreis!
Jede Welle wird also um den Betrag $\Delta\lambda$ kürzer. Die Gesamtverkürzung aller f Wellen ist dann $f \cdot \Delta\lambda$ und diese ist gleich der Strecke v, um die der Ausbreitungsraum zusammengeschrumpft ist. Das gibt die Gleichung $f \cdot \Delta\lambda = v$. Bringen Sie jetzt freundlicherweise das f auf die rechte Gleichungsseite und bedenken noch gütigst, daß $f = \frac{c}{\lambda}$ ist, dann erhalten Sie $\Delta\lambda = \frac{v \cdot \lambda}{c}$ und hiermit die

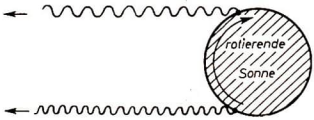
$$(61)\quad \textit{relative Änderung der Wellenlänge:}\quad \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}.$$

Wenn die Maschinen davonfahren, ist es ganz ähnlich, nur werden jetzt die Wellen entsprechend auseinandergezogen, und das Zeichen $\Delta\lambda$ in der letzten Gleichung bedeutet dann eine entsprechende Vergrößerung der Wellenlänge. Wie Sie ganz deutlich zu bemerken belieben, ergibt das einen tieferen Ton. Näheres wollen Sie bitte in meinem 1842 in Prag erschienenen Werk ‚Über das farbige Licht der Doppelsterne' nachlesen!"



63. Dopplereffekt

Doppler selbst hatte es nicht erlebt, welch reiche Früchte seine Entdeckung noch tragen sollte. Sie eröffnete ganz neue Möglichkeiten, die Radialgeschwindigkeit von Himmelskörpern zu bestimmen, d. h. die Geschwindigkeit, mit der sie sich von der Erde entfernen oder auf sie zulaufen. Gleichung (61) gilt demnach auch für das Licht, das ja, ähnlich wie der Schall, eine Wellenbewegung ist. Die Bestimmung der Geschwindigkeit v läuft also darauf hinaus, zu messen, um welchen Betrag $\Delta\lambda$ sich die Wellenlänge einer bestimmten Linie im Spektrum verschiebt. Wieviel man dabei erreichen kann, hängt ganz davon ab, ob der verwendete Spektralapparat überhaupt in der Lage ist, diese im allgemeinen recht kleine Veränderung $\Delta\lambda$ sichtbar zu machen. Sehr gute, mit Prismen arbeitende Apparate erreichen ein Auflösungsvermögen $\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = 50000$. Mit Beugungsgittern, um deren Entwicklung sich Fraunhofer so verdient gemacht hat, können Werte bis 200000 erzielt werden und mit Interferenzspektrographen sogar bis 4000000.



64. Dopplereffekt an den Rändern der rotierenden Sonne

Als Beispiel sei die Rotation der Sonne herausgegriffen, die an sich schon aus der Wanderung der Sonnenflecken erschlossen werden kann. Die sehr kräftige Fraunhofersche Linie H, die dem Kalziumspektrum angehört, hat die Wellenlänge $\lambda = 396{,}8475$ nm. An einer bestimmten Stelle des Sonnenrandes mißt man aber etwas mehr, nämlich 396,8500 nm, und am gegenüberliegenden

Rand dagegen nur 396,8450 nm (Bild 64). Demnach ist $\Delta\lambda = 0{,}0025$ nm. Hieraus ergibt sich nach Gleichung (61) $v = \frac{\Delta\lambda \cdot c}{\lambda} = \frac{0{,}0025 \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{396{,}8475} = 1890$ m/s. Eine einfache Rechnung liefert dann[29]) eine Rotationsdauer von 26,8 Tagen.

Nach der gleichen Methode ermittelt man auch die Bahngeschwindigkeit der schon erwähnten Doppelsterne (S. 73). Ist deren Bahnebene gerade von der Seite her zu sehen, so läuft der eine von beiden auf den Beobachter zu, während der andere nach hinten zurückweicht. Die für beide Sterne gleich große Linienverschiebung hat dann ihren Größtwert, wenn ihre seitliche Entfernung am größten ist. Vielfach ist der Abstand zwischen den beiden Partnern so klein, daß sie im Fernrohr nicht mehr getrennt werden können und wie ein einziger Stern erscheinen. Man erhält dann auch nur ein einziges Spektrum. Die beiden in entgegengesetztem Sinne stattfindenden Linienverschiebungen $\pm\Delta\lambda$ treten in diesem Spektrum gleichzeitig nebeneinander auf. In periodischen Zeitabständen verdoppeln sich alle Spektrallinien und lassen erkennen, daß es sich um zwei Sterne handelt, die umeinander rotieren. Derartige Systeme, die nur mit Hilfe des spektrographisch nachweisbaren Dopplereffektes erkannt werden können, nennt man deshalb *spektroskopische Doppelsterne.*

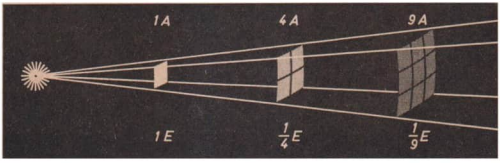
[29]) Die Rotationsdauer ist $T = \frac{2\pi \cdot r}{v}$. Mit dem Sonnenradius $r = 6{,}96 \cdot 10^8$ m und der eben berechneten Umfangsgeschwindigkeit v erhält man $T = \frac{2\pi \cdot 6{,}96 \cdot 10^8 \text{ m}}{1890 \text{ m/s}} = 2{,}314 \cdot 10^6$ s $= 26{,}8$ Tage.

Die Strahlung der Sterne

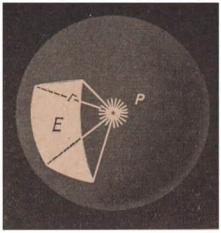
Sonnenstrahlen

Für Auge und Fernrohr sind die Sterne recht undankbare Objekte. Es sind und bleiben eben Punkte: einer so klein wie der andere. Aber diese Punkte haben es in sich. Man täte ihnen sehr unrecht, wenn man sie etwa mit den zum absoluten Nichts abgemagerten Punkten der Geometrie vergleichen wollte. Nein, sie zwinkern und leuchten, daß es eine wahre Freude ist, sie anzuschauen. Sie stehen in anmutigen Figuren und Gruppen beisammen, denen man phantasievolle Namen gegeben hat, und jeder strahlt mit einer anderen Helligkeit.
Ganz nüchtern betrachtet ist aber jeder Stern eine Lichtquelle, eine Lampe, die nach allen Seiten hin gleichmäßig strahlt. Wie stark die Strahlung der Sterne selbst ist, kann man leider nicht so einfach feststellen wie bei einer gewöhnlichen Glühlampe. Hier findet man die Leistung auf dem Glaskolben eingeätzt und sieht mit einem Blick, wieviel Watt die Lampe verbraucht. Allerdings gibt sie hiervon nur einen kümmerlichen Prozentsatz als sichtbares Licht von sich, was jedoch im allgemeinen wenig stört, weil wir uns erstens daran gewöhnt haben und zweitens der elektrische Strom so billig ist. Im ganzen gesehen strahlt die Glühbirne – und deswegen läßt man sie ja glühen – alle von ihr verzehrte Energie nach außen hin ab, vorwiegend jedoch als Wärme. Die Gesamtbilanz: verbrauchte Leistung – Strahlungsleistung muß auf jeden Fall stimmen.
So verstehen wir auch unter der *Strahlungsleistung P* eines Sterns zunächst seine gesamte, je Zeiteinheit ausgesandte Energie. Sie setzt sich zusammen aus elektromagnetischen Strahlen aller möglichen Wellenlängen, d. h. aus Wärmestrahlung, sichtbarem und ultraviolettem Licht.

65. Abnahme der Bestrahlungsstärke mit zunehmendem Abstand



66. Strahlungsleistung P und Bestrahlungsstärke E



Nehmen wir die Strahlenquelle als punktförmig an, so breitet sich die Strahlung gleichmäßig in alle Richtungen des Raumes aus. Ein schmaler Ausschnitt stellt einen Strahlenkegel dar, der sich mit zunehmender Entfernung r immer mehr verbreitert (Bild 65). Die von ihm ausgeleuchtete Fläche A wird mit dem Quadrat der Entfernung immer größer. Die in dem Kegel dahinflutende Energie muß sich daher auf eine immer größer werdende Fläche verteilen. Die von der Flächeneinheit empfangene *Bestrahlungsstärke* E wird immer kleiner:

Die Bestrahlungsstärke der von einer punktförmigen Quelle getroffenen Fläche nimmt mit dem Quadrat des Abstandes ab.

Ein wenig präziser wird dieser Zusammenhang zwischen Strahlungsleistung P und Bestrahlungsstärke E, wenn wir uns eine Kugelfläche vom Radius r um die Strahlenquelle gelegt denken (Bild 66). Sie hat den Flächeninhalt $A = 4\pi r^2$ und fängt die gesamte Leistung P auf. Das, was die einzelne Flächeneinheit davon profitiert, ist dann die besagte Bestrahlungsstärke $E = \frac{P}{A} = \frac{P}{4\pi r^2}$. Es findet sich nochmals bestätigt, daß sie mit dem Quadrat des Abstandes r abnehmen muß.
Das aber ergibt sofort eine Handhabe, die Strahlungsleistung eines Sterns zu berechnen, wenn die Bestrahlungsstärke bekannt ist; denn einfaches Umstellen dieser Beziehung ergibt die

(62) *Strahlungsleistung:* $$P = E \cdot A = 4\pi r^2 \cdot E.$$

Am einfachsten läßt sich die Strahlungsleistung der Sonne bestimmen. Auf der Erdoberfläche ruft sie eine recht angenehme Bestrahlungsstärke E hervor. Um diese zu messen, genügt im Prinzip ein Thermometer, das man in ein von der Sonne erwärmtes Gefäß mit Wasser steckt. Berücksichtigt man durch eine entsprechende Korrektur den von der Atmosphäre verschluckten Anteil, so erhält man die für die obere Grenze der Atmosphäre gültige

(63) *Solarkonstante:* $$E = 1{,}37 \cdot 10^3\ \mathrm{W/m^2}.$$

67. Die Solarkonstante

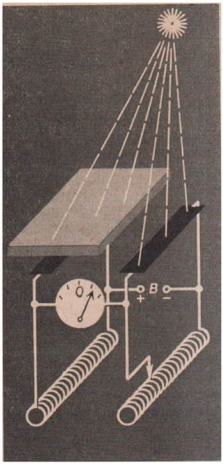
Wie die Maßeinheit angibt, bezicht sie sich auf 1 Quadratmeter bei senkrechtem Strahleneinfall, und man freut sich, daß es die Sonne mit fast anderthalb Kilowatt je Quadratmeter sehr gütig mit uns meint (Bild 67). Für Wolken und schlechtes Wetter kann sie letzten Endes nichts. Auf den ganzen Erdkörper bezogen summiert sich diese Leistung entsprechend. Sie wäre in der Lage, im Laufe eines Jahres einen die gesamte Erdoberfläche bedeckenden Eispanzer von 30 m Dicke abzuschmelzen!
Doch das ist noch gar nichts gegenüber dem, was die Sonne in den gesamten Weltenraum hinaussendet. Die volle Strahlungsleistung unseres Muttergestirns erhält man, wenn man sich wieder jene Kugelfläche um die Sonne gelegt denkt, deren Radius r gleich dem Erdabstand ist. Diese Fläche, mit der Solarkonstanten multipliziert, ergibt dann die gesamte Strahlungsleistung $P = 3{,}85 \cdot 10^{26}$ W.[30])

Strahlungsmesser

Mag ein gewöhnliches Thermometer noch ausreichen, um die Strahlung der Sonne abzuschätzen, so benötigt man zur Messung der von den Sternen kommenden winzigen Strahlungsintensitäten weit empfindlichere Instrumente. Auch für feinere Untersuchungen im Sonnenspektrum ist das einfache Thermometer viel zu grob und muß durch Strahlenempfänger ersetzt werden, in denen die geringste Erwärmung einen elektrischen Strom auslöst.
Eines dieser Geräte ist das *Bolometer*. Sein Hauptteil besteht aus zwei äußerst dünnen geschwärzten Platinstreifen (Bild 68). Sie bilden die benachbarten Zweige einer Wheatstoneschen Brücke. Während der eine Streifen vor der Strahlung geschützt ist, fällt das Sternenlicht durch ein Fernrohr auf den zweiten Streifen. Die Absorption der Strahlung ruft hier eine geringe Temperaturerhöhung und demzufolge eine Vergrößerung des elektrischen Widerstandes dieses Brückenzweiges hervor. Das auf Bild 68 angedeutete Instrument ist bei Abwesenheit einer Strahlung

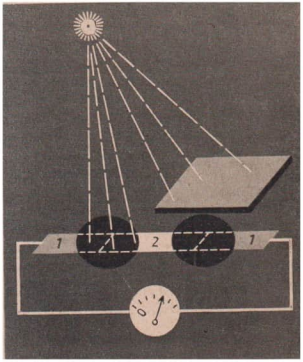
[30]) Mit dem Sonnenabstand $149{,}6 \cdot 10^6$ km ist zu rechnen

$$P = E \cdot 4\pi r^2 = 1{,}37 \cdot 10^3\ \mathrm{W/m^2} \cdot 1{,}496^2 \cdot 10^{22}\mathrm{m}^2 = 3{,}85 \cdot 10^{26}\ \mathrm{W}.$$

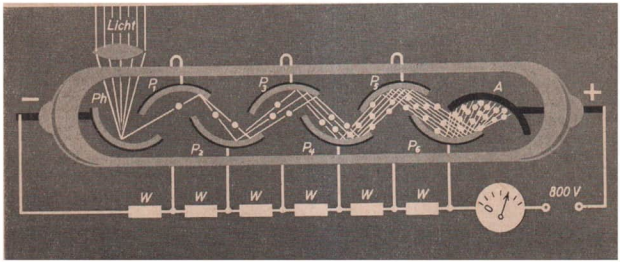


68. Prinzip des Bolometers

69. Prinzip des Thermoelementes



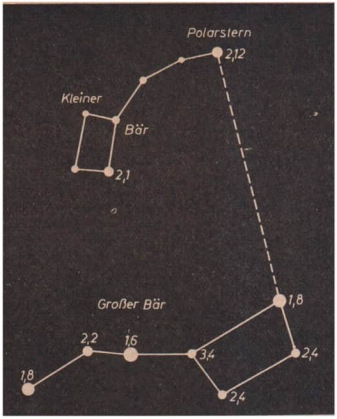
70. Prinzip des Photoelektronen-Vervielfachers



stromlos, da die Brücke mit den beiden unteren Widerständen abgeglichen werden kann. Sie wird mit einer Spannungsquelle gespeist, die bei B anzuschließen ist. Um die vom Bolometer empfangene Bestrahlungsstärke E zu bestimmen, leitet man nach beendeter Messung einen Hilfsstrom durch den Meßstreifen, bis das Instrument denselben Ausschlag zeigt wie unter dem Einfluß der Sternstrahlung. Die Stärke dieses Hilfsstromes läßt die Bestrahlungsstärke in Watt berechnen.
Nach einem anderen Prinzip arbeiten *Thermoelemente*. Hier sind stets zwei Drähte aus verschiedenen Metallen (z. B. Eisen und Konstantan) miteinander verlötet, verschweißt oder sonstwie verbunden und an einen Strommesser angeschlossen. Wird die Lötstelle erwärmt, so fließt ein elektrischer Strom, dessen Stärke ein unmittelbarer Maßstab für die Temperatur ist. Ein auf der Lötstelle befestigtes geschwärztes Plättchen fängt die aus dem Fernrohr kommende Strahlung auf (Bild 69). Damit die Messung durch zufällige Temperaturschwankungen der Umgebung nicht gestört wird, schaltet man nach Bild 69 zwei Elemente gegeneinander und läßt die Strahlung nur auf eines der beiden Plättchen einwirken. Solche in ein Vakuumgefäß eingeschmolzene Thermoelemente mit 1 mm² großer Empfängerfläche zeigen noch Strahlungsleistungen von $0{,}3 \cdot 10^{-9}$ W an.
Am empfindlichsten sind Photozellen mit angeschlossenem Verstärker oder, wenn beide Teile eine geschlossene Einheit bilden, der *Photoelektronen-Vervielfacher*. Nach dem auf Bild 70 angegebenen Schema fällt das Licht aus dem Fernrohr auf die Photokatode *Ph*. Diese trägt eine besonders präparierte Schicht (für den sichtbaren Bereich besteht sie hauptsächlich aus einem Alkalimetall), aus der das Licht Elektronen auslöst. Sie werden im elektrischen Feld nach der Anode A hin beschleunigt und liefern somit einen Strom, der zur Bestrahlungsstärke proportional ist. Da dieser Strom aber viel zu schwach wäre, werden die aus der Katode tretenden Elektronen nacheinander auf eine Reihe von Prallelektroden $P_1 \cdots P_6$ gelenkt. Beim Auftreffen auf eine dieser Elektroden schlägt jedes Elektron etwa 5 neue Elektronen aus der Oberfläche heraus. Damit steigert sich ihre Anzahl bei 2 Prallelektroden auf das 5^2fache. Mit 6 Prallelektroden erreicht man eine Vervielfachung um das 5^6fache, womit eine mehr als millionenfache Verstärkung erzielt wird.

Die scheinbare Helligkeit

Seit alters her bedient man sich jedoch einer ganz anderen und viel einfacheren Methode, um die Strahlung der Sterne abzuschätzen. Sie besteht darin, die Sterne nach der Helligkeit zu beurteilen, wie sie dem bloßen Auge erscheint. Es ergab sich dabei der Brauch, das Lichtermeer der Sterne in *Größenklassen* zu ordnen.
Das kann natürlich mit ihrer tatsächlichen Größe nicht das geringste zu tun haben, weil es nun einmal keine mageren und fetten Punkte gibt. Man meint vielmehr damit den vom Auge empfundenen Helligkeitseindruck, wenn man die Sterne untereinander vergleicht. So legte man sich schon sehr frühzeitig auf 6 Größenklassen fest. Die hellsten, mit dem unbewaffneten Auge sichtbaren Sterne sind Sterne 1. Größe, die schwächsten, eben noch erkennbaren solche 6. Größe. Es fallen nicht gar so viele in diesen dem Auge unmittelbar zugänglichen Bereich. Wenn man sich die Zeit dazu nimmt, kann man von Horizont zu Horizont an die 3000 Sterne zählen.
Um einen ersten Eindruck dieser Größenskala zu gewinnen, betrachte man das allbekannte



71. Großer und kleiner Bär mit den scheinbaren Helligkeiten

Sternbild des „Großen Bären", häufig auch „Großer Wagen" genannt (Bild 71). Hier sind die Größen neben die Sterne geschrieben, sogar noch in Bruchteilen genau. Die mehr oder weniger großen Punkte sollen die Helligkeit natürlich nur symbolisch andeuten. Die Schreibweise $2,^{m}4$ usw. ist in der Astronomie üblich und bedeutet z. B. einen Stern der Größe oder *scheinbaren Helligkeit* 2,4.

Da es zu viel Verwirrung stiften würde, diese alte Einteilung von Grund auf umzustoßen, hat man sie in verbesserter Form bis heute beibehalten und kennzeichnet damit die scheinbare Helligkeit m. Dieses m darf aber nicht mit dem gleichlautenden Zeichen für die Masse m verwechselt werden und kommt vom lateinischen „magnitudo", d. h. Größe. Bei diesem Helligkeitsvergleich kommt es übrigens auch sehr auf das verwendete Meßverfahren an. Stützt man sich allein auf das menschliche Auge, so ergibt sich die *visuelle Helligkeit*. Verwendet man elektrische Strahlungsempfänger, die das gesamte vom beobachteten Stern ausgesandte Strahlungsspektrum erfassen, dann erhält man die *bolometrische Helligkeit*. In manchen Fällen können beide Verfahren beträchtliche Unterschiede ergeben. Im folgenden werden wir uns stets auf die bolometrische Helligkeit beziehen.

Für sich allein genommen mißt ein solcher Strahlungsempfänger jedoch etwas ganz anderes als unser Lichtsinn. Er registriert völlig objektiv und unabhängig von unserem persönlichen Gefühlseindruck die Bestrahlungsstärke E, von der wir uns noch erinnern, daß sie in W/m^2 ausgedrückt wird. Unser Auge arbeitet dagegen nach einem gänzlich anderen Prinzip und enthält auch keine elektrischen Meßgeräte. Vor allem aber ist die Sinnesempfindung ganz und gar nicht mit der physikalischen Strahlenwirkung proportional. Es stehen sich also gegenüber: 1. die physikalisch gemessene Bestrahlungsstärke E und 2. die geschätzte scheinbare Helligkeit m eines Sterns.

Diese beiden ihrem Charakter nach ganz verschiedenen Größen sind nun nach einem eigentümlichen Gesetz miteinander verknüpft, das übrigens in ähnlicher Weise auch für andere Sinnesempfindungen gilt:

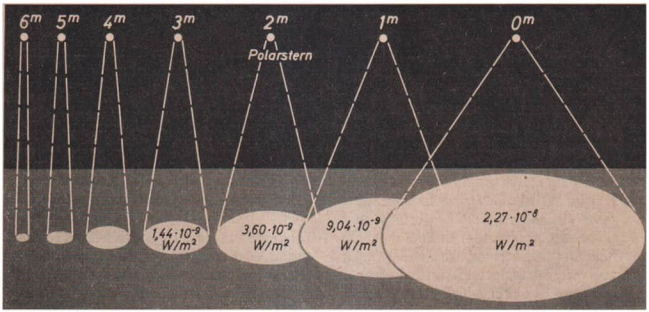
Wir empfinden gleich große Differenzen in den scheinbaren Helligkeiten, wenn die entsprechenden Bestrahlungsstärken den gleichen Quotienten bilden.

Die Nachprüfung der herkömmlichen Helligkeitsskala hat dabei ergeben, daß von einer Größenklasse zur nächstkleineren (d. h. zum nächstgrößer erscheinenden Stern) die Bestrahlungsstärke E jeweils um den Faktor $10^{0,4} = 2,512$ zunimmt. Während die Helligkeit m jeweils um eine Einheit abnimmt, wächst die Bestrahlungsstärke um das rund 2,5fache (Bild 72).

Scheinbare Helligkeit m	6	5	4	3	2	1
Relative Bestrahlungsstärke E	1	2,512	$2,512^2$	$2,512^3$	$2,512^4$	$2,512^5$

Aus dieser doppelten Zahlenreihe liest man ohne weiteres das

(64) *Verhältnis der Bestrahlungsstärken zweier Sterne:* $\frac{E_2}{E_1} = 2,512^{(m_1 - m_2)} = 10^{0,4\,(m_1 - m_2)}$



72. Die den scheinbaren Helligkeiten 6 bis 0 entsprechenden Bestrahlungsstärken E; jede Kreisfläche ist 2,5mal größer als die vorhergehende

ab und erhält daraus durch Umkehrung[31]) die

(65) *Differenz der scheinbaren Helligkeit zweier Sterne:* $$m_1 - m_2 = 2{,}5 \lg \frac{E_2}{E_1}.$$

Diese neue Betrachtungsweise führt sofort zu einer ganz zwanglosen und unbegrenzten Erweiterung der traditionellen Größenskala nach beiden Seiten hin. Sterne, deren Bestrahlungsstärken um jeweils den Faktor 2,512 geringer als die der Klasse 6^m sind, haben die Größen 7^m, 8^m usw. Mit den stärksten Fernrohren kann man heute Sterne bis zur Größe 23^m eben noch feststellen. Ein Stern dagegen, der die 2,5fache Bestrahlungsstärke als ein solcher der Größe 1^m liefert, hat die scheinbare Helligkeit 0^m. Noch hellere bekommen dann entsprechend negative Werte. Ausgangspunkt der ganzen Skala ist der Polarstern, dessen scheinbare Helligkeit mit $2{,}^m12$ festgelegt wurde.
Die Bestrahlungsstärke eines gewöhnlichen Sterns ist erwartungsgemäß außerordentlich gering. An der oberen Grenze der Atmosphäre liefert ein Stern der Größe 0^m die gegenüber der auf S. 85 bereits erwähnten Solarkonstanten äußerst geringe Bestrahlungsstärke $E = 2{,}27 \cdot 10^{-8}$ W/m². Dementsprechend muß dann die scheinbare Helligkeit der Sonne mit ihrem blendenden Licht einen sehr großen negativen Wert haben. Nach Gleichung (65) erhält man unter Benutzung der genannten Bestrahlungsstärken $-26{,}^m95$.[32])

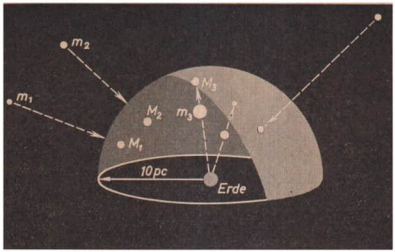
Die absolute Helligkeit

Sucht man nach der Ursache für die unterschiedliche Helligkeit der Sterne, so wird man zunächst vermuten, daß dies an ihrer verschieden großen Entfernung liegen könnte. Je größer der Abstand eines Sterns ist, desto lichtschwächer muß er auch erscheinen. Säßen die Sterne dagegen nach mittelalterlicher Vorschrift auf einer festen Himmelskugel angeknöpft, dann wären alle Entfernungen gleich groß und die Helligkeitsunterschiede lägen jetzt nur noch an der unterschiedlichen eigenen Strahlungsleistung der Sterne. Will man also einen Schluß auf die tatsächlich vorhandene Strahlungsleistung ziehen, muß man zuvor den Einfluß der Entfernung rechnerisch beseitigen. Man erhält dann die *absolute Helligkeit M* des betreffenden Sterns. Man versteht darunter diejenige Helligkeit, die sich bei einer einheitlich gedachten Entfernung von 10 pc (32,6 Lichtjahre) ergeben würde (Bild 73).

[31]) Gleichung (64) wird links und rechts logarithmiert:

$$\lg \frac{E_2}{E_1} = (m_1 - m_2)\, 0{,}4 \log 10 = \frac{m_1 - m_2}{2{,}5}$$

[32]) Mit der Bestrahlungsstärke des Vergleichssterns der Größe 0^m rechnet man $0 - m_{so} = 2{,}5 \lg \frac{1{,}37 \cdot 10^3}{2{,}27 \cdot 10^{-8}} = 2{,}5 \lg 6{,}04 \cdot 10^{10}$, wonach $m_{so} = -26{,}95$.



73. Scheinbare und absolute Helligkeiten

Gehen wir von der Bestrahlungsstärke aus, die wir von einem Abstand 10 pc befindlichen Objekt empfangen, so wird sie sich nach S. 85 auf das 100fache erhöhen, wenn wir den Abstand auf 1 pc verkürzen. Sie wird andererseits auf den r^2. Teil abnehmen, wenn die in pc ausgedrückte Entfernung nicht 1, sondern r beträgt. Das Verhältnis der beiden Bestrahlungsstärken ist also $\frac{E_2}{E_1} = \frac{100}{r^2}$. Setzen wir das in die Gleichung (65) ein, so tritt anstelle von m_1 die absolute Helligkeit M des Sterns, zu dem die Bestrahlungsstärke E_1 und in unserem Fall die Entfernung r gehört. Wir erhalten folglich

$$M - m = 2{,}5 \lg \frac{10^2}{r^2} = 2{,}5\,(2 - 2 \lg r) = 5 - 5 \lg r.$$

Das ergibt die

(66) *absolute Helligkeit eines Sterns in der Entfernung r* (pc)*:* $\quad M = m + 5 - 5 \lg r.$

Erst mit dieser Angabe M sind die Strahlungsleistungen verschiedener Sterne wirklich vergleichbar. Die M-Werte sind auf einheitliche Entfernungen reduziert, als ob alle Sterne vom Beobachter aus gesehen auf einer Halbkugel vom Radius 10 pc nebeneinander stünden.
Von dieser Perspektive aus ist auch die Sonne nur ein Stern unter ihresgleichen. Alle Pracht und Herrlichkeit unseres weltbeherrschenden Zentralgestirns schrumpft zu einem Sternchen von der Größe $+ 4{,}^{m}62$ zusammen.[33]) Unsere Hochachtung ist dahin.
Auch der auf S. 48 schon erwähnte Sirius, der hellste Stern des Nachthimmels, büßt wesentlich an Glanz ein, wenn er aus der genormten Entfernung 10 pc betrachtet wird. Seine scheinbare Helligkeit beträgt $-1{,}^{m}43$ und seine Entfernung 2,7 pc. Für seine absolute Helligkeit finden wir nach Gleichung (66)

$$M = -1{,}43 + 5 - \lg 2{,}7 = +1{,}41\,.$$

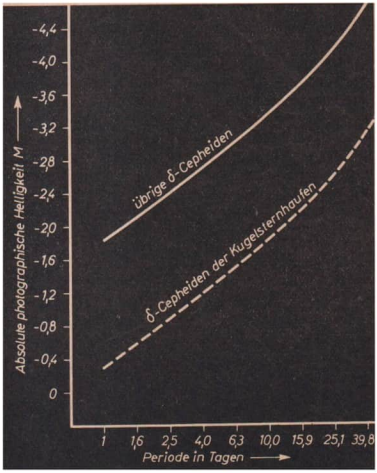
Wenn man die absolute Helligkeit M bestimmen will, muß man also unbedingt die Entfernung r des Sterns kennen; es sei denn, es gäbe ein davon völlig unabhängiges Verfahren, die absolute

[33]) Mit der Sonnenentfernung $149{,}6 \cdot 10^6$ km $= 4{,}85 \cdot 10^{-6}$ pc (53) ergibt Gleichung (66) $M = -26{,}95 + 5 - 5 \lg 4{,}85 \cdot 10^{-6} = +4{,}62$.

Helligkeit auf andere Weise zu bestimmen. Wenn ein solches bekannt wäre, hätte man andererseits einen Weg gefunden, aus dem Zusammenhang von M und r noch größere Entfernungen zu berechnen, als dies mit der trigonometrischen Methode möglich ist, deren Reichweite auf höchstens 100 Lichtjahre begrenzt ist.

Pulsierende Sterne

Dieser Weg fand sich in ganz unerwarteter Weise, als die amerikanische Astronomin LEAVITT im Jahre 1912 die *Cepheiden-Methode* entdeckte. Es gibt da eine Anzahl sehr weit entfernter und in allen Gegenden des Weltalls verbreiteter Sterne, deren Helligkeit in regelmäßigen Zeitabständen ab- und zunimmt. Ein typischer Vertreter ist der Stern δ im Cepheus, weshalb man diese *Pulsationsveränderlichen* auch δ-Cepheiden nennt. Die physikalischen Ursachen dieser Pulsation sind noch nicht genau bekannt. Wahrscheinlich handelt es sich um periodisch auftretende Instabilitäten in der Energieerzeugung (S. 125), wobei eine Art von Kippschwingung auftritt.
Miss Leavitt fand nun beim Studium der Magellanschen Wolken,[34]) deren Sterne von der Erde praktisch die gleiche Entfernung haben, daß die Periodendauer in einer bestimmten Beziehung zur absoluten Helligkeit M steht. Man kann sie durch ein Diagramm darstellen (Bild 74). Zwei solcher Cepheiden haben also die gleichen M-Werte, wenn sie gleich lange Perioden zeigen. Wenn für irgendeinen solchen Stern die wirkliche Entfernung auf trigonometrischem Weg gemessen



74. Periodendauer und absolute Helligkeit der δ-Cepheiden (verbesserte Skala nach *Baade* 1956)

[34]) Es handelt sich hierbei um zwei Sternsysteme außerhalb des Milchstraßensystems, die mit diesem zusammen eine eng zusammenliegende Dreiergruppe bilden.

werden kann, so lassen sich die Entfernungen aller übrigen Cepheiden, und mögen sie noch so weit entfernt sein, daraus herleiten. Damit eröffnet sich die einzigartige Möglichkeit, eine für alle Gebiete des Kosmos gültige Entfernungsskala aufzustellen.
Ein einfaches Beispiel möge das illustrieren. Ein Stern dieser Art habe die trigonometrisch ermittelte Entfernung 35 Lichtjahre und eine Helligkeitsperiode von 4 Tagen. Ein anderer Stern zeige dieselbe Periode, erscheine aber um 10 Größenklassen lichtschwächer. Wegen der gleich langen Periode müssen die M-Werte beider Sterne gleich groß sein. Der Unterschied in den scheinbaren Helligkeiten kann dann nur an den verschiedenen Entfernungen liegen. Da die scheinbaren Helligkeiten um $(m_1 - m_2) = 10$ differieren, muß nach Gleichung (64) das Verhältnis ihrer Bestrahlungsstärken $\frac{E_2}{E_1} = 10^{0,4 \cdot 10} = 10000 : 1$ sein. Weil als Ursache dieses Verhältnisses nur die unterschiedliche Entfernung in Frage kommt und die Bestrahlungsstärken mit dem Quadrat der Entfernung abnehmen, muß der zweite Stern 100mal weiter entfernt sein als der erste. Er hat folglich die Entfernung $35 \cdot 100 = 3500$ Lichtjahre.
Nach der auf Bild 74 angegebenen Kurve haben beide Sterne entsprechend ihrer Periodendauer von 4 Tagen dieselbe absolute Helligkeit $-2,^{M}7$. Hat nun ein beliebiger dritter Stern die Periodendauer 10 Tage und die scheinbare Helligkeit $+1,^{m}6$, so muß seine absolute Helligkeit laut Diagramm $-3,^{M}4$ sein. Dann können wir seine Entfernung r nach Gleichung (66) berechnen und erhalten

$$\lg r = \frac{m - M + 5}{5} = 2$$

und daraus

$$r = 100 \text{ pc}.$$

Die Leistungsfähigkeit dieser Methode erstreckt sich bis zu etwa 50 Millionen Lichtjahren und versagt erst bei solchen Weiten, in denen keine einzelnen Sterne dieses Typs mehr erkennbar sind.
Als im Jahre 1952 bei Beobachtungen mit dem 5-m-Spiegel des Mt. Palomar gewisse Unstimmigkeiten bei Entfernungsmessungen dieser Art auftraten, wurde es notwendig, die Beziehung zwischen der absoluten Helligkeit und der Periodendauer nochmals zu überprüfen. Als Ergebnis stellte sich heraus, daß die Helligkeiten der δ-Cepheiden in den Kugelsternhaufen (S. 71) bei gleicher Periodendauer um 1,5 Größenklassen schwächer sind als die der übrigen Cepheiden. Damit mußten die bisherigen Entfernungsberechnungen aller außerhalb des Milchstraßensystems gelegenen Objekte revidiert werden. Sie ergeben sich nunmehr als durchweg doppelt so groß, als man bisher annahm. Man erkennt daraus die Schwierigkeiten, die Entfernung außergalaktischer Objekte zu bestimmen.

Leuchtkraft und Masse

Als physikalische Ursache der unterschiedlichen absoluten Helligkeiten M der Sterne haben wir vorhin (S. 92) deren Strahlungsleistung P erkannt. Das diese beiden Größen verbindende Gesetz muß andererseits mit der entsprechenden Gleichung (65) formal übereinstimmen. Diese enthielt

nun das Verhältnis $\frac{E_2}{E_1}$, anstelle dessen jetzt das Verhältnis $\frac{P_2}{P_1}$ zu treten hätte. Da jedoch die Strahlungsleistungen sehr unhandliche Zahlenwerte darstellen, setzt man die Strahlungsleistung der Sonne gleich 1 und bezeichnet dann die der übrigen Sterne als deren *Leuchtkraft L*. Die Leuchtkraft L eines Sterns ist seine bezüglich zur Sonne relative Strahlungsleistung. Damit entsteht aus der Gleichung (65) die analoge Beziehung

(67) *Differenz der absoluten Helligkeiten zweier Sterne:* $$M_1 - M_2 = 2{,}5 \lg \frac{L_2}{L_1}.$$

Setzt man hier die Leuchtkraft der Sonne $L_1 = 1$ ein und die auf S. 92 berechnete absolute Helligkeit der Sonne $M_1 = +4{,}62$, erhält man sofort die

(68) *absolute Helligkeit eines Sterns:*

$$M = M_1 - 2{,}5 \lg L = 4{,}62 - 2{,}5 \lg L.$$

Damit kann man die Leuchtkraft eines Sterns sehr leicht berechnen, wenn man seine absolute Helligkeit kennt. Beispielsweise hatten wir vorhin (S. 92) die absolute Helligkeit des Sirius mit $M = 1{,}41$ ermittelt. Daraus ergibt sich

$$\lg L = \frac{4{,}62 - 1{,}41}{2{,}5} = 1{,}284 \text{ und somit } L = 19.$$

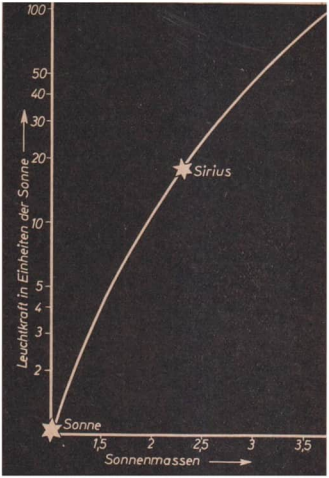
Dies bedeutet, daß die Strahlungsleistung P des Sirius 19mal größer als die der Sonne ist.
Der Verdacht, daß es noch viel lichtstärkere Sterne als die Sonne gibt, hat sich damit bestätigt. Man hat sogar Sterne gefunden, deren Leuchtkraft die der Sonne um das 100000fache übertrifft.
Die unterschiedliche Leuchtkraft der Sterne kann natürlich die verschiedensten Ursachen haben. Wenn man aber etwa gleiche chemische Zusammensetzung und gleiche Temperatur annimmt, so läßt sich vermuten, daß die abgestrahlte Leistung von der Masse des Sterns abhängen muß. Aus der theoretischen Behandlung des Problems ergab sich dabei die

(69) *Masse-Leuchtkraft-Beziehung* $$L = M^{3.5}$$
(M bedeutet hier die Masse des Sterns in Einheiten der Sonnenmasse).[35])

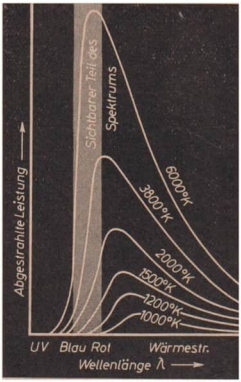
Wenden wir sie auf den Sirius an, dessen Leuchtkraft wir soeben mit $L = 19$ berechneten, so folgt

$$M = \sqrt[3,5]{19} = 2{,}33 \text{ Sonnenmassen (Bild 75).}$$

[35]) Diese Masse-Leuchtkraft-Beziehung gilt nicht absolut genau, sondern nur näherungsweise. Stärkere Abweichungen ergeben sich bei den „weißen Zwergen" (S. 98), deren Leuchtkraft gegenüber Gleichung (69) etwa 100mal zu gering ist.

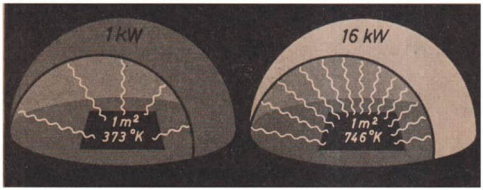


75. Masse-Leuchtkraft-Beziehung



77. Strahlungskurven des schwarzen Körpers

76. Das Stefan-Boltzmannsche Gesetz: Bei Verdoppelung der absoluten Temperatur steigt die Strahlungsleistung des schwarzen Körpers auf den $2^4 = 16$fachen Wert



Je nach ihrer Leuchtkraft gibt es demnach größere und kleinere Sonnen. Nur eine von ihnen ist so nahe, daß wir ihre Wärme kosten dürfen. Die anderen vergeuden ihre Energie in den leeren Raum und fragen nicht danach, ob sich das bezahlt macht. Es gibt aber noch viel kleinere Sonnen, die desto nützlicher sind. Sie werden in Fabriken hergestellt und sind für wenig Geld in jedem Warenhaus zu haben. Zu Hause braucht man nur eine Schnur in die Wand zu stecken, und schon bestrahlt das Miniatursönnchen kalt gewordene Füße oder die dicke Backe mit wohliger Wärme. Eine solche elektrische Heizsonne ist zwar nicht so heiß wie ihre große Schwester, aber hinsichtlich der abgestrahlten Leistung gilt im großen und ganzen das gleiche Gesetz:

(70) *Strahlungsleistung:* $P = \sigma \cdot A\, T^4$

(Gesetz von STEFAN-BOLTZMANN)

Man erhält sie in Watt, wenn eingesetzt werden: die Strahlungskonstante $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}\ \mathrm{W/m^2\,grd^4}$, die Oberfläche A des strahlenden Körpers im $\mathrm{m^2}$ und die absolute Temperatur T in Grad Kelvin (Bild 76).

Genau gelten das Gesetz und besonders die Konstante σ nur für den *schwarzen Körper*. Dieser hat bekanntlich die Eigenschaft, die gesamte auf seine Oberfläche fallende Strahlung zu absorbieren und erscheint dem Auge im kalten Zustand tiefschwarz wie Ruß oder ein Mauseloch. Im Vergleich zu allen anderen Körpern strahlt er auch die größtmögliche Energie ab.

Das Stefan-Boltzmannsche Gesetz liefert die insgesamt abgestrahlte Leistung, es sagt aber nichts darüber aus, woraus sich diese Strahlung zusammensetzt. Es handelt sich um ein breites kontinuierliches Spektrum elektromagnetischer Wellen. Tastet man die einzelnen Wellenlängenbereiche mit einem empfindlichen Strahlungsempfänger ab, so findet man, daß sich die Strahlungsenergie in charakteristischer Weise auf die verschiedenen Bereiche verteilt. Es ergibt sich eine Kurve (Bild 77) mit einem ausgeprägten Maximum, das bei einer bestimmten Wellenlänge liegt. Je höher die Temperatur des strahlenden Körpers ist, desto höher und spitzer wird die Kurve. Der darunterliegende Flächeninhalt wird immer größer, da die Gesamtleistung mit der 4. Potenz der Temperatur anwächst.

Nimmt man einstweilen an, daß die Sterne dieses Gesetz befolgen, so läßt sich deren Temperatur leicht berechnen, wenn man ihre Oberfläche A und Strahlungsleistung P kennt. Für die Sonne haben wir die letztere bereits zu $P = 3{,}85 \cdot 10^{26}$ Watt (S. 86) ermittelt. Ihr Durchmesser beträgt $d = 1{,}392 \cdot 10^9$ m. Dann liefert das Gesetz (70) die sogenannte *effektive Temperatur* 5785 °K.[36])

Da man unbedingt die Oberfläche A und damit den Radius r kennen muß, ist das Verfahren nur auf wenige, nahe gelegene Sterne anwendbar. Man darf aber nicht übersehen, daß das Gesetz nur für den schwarzen Körper gilt, was für Sterne nicht genau zutrifft. Am meisten fällt ins Gewicht,

[36]) Nach Umstellen von (70) erhält man $T = \sqrt[4]{\dfrac{P}{\sigma \pi d^2}} = \sqrt[4]{\dfrac{3{,}85 \cdot 10^{26}\ \mathrm{W}}{5{,}67 \cdot 10^{-8}\ \mathrm{W/m^2\,grd^4} \cdot \pi \cdot 1{,}392^2 \cdot 10^{18}\ \mathrm{m^2}}} =$ 5785 °K.

daß sie keine feste Oberfläche haben, sondern gasförmig sind. Die Strahlung stammt aus verschieden tief gelegenen Schichten, und da die Temperatur nach dem Mittelpunkt immer mehr zunimmt, trägt jede Schicht in schwer zu übersehender Weise zur Gesamtstrahlung bei. Erhebliche Anteile der Strahlung werden wiederum in den einzelnen Schichten und auch im Weltenraum absorbiert, so daß die tatsächliche Strahlungskurve von der des schwarzen Körpers erheblich abweichen kann. Immerhin ist die effektive Temperatur ein sehr wichtiger Anhaltspunkt. Bei den meisten Sternen liegt sie zwischen 3000 und 50000 Grad.

Ebenso wie die Strahlungsleistung muß auch die absolute Helligkeit M eines Sternes von seiner Temperatur und dem Durchmesser abhängen. Das Stefan-Boltzmannsche Gesetz läßt sich daher leicht in die Gleichung (68) einbauen. Tut man das,[37]) so erhält man die

(71) *absolute bolometrische Helligkeit eines Sterns:* $M = 4{,}62 - 10 \lg T - 5 \lg d$

(bezogen auf die Sonnentemperatur $T_{so} = 1$ und den Sonnendurchmesser $d_{so} = 1$).

Um die Leistungsfähigkeit dieser Gleichung zu erproben, greifen wir noch einmal auf den Begleiter des Sirius (S. 48 und 95) zurück. Da wir die Masse des Gesamtsystems bereits zu 3,35 und die des Hauptsterns zu rund 2,35 Sonnenmassen abschätzen konnten, entfällt auf den Begleiter etwa $3{,}35 - 2{,}35 = 1$ Sonnenmasse. Da ist es um so auffälliger, daß der immerhin recht schwere Begleiter nur die scheinbare Helligkeit $+ 8{,}6$ hat und nur im Fernrohr erkannt werden kann. Er muß demnach sehr klein sein. Um seinen Durchmesser zu berechnen, brauchen wir erst seine absolute Helligkeit. Diese ist nach Gleichung (66) $M = + 11{,}44$.[38]) Wenn man ferner die Temperatur von Sirius B etwa gleich der Sonnentemperatur annimmt, so wird das Glied $10 \lg T$ (wegen $T = 1$ und $\lg 1 = 0$) in Gleichung (71) gleich Null, und für den Durchmesser d folgt

$$\lg d = \frac{4{,}62 - 11{,}4}{5} = 0{,}64 - 2 \text{ und } d = 0{,}044 \text{ Sonnendurchmesser.}$$

Aus diesen Daten für Sirius B folgt nun auch leicht seine Dichte. Diejenige der Sonne beträgt 1,41 g/cm³, und für Sirius B erhalten wir $\frac{1{,}41 \text{ g/cm}^3}{0{,}044^3} = 16500 \text{ g/cm}^3$. Das ist 2000mal so viel wie die Dichte des Eisens!

Damit stellt sich der Siriusbegleiter als ein besonders interessantes Objekt dar. Er ist ein sogenannter „Weißer Zwerg". Hier ist der Stoff in unvorstellbarer Weise auf engstem Raum komprimiert. Unter ungeheurem Druck sind die Atome zusammengequetscht, daß nicht einmal mehr Raum für die Elektronenhüllen vorhanden sein kann. Es gibt sogar weiße Zwerge, wo die Dichte mehrere hundert kg je cm³ beträgt!

[37]) Da die Leuchtkräfte sich wie die Strahlungsleistungen verhalten, setzt man in (67) für L_2 die Strahlungsleistung des Sterns $P_2 = T_2^4 \sigma \pi d_2^2$ und für L_1 diejenige der Sonne $P_1 = 1^4 \cdot \sigma\pi \cdot 1^2$, wobei Temperatur und Durchmesser gleich 1 gesetzt sind. Damit ist der in (67) stehende Quotient $\frac{L_2}{L_1} = T_2^4 \cdot d_2^2$. Aus (68) wird dann weiter $M = 4{,}62 - 2{,}5 \lg T^4 d^2 = 4{,}62 - 10 \lg T - 5 \lg d$.

[38]) Mit der auf S. 92 angegebenen Entfernung 2,7 pc ergibt sich $M = 8{,}6 + 5 - 5 \lg 2{,}7$
$= 8{,}6 + 5 - 2{,}2 = 11{,}4$.

Farben

Betrachtet man Bild 77 noch einmal genauer, so fällt auf, daß sich das Strahlungsmaximum mit zunehmender Temperatur immer mehr nach dem Bereich der kurzen Wellenlängen verschiebt. Bei 6000 °K liegt die stärkste Ausstrahlung sogar im sichtbaren Bereich des Spektrums. Da das auch für die Sonne zutrifft, könnte man es für einen glücklichen Zufall halten, daß sie uns so gut mit Licht versorgt. Jedoch ist es gerade umgekehrt. Das menschliche Auge hat sich biologisch in optimaler Weise an das Strahlungsmaximum angepaßt, wie es Goethe in die schönen Worte kleidete:

„Wär' nicht das Auge sonnenhaft, wie könnten wir das Licht erblicken?"

Beim schwarzen Körper hängt die Größe der am intensivsten ausgestrahlten Wellenlänge allein von seiner Temperatur ab. Sie ist durch ein einfaches Gesetz gegeben:

(72) *Strahlungsmaximum des schwarzen Körpers (Wiensches Verschiebungsgesetz):* $\lambda_{max} = \frac{0{,}289}{T}\,\text{cm}$.

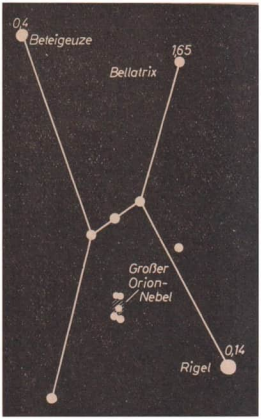
Bei der Sonne ist es die Wellenlänge $\lambda = 500 \cdot 10^{-7}$ cm,[39]) und die in der Netzhaut befindlichen, in bezug auf Lichtempfindlichkeit besonders sensiblen Stäbchen haben genau bei dieser Wellenlänge ihre größte Empfindlichkeit.

Damit eröffnet sich ein zweiter Weg, die Temperatur eines Sterns zu ermitteln. Nach spektraler Zerlegung seines Lichtes tastet man das Spektrum mit einem hochempfindlichen Strahlungsempfänger ab und sucht diejenige Stelle auf, bei der die Strahlungsleistung am größten ist. Wegen der winzigen Größe eines Sternenspektrums ist das eine recht schwierige Aufgabe. Sie führt nur bei sehr hellen Sternen zum Ziel. Es hat sich daher eine dritte Methode der Temperaturbestimmung gefunden, die sich auf die Färbung des Sternenlichtes stützt.

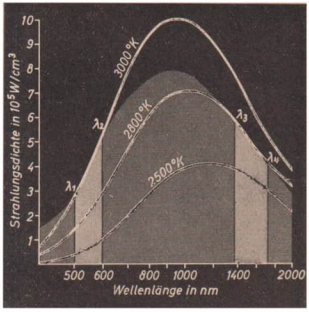
Je nach der Lage des Strahlungsmaximums hat jeder Stern seine besondere Farbe. Mit dem Auge allein ist sie weniger zu erkennen, da die farbempfindlichen Zäpfchen der Netzhaut nur bei größeren Lichtstärken darauf reagieren. Photographiert man dagegen den Nachthimmel auf einen Farbfilm, so überrascht die Aufnahme durch ihre Farbenpracht, die vom satten Rot über das helle Gelb bis zum leuchtenden Blau reicht. Farbunterschiede erkennt das bloße Auge nur bei einigen besonders auffälligen Objekten, wie z. B. im schönen Sternbild des Orion (Bild 78). Links oben strahlt Beteigeuze in ausgesprochen rötlichem, rechts unten Rigel in blauem Glanz. Die Sonne erscheint uns dagegen rein weiß. Im Vergleich dazu strahlt ein schwarzer Körper von niedrigerer Temperatur gelblich. Mit weiter sinkender Temperatur wird seine Glut orange und dann rot, weil das Strahlungsmaximum in das Gebiet der längeren Wellen abwandert.

Die Temperatur nach dieser Farbenskala abzuschätzen wäre eine offensichtlich viel zu rohe Methode. Außerdem würde ein Vergleich mit den entsprechenden Glühfarben des schwarzen Körpers

[39]) Mit der effektiven Temperatur der Sonne (S. 97) 5785 °K ergibt sich $\lambda_{max} = \frac{0{,}289\ \text{cm}}{5785}$ $= 500 \cdot 10^{-7}$ cm.



78. Sternbild des Orion
Schraffiert: großer Orion-Nebel



79. Strahlungskurve eines nichtschwarzen Körpers. Er hat zwischen λ_1 und λ_2 die Farbtemperatur 3000 °K und zwischen λ_3 und λ_4 die Farbtemperatur 2800 °K

auf falsche Werte führen, weil die Strahlungskurven der Sterne von denen des schwarzen Körpers stark abweichen können. Man kann daher in den meisten Fällen nur die sogenannte *Farbtemperatur* bestimmen.

Zur Erläuterung diene Bild 79. Es zeigt einige Strahlungskurven des schwarzen Körpers und die als graue Fläche dargestellte, beliebig angenommene Strahlungskurve eines Sterns. Man sieht, daß diese Kurve zwischen den beiden Wellenlängen λ_1 und λ_2 mit der für 3000 °K gültigen des schwarzen Strahlers zusammenfällt. Man sagt dann, der Stern habe in diesem Bereich die Farbtemperatur 3000 °K. Die Farbtemperatur ist demnach diejenige Temperatur des schwarzen Körpers, dessen Strahlungsleistungen bei zwei verschiedenen Wellenlängen im gleichen Verhältnis stehen wie die des zu messenden Körpers.

Weiter rechts stellt man aber fest, daß zwischen λ_3 und λ_4 die Farbtemperatur nur 2800 °K beträgt. Die Höhe der Farbtemperatur hängt also davon ab, welchen Wellenlängenbereich man

zum Vergleich heranzieht. Für die Sonne erhielt man beispielsweise folgende Werte:

Farbtemperatur im Bereich zwischen 300···400 nm = 4850 °K,
Farbtemperatur im Bereich zwischen 410···950 nm = 7140 °K,
effektive Temperatur (S. 97) = 5785 °K.

Die Zahlen zeigen deutlich, daß die Strahlung der Sonne beträchtlich von der des schwarzen Körpers abweicht. Denn die effektive Temperatur stellt wohl eine Art Zwischenwert dar, stützt sich aber doch nur auf die rein willkürliche Annahme, daß sich die Sonne wie ein schwarzer Körper verhält. Wir sehen also, mit welch schwierigen Problemen die Temperaturbestimmung der Sterne verbunden ist.
Anstatt mit zwei genauen Wellenlängen λ_1 und λ_2 zu messen, verfährt man bei Sternen ein wenig anders. Man wählt zwei möglichst auseinanderliegende Spektralbereiche aus. Sie werden dadurch gewonnen, daß man den Stern einmal mit einer gewöhnlichen, d. h. vorwiegend blauempfindlichen Platte photographiert und ein zweites Mal mit einer Platte, die so vorbehandelt ist, daß sie zusammen mit einem Gelbfilter möglichst genau der Farbempfindlichkeit des menschlichen Auges entspricht. In Einheiten der Größenklassen ausgedrückt, ergibt das im ersten Fall die *photographische Helligkeit* m_{pg} und im zweiten Fall die *photovisuelle Helligkeit* m_{pv}. Die Differenz zwischen beiden Helligkeiten nennt man den *Farbenindex* des betreffenden Sterns.
In gleicher Weise bestimmt man auch den Farbenindex für den schwarzen Körper, indem man seine Leuchtdichte in diesen beiden Spektralbereichen mißt und den Logarithmus dieses Rot-Blau-Verhältnisses für eine Reihe von Temperaturen graphisch darstellt. Die Kurve ist fast linear. Auf dieser Eichkurve sucht man denjenigen Punkt auf, der dem Farbenindex des Sterns entspricht, und erhält damit seine *Farbtemperatur*.
Das hier nur in groben Umrissen skizzierte Verfahren läßt viele Varianten zu, besonders hinsichtlich der ausgewählten Wellenlängenbereiche, der benutzten Strahlungsempfänger und der als Vergleichsstrahler dienenden Sterntypen. Der Vorteil dieser Methode besteht darin, daß die Temperatur auch aus dem Sternenlicht erschlossen wird, ohne daß man sich auf recht oft unsichere Schätzungen von Radius und Entfernung des Sterns und seiner effektiven Temperatur zu verlassen braucht.

Der Strahlungsdruck

Respekt vor den Kräften der Natur bekommt der Mensch meist erst dann, wenn sie ihm unangenehm werden. Solange die Luft in sanfter Strömung einherweht, stört sie höchstens beim Radfahren oder reizt zum Niesen. Es muß schon zur geballten Wirkung eines Sturmes kommen, ehe man sich darauf besinnt, welche Energie in den Molekülen der Luft stecken kann. Und dabei sind sie so winzig klein und leicht, daß keine Waage auf ihre Masse reagiert. Noch unvergleichlich schneller als der schlimmste Orkan sind die Quanten des Lichtes. Mit 300000 km/s brausen sie, von der Sonne kommend, gegen unseren Körper. Aber sie werfen uns nicht um. Die Masse der Strahlungsquanten ist so unermeßlich klein, daß es erst kunstvoll ersonnener Experimente bedarf, den von ihnen erzeugten Druck nachzuweisen. Dem russischen Physiker LEBEDEW ist es im Jahre

1901 zum ersten Mal gelungen, diesen *Strahlungsdruck* mit einer raffiniert ausgeklügelten Apparatur zu messen. Da man mit ihm keine Windmühlen betreiben kann und auch sonst wenig davon hört, ist es verständlich, daß man sich im allgemeinen noch weniger Gedanken um den Lichtdruck macht wie um die Molekularbewegung der Luft bei Windstille.

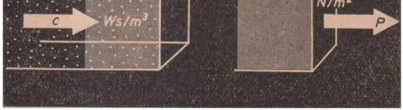
Aber es lohnt doch, der Sache einmal nachzugehen. Hierzu denken wir uns eine Fläche von 1 m^2, auf die je Sekunde eine bestimmte Strahlungsenergie fallen möge. Dies ist die uns schon bekannte Bestrahlungsstärke E, und man kann sie in W/m^2 messen. Nehmen wir weiter an, die Fläche sei vollkommen schwarz, so daß sie alle auftreffenden Strahlen restlos absorbiert (Bild 80). Da die Strahlung den Raum mit der Lichtgeschwindigkeit c durcheilt, enthält ein vor der Fläche liegender würfelförmiger Raum von 1 m^3 in jedem Augenblick die Energiemenge $\frac{E}{c}$. Das ergibt mit den gewählten Maßeinheiten die *Energiedichte* in $\frac{W/m^2}{m/s}$ oder $\frac{Ws}{m^3}$. Nun ist bekanntlich 1 Ws = 1 Nm (Newtonmeter), so daß man dafür ebenso $\frac{Nm}{m^3}$ schreiben kann. Das ist aber wiederum nichts anderes als $\frac{N}{m^2}$, d. h. eine Kraft je Flächeneinheit, und damit der gesuchte Druck. Er ist gleich der Energiedichte:

(73) *Strahlungsdruck auf eine schwarze Fläche:* $$p = \frac{E}{c}.$$

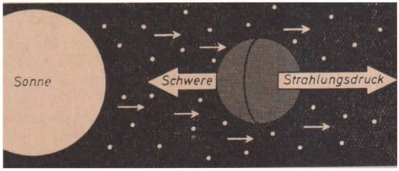
Um seine Größe für den Fall des Sonnenlichts zu berechnen, braucht man wiederum nur von der Solarkonstanten auszugehen und erhält [40]) dann etwa 0,45 Millipond/m^2. Auf einen ganzen Hektar umgerechnet, würde das die Kraft von 4,5 Pond ergeben. Es fällt wirklich schwer, sich einen Vorgang zu denken, wo der Strahlungsdruck eine praktische Rolle spielen könnte.

Gehen wir aber einmal den umgekehrten Weg und betrachten seine Wirkung auf eine sehr kleine Kugel der Masse m, die sich im Schwerefeld eines Sterns befindet. Die vom Strahlendruck ausgeübte Kraft ist dann das Produkt $p \cdot A$, ist also dem Querschnitt $A = r^2\pi$ proportional. Die Schwerkraft aber ist mit $m \cdot g$ der Masse und diese wiederum dem Kugelvolumen $\frac{4\pi r^3}{3}$ proportional. Halbieren wir jetzt den Radius r, so geht die Kraft der Strahlung wegen $\left(\frac{r}{2}\right)^2$ auf $^1/_4$, die Schwerkraft wegen $\left(\frac{r}{2}\right)^3$ auf $^1/_8$ des Anfangswertes zurück. Bei einer gedachten Verkleinerung des Kugelradius auf $\frac{r}{10}$ ergeben sich die Bruchteile $\frac{1}{100}$ bzw. $\frac{1}{1000}$. Man sieht ohne weiteres, daß bei immer kleiner

[40]) Mit der Solarkonstanten (S. 85) $E = 1{,}37 \cdot 10^3$ W/m^2 ergibt sich aus (73) $p = \frac{1{,}37 \cdot 10^3\ Nm/sm^2}{3 \cdot 10^8\ m/s} = 0{,}44 \cdot 10^{-5} N/m^2 = 0{,}45$ mp/m^2.



80. Zur Berechnung des Strahlungsdruckes



81. Gravitation und Strahlungsdruck

82. Komet Arend-Roland 1956

werdender Teilchengröße unfehlbar der Punkt kommen muß, bei dem die Wirkung der Strahlung diejenige der Gravitation überholt. Ein solches Teilchen wird von seinem Muttergestirn nicht mehr angezogen, sondern fortgeblasen (Bild 81).
Der englische Astronom EDDINGTON hat diese Überlegungen zu einer umfassenden Theorie ausgebaut und kam zu einem überraschenden Ergebnis. Sonnenähnliche Sterne, deren Masse größer als 10^{32} kg ist, können wegen des zu groß werdenden Strahlungsdrucks nicht existieren. Die Gravitation ist nicht mehr in der Lage, die nach allen Seiten hin davonstiebende Materie festzuhalten. Die Sonne mit ihren $2 \cdot 10^{30}$ kg Masse hält noch einigermaßen fest zusammen. Der Strahlungsdruck an ihrer Oberfläche beläuft sich auf etwa 20 p/m². Die größten Sterne, die man bis jetzt

fand, haben etwa 60 Sonnenmassen, womit die äußerste Grenze für die Masse erreicht sein dürfte. Es sind also nicht nur die Bäume, die nicht in den Himmel wachsen.

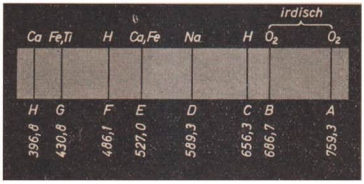
Auch bei anderen Erscheinungen spielt der Strahlungsdruck eine wichtige Rolle. Am auffälligsten zeigt er sich bei den Kometen, deren Schweife stets von der Sonne weg gerichtet sind. Wie es schon KEPLER vermutet hatte, ist es der Strahlungsdruck, der die aus dem Kometenkern verdampfenden Gase in den Weltenraum bläst (Bild 82).

Damit hat sich der Kreis im großen und ganzen geschlossen, der von der scheinbaren Helligkeit bis zur konkreten Ermittlung von Entfernung, Temperatur, Masse und Durchmesser der Sterne reicht. Alle diese Fragen betreffen mehr das äußere physikalische Bild der Sternenwelt. Aber wir haben noch kaum davon gesprochen, woraus denn diese Sterne selbst bestehen. Das könnte eine Angelegenheit der Chemie sein, wenn die Sternenmaterie in dem Zustand vorläge, wie wir ihn von der Erde her kennen. Die physikalischen Voraussetzungen sind aber doch ganz anderer Art. Die Substanz der kosmischen Objekte liegt zum überwiegenden Teil in einer Form vor, mit der kein Chemiker etwas anfangen kann.

Die Substanz der Sterne

Die Spektren der Sterne

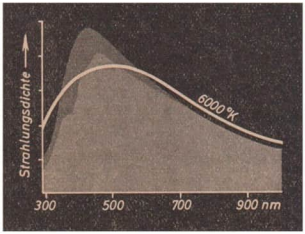
Im Jahre 1801 stürzte in München das Haus eines Glasschleifers ein und begrub den 14jährigen Lehrling JOSEPH FRAUNHOFER unter seinen Trümmern. Wie durch ein Wunder blieb er unverletzt. Gerührt und voller Anteilnahme mit dem Schicksal des schwächlichen und armen Waisenknaben schenkte ihm ein vornehmer Herr Bücher und veranlaßte den König, ihm eine größere Summe Geldes zu übermitteln. Fraunhofer, der seinem Herrn noch das Lehrgeld schuldete, verwandte einen Teil davon, um sich von diesem freizukaufen, und den anderen Teil zur Beschaffung einer Glasschleifmaschine. Doch seine Hoffnung, sich damit eine eigene Existenz gründen zu können, erfüllte sich nicht. Ihm blieb nichts weiter übrig, als wieder seinen alten Dienst anzutreten. Erst nach Jahren fand er als Gehilfe in einer größeren optischen Anstalt Anstellung, um hier mit ganz überragenden Leistungen das ruhmvolle Werk seines leider nur kurzen Lebens zu begründen. Sein Grab trägt die Inschrift: „Approximavit sidera" (Er brachte uns die Sterne näher).



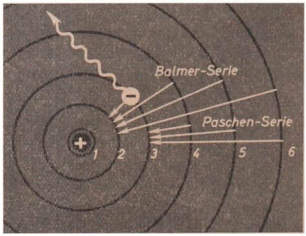
83. Lage der stärksten Fraunhoferschen Linien im sichtbaren Sonnenspektrum, darunter Wellenlängen in nm

Gemeint sind damit nicht allein die von ihm erschmolzenen, völlig homogenen Gläser, seine unübertroffenen achromatischen Linsen und die alles Dagewesene überbietenden Riesenfernrohre, mit denen zum ersten Mal eine Fixsternparallaxe aufgefunden werden konnte. Sein Name bleibt vor allem mit einer großen Zahl von dünnen schwarzen Linien verbunden, die er mit den vorzüglichen, von ihm selbst geschliffenen Prismen im Spektrum des Sonnenlichtes näher untersuchte. Die kräftigsten dieser Linien bezeichnete er mit den Buchstaben A bis K, die auch heute noch so benannt werden (Bild 83). Später fand er dieselben Linien auch mit Hilfe der von ihm verfertigten

Beugungsgitter. Sein bestes Gitter besaß 300 Striche auf 1 mm, mit einer feinen Diamantspitze auf Glas geritzt.
Heute weiß man, daß jede dieser Fraunhoferschen Linien einer bestimmten Wellenlänge entspricht. Das aus dem Sonneninnern stammende Licht des kontinuierlichen Spektrums wird von der darüber liegenden Sonnenatmosphäre gleichsam ausgesiebt. Jede dieser Absorptionslinien, oder eine Serie von mehreren zusammengehörigen, kann dann eindeutig einem bestimmten chemischen Element zugeordnet werden, das in der Atmosphäre des Sterns vorhanden sein muß. An die 20000 solcher Linien wurden bisher im Sonnenspektrum beobachtet und der größere Teil von ihnen identifiziert. Sie sind so zahlreich, daß sie die Energieverteilung der aus dem Sonneninnern kommenden Strahlung beträchtlich verändern (Bild 84). Über 60 chemische Elemente lassen sich damit auf der Sonne nachweisen.
Um das Zustandekommen der Fraunhoferschen Linien besser zu verstehen, ist es jedoch nützlich, die Entstehung des Lichtes im Atom etwas genauer zu betrachten. Am leichtesten ist dieser Mechanismus beim Wasserstoffatom zu übersehen. Nach dem Bohrschen Atommodell befindet sich das um den Kern kreisende Elektron normalerweise im Grundzustand, d. h. auf der dem Kern am nächsten liegenden Bahn. Wird dem Elektron von außen her Energie zugeführt, dann springt es auf eine der weiter außen liegenden Bahnen, indem es einen entsprechenden Energiebetrag absorbiert. Die Dauer eines solchen Anregungszustandes ist außerordentlich kurz, so daß das Elektron sogleich wieder in den Grundzustand zurückfällt und den gleichen Energiebetrag wieder abgibt, den es zuvor absorbiert hatte. Dies geschieht durch Abgabe eines Lichtquants.
Dabei fällt das Elektron meist in einzelnen Schritten, von Bahn zu Bahn, wie auf einer Treppe herunter, wobei es auch mehrere Stufen auf einmal überspringen kann. Jedem dieser Quantensprünge entspricht die Emission eines Lichtquants. Die Vielfalt dieser Sprungmöglichkeiten ist groß, läßt sich aber zu einzelnen Serien ordnen. So gehören alle Sprünge, die auf der dem Kern



84. Spektrale Energieverteilung im Sonnenspektrum
Dunkelgrau: von den Fraunhoferschen Linien absorbierte Energie
Weiß: schwarzer Körper bei 6000 °K



85. Entstehung einiger Linien der Balmer- und Paschen-Serie im Wasserstoffatom

zweitnächsten Bahn endigen, zur sogenannten *Balmer-Serie* (Bild 85). Die ihr entsprechenden Spektrallinien liegen im sichtbaren Gebiet. Sie bieten das allbekannte Bild, das man mit Hilfe einer mit Wasserstoff gefüllten Leuchtröhre und eines einfachen Spektralapparates betrachten kann, wie er heute in jeder schulphysikalischen Sammlung steht.
In der heißen Sternatmosphäre ist nun ein großer Teil der Wasserstoffatome durch Aufnahme thermischer Energie von vornherein im angeregten Zustand. Je nach der Temperatur gibt es also Atome, deren Elektronen sich bereits auf dem zweiten oder einem noch höheren Niveau befinden. Ein solches Elektron kann dann nur Energiebeträge aufnehmen, die es von hier aus auf eine noch höhere Bahn anheben. Das sind eben die Beträge, die in den Wellenlängen der Balmer-Serie stecken. Auf diese Weise werden der kontinuierlichen, aus dem Sterninnern stammenden Temperaturstrahlung genau diese Energiequanten entzogen. Das kontinuierliche Spektrum hat dort, wo die entsprechende Wellenlänge fehlt, eine schwarze Linie.
Ist das Atom dagegen so hoch angeregt, daß das Elektron auf der dritten Bahn umläuft, dann kann die Balmer-Serie nicht mehr zustandekommen, sondern günstigstenfalls die *Paschen-Serie*. Ihr entsprechen die Energiebeträge bzw. Wellenlängen, die das Elektron von der 3. Bahn aus anheben. Ein ionisiertes Atom schließlich, dessen Elektron völlig abgetrennt ist, kann überhaupt keine Energie mehr absorbieren. Daraus folgt als erste Regel: je höher die effektive Temperatur eines Sterns ist, um so stärker sind die Atome seiner Atmosphäre angeregt und desto linienärmer ist sein Spektrum. In umgekehrter Weise ist es bei niederer Temperatur möglich, daß sich durch Zusammentritt einzelner Atome sogar Moleküle bilden. In den kühleren Sternen kommen deshalb außerdem noch die Absorptionsbanden von Titanoxid, Kohlenoxid, Zyan und anderen einfachen chemischen Verbindungen vor.
Leider wird die Deutung der Spektrallinien durch einen zweiten Umstand kompliziert, und dies ist der Einfluß der Schwerebeschleunigung. Mit ihr steigt auch der Druck in der Sternatmosphäre, womit sich Anregungs- und Ionisationsgrad in rückläufigem Sinne ändern. Die Vielfalt der Sternenspektren zu klassifizieren, ihre Sprache zu deuten und möglichst viel Einzelheiten aus ihnen herauszulesen ist daher eine Wissenschaft für sich. Welch ungeheure Kleinarbeit hier zu leisten ist, mögen nur zwei Zahlen belegen. Fraunhofers erstes Verzeichnis umfaßt immerhin schon 567 Linien im Sonnenspektrum. Der heutige „Henry-Draper-Katalog" enthält die Spektren von 225300 Sternen.

Die Elemente im Weltall

Der Spektralanalyse ist es zu verdanken, daß man über die chemische Zusammensetzung des Weltalls eigentlich besser Bescheid weiß als über die unserer eigenen Erde. Von ihr kennen wir nur eine äußerst dünne Schicht an der Oberfläche, deren chemischer Aufbau vom Standpunkt des Weltganzen aus betrachtet keineswegs typisch ist. Die gehäufte Anreicherung schwerer Elemente auf und in der Erde ist vielmehr auf ganz spezifische Bedingungen zurückzuführen, die bei der Bildung der Planeten zusammenwirkten. Wenn man danach fragt, woraus die Welt in ihrer Gesamtheit besteht, so ist die Antwort zunächst sehr einfach.
Es sind genau die gleichen Elemente, die wir schon auf der Erde kennen. Auch in den Sternen

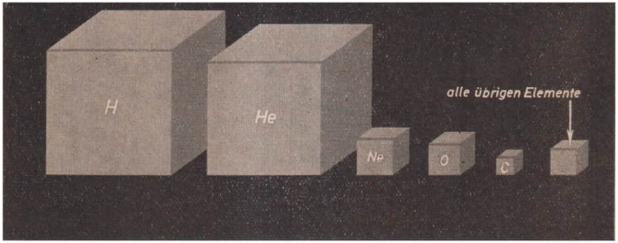
findet man immer wieder dieselben Grundstoffe. Wie man auch suchen mag, nirgendwo in der Welt gibt es andere Elemente, als sie in dem bekannten Periodensystem verzeichnet sind. Nirgendwo im Universum gibt es fremdartige oder geheimnisvolle Stoffe, ein ebenso ernüchterndes wie beruhigendes Resultat. Die Spektralanalyse liefert den Beweis, daß die Welt bis in ihre fernsten Winkel aus ein und derselben Materie besteht.
Doch nicht nur das. Auch die Mengenverhältnisse der einzelnen Elemente zueinander sind in kosmischem Maßstab überall nahezu gleich. Die Untersuchung von Sternen verschiedenster Typen ergab die folgende Übersicht:

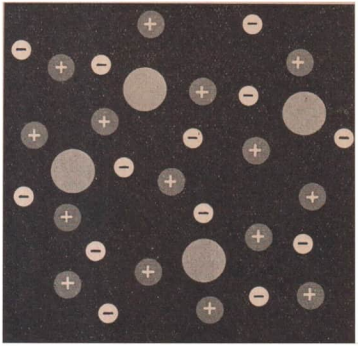
Kosmische Häufigkeit der Elemente
(Relative Anzahl der Atome und prozentualer Anteil an der Gesamtmasse)

Ordnungszahl Z	Element	Atome	%	Ordnungszahl Z	Element	Atome	%	Ordnungszahl Z	Element	Atome	%
1	H	100000	56,2	8	O	98	0,88	13	Al	0,38	0,006
2	He	18000	40,4	10	Ne	115	1,30	14	Si	5,6	0,088
6	C	25	0,17	11	Na	0,23	0,003	20	Ca	0,30	0,007
7	N	54	0,43	12	Mg	6,2	0,85	26	Fe	9,3	0,29
								16	S	1,5	0,027

Über 80 % aller in der Welt vorkommenden Atome sind demnach Wasserstoffatome (Bild 86). Sie sind die leichtesten und einfachsten von allen Elementen. Unter gewöhnlichen Verhältnissen, das will heißen, bei den niederen, uns Menschen zuträglichen Temperaturen, leben sie nicht gern allein. Jeweils zwei von ihnen backen zu einer kleinen Semmel zusammen. Sie bilden ein Molekül, wie es der Chemiker mit dem Symbol H_2 ausdrückt. Mit besonderer Vorliebe verbinden sie sich

86. Kosmische Häufigkeit der Elemente im Verhältnis ihrer Massen





87. Plasma: Elektronen, positive Ionen und neutrale Atome

auch mit den Atomen des Sauerstoffs und bilden mit ihnen zusammen das Wasser H_2O, das große Elixier allen organischen Lebens.
Der Wasserstoff in den Sternen kann aber nicht verbrennen, da die chemische Verbindung H_2O bei den dort herrschenden hohen Temperaturen von vornherein gar nicht bestehen kann. In den Sternatmosphären und erst recht im Sterninnern finden sich alle Stoffe im elementaren Gaszustand. Wie wir gesehen haben, sind hier die Atome durch Aufnahme thermischer Energie in mehr oder weniger angeregtem Zustand und zum Teil auch ionisiert. Es liegt ein durcheinanderwimmelndes Gemenge von neutralen Gasatomen, positiven Ionen und Elektronen vor. Die elektrischen Ladungen sind dabei räumlich getrennt, müssen sich aber im Großen vollständig kompensieren, so daß das Ganze nach außen hin elektrisch neutral ist. Ein solches *quasineutrales Gas* hat soviel besondere Eigenschaften, daß man früher von einem „vierten Aggregatzustand" zu sprechen begann. Heute nennt man es ein *Plasma* (Bild 87).
Auf der Erde kennen wir den Plasmazustand nur bei einigen technischen Vorgängen, wie etwa dem elektrischen Lichtbogen oder der Gasfüllung von Leuchtstoffröhren. Diese Anwendungen stützen sich darauf, daß ein Plasma stets elektrisch leitfähig ist. In kosmischem Maßstab aber ist der Plasmazustand keine besondere Ausnahme, sondern der Normalfall.

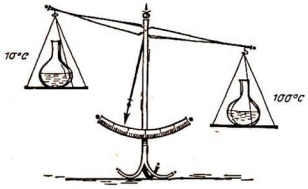
Masse und Energie

Noch bis in den Anfang dieses Jahrhunderts hinein schrieb man der Energie neben der Masse eines Körpers eine völlig selbständige Existenz zu. Ein Körper kann Energie in sich aufspeichern und wieder abgeben. Sie kann in Kohleflözen und braunem Erdöl jahrmillionenlang in der Erde ruhen und als Strahlung mit der Geschwindigkeit des Lichtes durch den leeren Raum fluten. Man kann ihre Form fast nach Belieben verändern; aus Kalorien macht man Kilowattstunden, aus Kilowattstunden mechanische Arbeit. Man handelt mit ihr wie mit einer Ware. Nur eines kann man

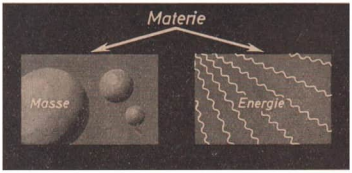
nicht: sie aus dem Nichts erschaffen oder vernichten. Nach dem Gesetz von der Erhaltung der Energie kann ihre Gesamtmenge in der Welt weder zu- noch abnehmen.
Würde man aber das Gesetz nur oberflächlich verstehen, dann stünde man heute vor einem sehr schwierigen Problem. Es wäre unerklärlich, woher die von den Sternen ausgestrahlte Energie stammt. Mindestens seit einer Milliarde Jahren schon strahlt die Sonne mit unverminderter Stärke. Das beweisen die in uralten Sedimentgesteinen erhaltenen Überreste organischen Lebens, das nur im Sonnenlicht gedeihen konnte. Aus dem Zerfall der radioaktiven Stoffe und der Menge ihrer Zerfallsprodukte, die sich in gesetzmäßiger Weise in der Erde anreicherten, folgen etwa 3 bis 5 Milliarden Jahre, die seit der Entstehung der festen Erdrinde verflossen sein müssen. Da die Erde nicht früher dagewesen sein kann als die Sonne, muß diese mindestens das gleiche Alter haben. Geht man aber von der Temperatur und der Wärmekapazität der Sonne aus, so müßte sie auf Grund ihrer enormen Ausstrahlung schon längst erloschen sein. Vergeblich hat man versucht, andere Energiequellen, wie in die Sonne stürzende Meteorschwärme oder die bei etwaiger Kontraktion freiwerdende Gravitationsenergie zur Erklärung der hohen Lebensdauer heranzuziehen.
Die einzig richtige Erklärung ergab sich vielmehr erst mit der Erkenntnis der Relativitätstheorie Albert Einsteins, daß Masse und Energie nicht getrennt bestehen, sondern nach einem fundamentalen Gesetz miteinander verkoppelt sind. Es ist die

(74) *Masse-Energie-Beziehung:* $W = m\,c^2$.

Hiernach kommt jeder beliebigen Energiemenge W eine bestimmte Masse m zu. Man erhält sie, indem man gemäß $m = \frac{W}{c^2}$ die Energie durch das Quadrat der Lichtgeschwindigkeit c dividiert. Wären unsere Waagen fein genug, dann würden sie anzeigen, daß beispielsweise ein Körper an Masse zunimmt, wenn man ihn erhitzt, d. h. wenn man ihm Wärmeenergie zuführt (Bild 88). Sie würden

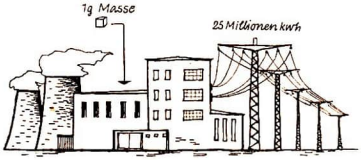


88. Gleiche Wassermengen haben bei verschiedenen Temperaturen verschieden große Massen (stark übertrieben!)



89. Beziehung zwischen Masse und Energie

90. Prinzip eines Atomkraftwerkes



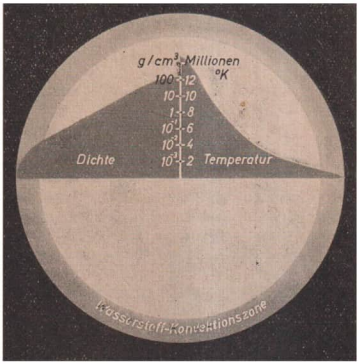
anzeigen, daß ein rasch bewegter Gegenstand schwerer ist als ein ruhender, weil eben auch der kinetischen Energie eine bestimmte Masse zukommt. Leider gibt es keine Waage, die auch nur eine Spur dieses Massenzuwachses registrieren könnte, da er unter gewöhnlichen Umständen viel zu klein ist. In umgekehrter Weise muß die Masse eines Körpers abnehmen, wenn er Energie abgibt. Dabei muß immerhin noch das Gesetz von der Erhaltung der Energie gewahrt bleiben. Der Körper kann ihm zufolge nicht mehr Wärme oder mechanische Energie abgeben, als er zuvor in sich aufgenommen hat.
Das Einsteinsche Gesetz greift aber noch tiefer. Es läßt die Möglichkeit zu, daß ein Körper noch wesentlich mehr an Energie liefern kann, als er ursprünglich enthielt, und zwar auf Kosten der Masse, aus der er sich selbst zusammensetzt. Die Rechnung ist sehr einfach. 1 Gramm Masse ergibt die Energie

$$W = m\,c^2 = 0{,}001 \text{ kg } (3 \cdot 10^8)^2 \text{m}^2/\text{s}^2 = 9 \cdot 10^{13} \text{ Nm (Ws)} = 25 \text{ Millionen Kilowattstunden.}$$

Dieses eine Gramm wäre dann restlos verschwunden und hätte sich in irgendeine der uns bekannten Energieformen aufgelöst. Aber diese Energie hat wiederum die Masse von einem Gramm, so daß genaugenommen gar nichts verschwunden ist. Die Materie hat lediglich ihr äußeres Gewand gewechselt. In Gestalt der uns vertrauten Masse ist sie kompakt, greif- und wägbar. In Form von Energie strahlt sie als Licht von den Sternen zur Erde, heizt sie unsere Wohnungen, bewegt Lasten und treibt Maschinen.
Das ist beileibe keine Phantasie oder Hypothese, sondern bereits zur handfesten Wirklichkeit geworden. Der Grundvorgang in dem bereits seit dem Jahre 1957 laufenden sowjetischen Atomkraftwerk und in vielen weiteren, die man inzwischen gebaut hat, besteht darin, daß hier laufend ein wenig Uranmetall in Energie umgewandelt wird und die entsprechende Masse, ohne ein Stäubchen Asche oder Rauch zu hinterlassen, aus der Welt verschwindet (Bild 90). Das sei jedoch nur am Rande vermerkt und nur deswegen, weil auch die Sterne und die Sonne ihre Energie nach dem Einsteinschen Gesetz fabrizieren. Das Rezept ist allerdings ein anderes und der Brennstoff kein kostbares Uran, sondern der billige Wasserstoff.

Ursprung der Sternenergie

Das auf engem Raum zusammengeballte Plasma der Sterne hat nur noch entfernte Ähnlichkeit mit der milde strahlenden Gasfüllung einer Leuchtstofflampe. Hier wird nicht an Füllgas gespart, sondern die Dichte des unter unvorstellbar hohem Druck komprimierten Gases überschreitet bei



91. Verlauf von Dichte und Temperatur im Innern der Sonne

der Sonne mit einem Mittelwert von 1,41 g/cm³ sogar die des flüssigen Wassers. Im inneren Kern dürfte sie sogar 100 g/cm³ überschreiten. Ebenso wie die Dichte steigt auch die Temperatur nach dem Mittelpunkt hin gewaltig an. Diese abnormen Werte von Dichte und Temperatur schaffen Zustände, die den Plasmaphysiker aufs höchste interessieren. Wie wir noch sehen werden, spielen sich dabei Prozesse ab, deren Verwirklichung im technischen Maßstab den Schlüssel zu unerschöpflichen Energiequellen liefern kann. Ihre Erschließung würde den Anbruch eines neuen Zeitalters bedeuten.

Je nach dem Typ des vorliegenden Sterns können die physikalischen Verhältnisse im Sterninnern recht unterschiedlich sein. Für die Sonne dürfte sich etwa der auf Bild 91 dargestellte Verlauf ergeben. Im Kern sind alle Atome infolge der hohen Temperatur vollständig ionisiert. Da die Hauptmasse der Sterne aus Wasserstoff besteht und bei der Ionisierung dieser Atome nur die nackten Kerne übrigbleiben, enthält das Sterninnere neben den abgespaltenen Elektronen hauptsächlich freie Protonen. Die in diesem Gebiet produzierte Energie wird durch Strahlung nach außen abgegeben. Nahe der Oberfläche aber, wo die Temperatur besonders stark abfällt, geschieht der Wärmetransport durch Konvektion, d. h. durch strömende Gasmassen. In der äußersten Schicht, deren Temperatur wir auf S. 97 zu 5785 °K berechneten, ist der Wasserstoff dagegen überwiegend neutral, also nur noch wenig ionisiert.

Die das Sonneninnere erfüllenden Protonen müssen sich wegen ihrer positiven elektrischen Ladung gegenseitig abstoßen. Aber ihre Geschwindigkeit ist wegen der hohen Temperatur so groß, daß sie die elektrischen Kräfte ohne weiteres überwinden und einander bis zur Berührung nahekommen. Bei diesem Zusammenstoß können sie miteinander reagieren und je zwei von ihnen einen Doppelkern bilden.

Während chemische Reaktionen immer nur auf Wechselwirkungen zwischen den äußeren Elektronenhüllen von Atomen beruhen, sind es in diesem Fall Atomkerne, die direkt aufeinander einwirken. Man nennt diese Vorgänge daher *thermonukleare Reaktionen*. Was dabei entsteht, sind auch keine chemischen Verbindungen, sondern es sind neue Kerne, neue chemische Elemente, die

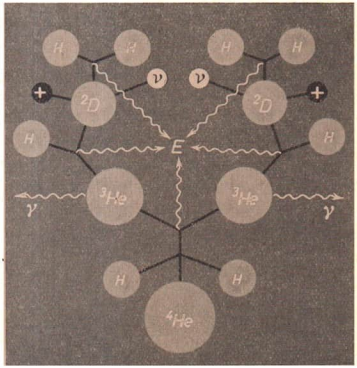
sich durch Synthese aus elementaren Bausteinen aufbauen. Die erste dieser Bildungsstufen, der aus zwei Protonen bestehende Doppelkern, ist jedoch ein äußerst instabiles Gebilde, das sofort nach seiner Entstehung wieder zerfällt. Damit wäre weder etwas gewonnen noch verloren. Doch die Geschichte geht weiter.
In seltenen Fällen geschieht es nämlich, daß beim Zusammentritt der Protonen ein positives Elektron, ein sogenanntes Positron, abgespalten wird, wodurch sich eines der beiden Protonen in ein Neutron umwandelt. Dieses kann sich mit seinem Partner nunmehr fest vereinigen, da die den Zerfall bewirkende elektrostatische Abstoßung jetzt nicht mehr vorhanden ist. Dieses aus einem Proton und einem Neutron bestehende Gebilde stellt einen neuen Atomkern dar, den des schweren Wasserstoffs. Man bezeichnet ihn mit dem besonderen Namen Deuterium und gibt ihm das Symbol D (Bild 92).
Bei einem weiteren Zusammenstoß dieses Kerns mit einem Proton bildet sich der Kern des Heliumisotops ${}^{3}_{2}\mathrm{He}$. Schließlich vereinigen sich zwei solcher Kerne zu einem ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$-Kern, wobei zwei Protonen wieder ausgestoßen werden. Das ergibt also eine Kette von 3 Gleichungen:

$$ {}^{1}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{2}_{1}\mathrm{D} + \mathrm{e}^{+} + \nu $$

$$ {}^{2}_{1}\mathrm{D} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{3}_{2}\mathrm{He} + \gamma $$

$$ {}^{3}_{2}\mathrm{He} + {}^{3}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + 2\,{}^{1}_{1}\mathrm{H} $$

Sieht man von den hier nicht weiter interessierenden Nebenprodukten (dem Positron e^{+}, dem Neutrino ν und dem Gammastrahlungsquant γ) ab, deren Masse zu unerheblich ist, um nennenswert ins Gewicht zu fallen, so verschmelzen demnach 4 Protonen zu einem Heliumkern. Man nennt diesen Prozeß auch *Kernfusion*.
Dieser Fusionsprozeß nun ist die gesuchte Energiequelle. Wieso das möglich ist, ergibt eine genauere Betrachtung der Atommassen, die man dem bekannten Periodensystem der Elemente



92. Fusionsprozeß

93. Die bei der Umwandlung von Wasserstoff in Helium freiwerdende Energie

entnehmen kann. 4 Wasserstoffatome geben zusammen die Masse $4 \cdot 1{,}008 = 4{,}032$ Masseeinheiten. Die Atommasse des Heliums beträgt demgegenüber aber nur 4,0026 Einheiten! Je gebildetes Heliumatom gehen daher $(4{,}032 - 4{,}0026) = 0{,}0294$ Masseeinheiten verloren. Es tritt ein *Massendefekt* auf, für dessen Gegenwart nach dem Einsteinschen Gesetz eine entsprechende Energiemenge erscheinen muß.

Bezieht man den Massendefekt auf ein einziges Kilogramm Wasserstoff, das in Helium umgewandelt wird, so entspricht er einer Energie von rund 180 Millionen Kilowattstunden,[41]) die mit der Temperaturstrahlung der Sonne abgegeben werden müssen (Bild 93).

Dieser Prozeß geht ununterbrochen und schon einige Milliarden Jahre vor sich, und man könnte daran zweifeln, ob der Wasserstoffvorrat der Sonne überhaupt groß genug ist, diesen enormen Verlust zu decken. Man kann das aber leicht überschlagen [42]) und findet dabei zunächst, daß bei der derzeitigen Ausstrahlung der Sonne in jeder Sekunde 586 Millionen Tonnen Wasserstoff in Helium umgesetzt werden müssen. Das ist eine gewaltige Menge, wenn man sie absolut betrachtet. Im Verhältnis zur Gesamtmasse der Sonne von $2 \cdot 10^{30}$ kg ist es aber doch recht wenig. Eine weitere Rechnung[43]) führt dann zu dem Ergebnis, daß der gegenwärtige Vorrat der Sonne an Heizmaterial ausreicht, um ihren Energiebedarf für noch weitere 60 Milliarden Jahre zu decken. Ebenso kann man ihr derzeitiges Alter auf Grund ihres heutigen Heliumgehaltes abschätzen. Man kommt dabei auf etwa 5 bis 10 Milliarden Jahre. Damit gehört die Sonne zu den ältesten und auch langlebigsten Objekten des Milchstraßensystems. Mögen die solchen Berechnungen zugrunde liegenden Zahlen und gedanklichen Voraussetzungen den wirklichen Verhältnissen auch nicht ganz genau entsprechen, so erklären sie doch in durchaus befriedigender Weise die stabile und

[41]) Für 1 kg beträgt der Massendefekt $\frac{0{,}0294}{4{,}032}$ kg $= 0{,}0073$ kg. Nach Gleichung (74) ist die Energie $W = 0{,}0073 \text{ kg} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 \text{m}^2/\text{s}^1 = 6{,}57 \cdot 10^{14}$ Ws $= 182{,}5 \cdot 10^6$ kWh.

[42]) Nach S. 86 gibt die Sonne die Leistung $3{,}85 \cdot 10^{26}$ W ab. Je kg Wasserstoff werden $6{,}57 \cdot 10^{14}$ Ws frei, womit je Sekunde $\frac{3{,}85 \cdot 10^{26}}{6{,}57 \cdot 10^{14}}$ kg $= 586 \cdot 10^9$ kg Wasserstoff verbraucht werden.

[43]) Nimmt man die kosmische Häufigkeit auch für das Sonneninnere gültig an (S. 108), so kommen auf 100 H-Atome 18 He-Atome, bzw. unter Berücksichtigung der Atomgewichte auf 172 Teile Gesamtmasse 100 Teile Wasserstoff. Damit beträgt der Wasserstoffvorrat der Sonne $\frac{2 \cdot 10^{30} \cdot 100}{172}$ kg $= 1{,}11 \cdot 10^{30}$ kg. Bei einem sekundlichen Verbrauch von $5{,}86 \cdot 10^{11}$ kg ist die Lebensdauer $\frac{1{,}11 \cdot 10^{30}}{5{,}86 \cdot 10^{11}}$ s $= 1{,}89 \cdot 10^{18}$ Sekunden $=$ 60 Milliarden Jahre.

lang anhaltende Ausstrahlung der Sterne. Eine Erschöpfung des Energiehaushaltes unserer Mutter Sonne ist in absehbarer Zeit jedenfalls nicht zu befürchten.
Es ist zu vermuten, daß der geschilderte Proton-Proton-Prozeß nur bei Temperaturen von 10 bis 15 Millionen Grad der ergiebigere ist. Bei etwa 20 Millionen Grad ist ein etwas komplizierterer Kreislauf wahrscheinlicher, der sogenannte Bethe-Weizsäcker-Zyklus. Wer ein wenig mit der in der Kernphysik üblichen Symbolik vertraut ist, wird die folgenden 6 Zeilen ohne weitere Erläuterungen verstehen:

$$^{12}_{6}C + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{13}_{7}N + \gamma \qquad ^{14}_{7}N + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{15}_{8}O + \gamma$$

$$^{13}_{7}N \rightarrow ^{13}_{6}C + e^{+} + \nu \qquad ^{15}_{8}O \rightarrow ^{15}_{7}N + e^{+} + \nu$$

$$^{13}_{6}C + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{14}_{7}N + \gamma \qquad ^{15}_{7}N + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{12}_{6}C + ^{4}_{2}He$$

Hier ist also die Anwesenheit von Kohlenstoffatomen notwendig, die schrittweise mit Wasserstoffkernen reagieren. Am Schluß der Reaktionskette erscheint wieder Kohlenstoff. Dieser wird demnach nicht verbraucht, sondern spielt nur die Rolle eines Vermittlers. Summa summarum aber wird auch hier Wasserstoff in Helium verwandelt, womit der Energiegewinn bis auf eine unerhebliche Differenz mit dem Proton-Proton-Prozeß übereinstimmt. Wahrscheinlich laufen auf der Sonne beide Vorgänge nebeneinander her oder vielleicht noch andere, im Prinzip aber ähnliche Reaktionen.
Das klassische Gesetz von der Erhaltung der Energie scheint daher im kosmischen Maßstab nicht mehr zuzutreffen. Ihre Gesamtmenge, so sieht es wenigstens aus, nimmt auf Kosten der stofflichen Erscheinungsform der Materie immer mehr zu. Der umgekehrte Prozeß ist zwar auch möglich und bei gewissen kernphysikalischen Vorgängen durchaus zu beobachten, es liegen jedoch keinerlei Anhaltspunkte darüber vor, in welcher Richtung sich das allgemeine Masse-Energie-Verhältnis in der Welt entwickelt. Sich hierüber in Spekulationen zu ergehen hat aber wenig Aussicht auf brauchbare Aussagen.

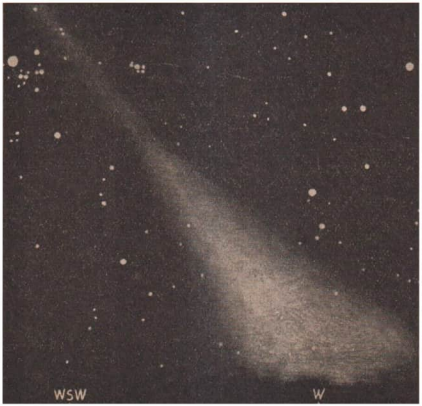
Wolken im Weltenraum

Der Anblick des gestirnten Himmels mit seinen zahllosen funkelnden Lichtpünktchen macht den Eindruck, als sei die gesamte in der Welt vorhandene Materie in mehr oder weniger großen Körpern konzentriert und der übrige Raum von glasklarer Leere. Gewiß sind die vielen Sterne, Sternsysteme, Planeten und anderen Himmelskörper in jeder Hinsicht die auffallendsten und interessantesten Objekte, sie sind aber bei weitem nicht alles, was der Kosmos zu bieten hat. Ein großer Teil der gesamten Materie dieser Welt ist in ziemlich unauffälliger Weise aufs feinste pulverisiert und atomisiert. In Form von Staub und Gas ist sie im gesamten Raum zerstreut. Allein im Milchstraßensystem macht dieser Anteil einige Milliarden Sonnenmassen aus.
Der Raum zwischen den Sternen ist deshalb gar nicht so leer, wie er aussieht. Das absolute Vakuum, ein so gern gebrauchter Begriff in der Physik, erweist sich auch hier als unwirkliche Ab-

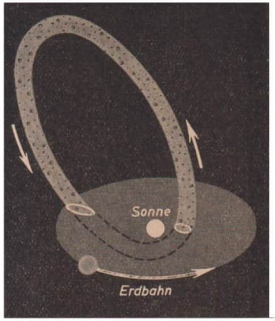
straktion. Schon der Ingenieur der Vakuumtechnik weiß ein Lied davon zu singen, was es heißt, etwa in einer Fernsehröhre ein einigermaßen brauchbares Vakuum herzustellen. Man muß zufrieden sein, wenn je cm^3 nicht mehr als ein paar Millionen Gasmoleküle herumwimmeln. An diesen Verhältnissen gemessen ist der Weltenraum freilich ein sehr einsames Gebiet.

1. Das interplanetare Medium

Innerhalb des Sonnensystems spricht man vom interplanetaren Medium, das vorwiegend aus Staubteilchen besteht, deren Durchmesser etwa 10^{-4} mm beträgt. Die anteilige Menge an Gas hatte man bisher stark überschätzt. In der Gegend der Erdbahn dürfte 1 cm^3 nicht mehr als etwa 500 Gasatome und Elektronen enthalten. Die Staubteilchen verursachen jenen schwachen Lichtschein, der besonders in den Tropen als *Zodiakallicht* vor Sonnenaufgang oder nach Sonnenuntergang am Himmel zu sehen ist (Bild 94). In einem ununterbrochenen Regen fällt dieser Staub auch auf die Erde herab. Die tägliche Masse veranschlagt man auf rund 100 Tonnen.
Größere Teilchen von Millimeter- bis Zentimetergröße sieht man in etwa 100 km Höhe als Sternschnuppen in der Erdatmosphäre aufglühen und verdampfen. Sowohl diese als auch die gelegentlich größeren in die Atmosphäre eindringenden Körper bezeichnet man als *Meteorite*. Mit funktechnischen Methoden kann ihre Geschwindigkeit und Bahn auch bei Tage verfolgt werden. Hiernach läßt sich leicht entscheiden, woher sie stammen. Wir erinnern uns ja noch (S. 58), daß die Fluchtgeschwindigkeit eines von der Erde aus dem Sonnensystem entweichenden Körpers 42 km/s beträgt. Fliegt er langsamer, so ergibt sich eine Ellipsenbahn um die Sonne. Stammt ein Meteorit aus dem Sonnensystem, so darf demnach seine Geschwindigkeit bei Ankunft auf der Erde diesen Betrag nicht überschreiten. Da sich die Erde aber selbst mit 30 km/s um die Sonne bewegt, so ergibt sich eine Höchstgeschwindigkeit von $(30 + 42)$ km/s $= 72$ km/s. Nur bei einem



94. Zodiakallicht



95. Lage eines Meteorstromes zur Erdbahn. Fallen Stromellipse und Erdbahn in eine Ebene, so ergeben sich jährlich zwei Begegnungen

verschwindend kleinen Prozentsatz aller Meteorite wurde eine etwas größere Geschwindigkeit beobachtet. Es ist demnach sicher, daß so gut wie alle Meteorite Bestandteile des Sonnensystems sind. Außer Zweifel steht, daß sie Trümmer von Planetoiden und Kometen darstellen; denn im Jahre 1846 konnte man beobachten, wie der Komet Biela (Flugbahn s. Bild 2) plötzlich in 2 Teile geborsten war und daraufhin ganz verschwand. An seine Stelle trat dann ein starker Meteorstrom, dessen Bahn mit der des Kometen übereinstimmte. Derartige Meteorströme (Bild 95) laufen auf elliptischen Bahnen um die Sonne, und jedesmal, wenn die Erde auf ihrem jährlichen Kurs einen solchen Schwarm durchschneidet, häufen sich auffallend die Sternschnuppen. Besonders bekannt ist der in der ersten Augusthälfte auftretende Strom der „Perseiden". Von den Resten des Kometen Biela, den Bieliden (oder auch Andromediden genannt), ist nicht viel übriggeblieben. Während die von ihm erzeugten Sternschnuppenfälle im vorigen Jahrhundert noch sehr stark waren, sind sie heute nur noch sehr spärlich.

2. Das interstellare Medium

Das zwischen den Sternen des Milchstraßensystems verteilte interstellare Medium besteht dagegen der Masse nach nur zu etwa 1 % aus Staub und im übrigen aus Gas. Ganz überwiegend handelt es sich wiederum um Wasserstoff neben geringen Mengen an Helium und anderen leichten Elementen. Im Durchschnitt enthält 1 cm^3 zwar nur 0,6 Atome, doch findet sich das interstellare Medium auch in riesigen Wolken mit etwa 10 Atomen im Kubikzentimeter und mitunter noch stärker verdichtet.

Man könnte sich fragen, ob es überhaupt lohnt, sich mit diesem extrem verdünnten Gas zu beschäftigen und man nicht lieber doch von einem praktisch vollkommenen Vakuum reden sollte. Bedenkt man aber die ungeheuren Räume, die es ausfüllt, so handelt es sich immerhin um gewaltige Massen. Besonders auffällig sind die vorwiegend aus Staub bestehenden Dunkelwolken (Bild 96). Einige von ihnen sehen wir mitten in der Milchstraße, wo sich das sanft

96. Leuchtende und Dunkelwolken mit Globulen (Teil des galaktischen Nebels im Sternbild Eichhorn)

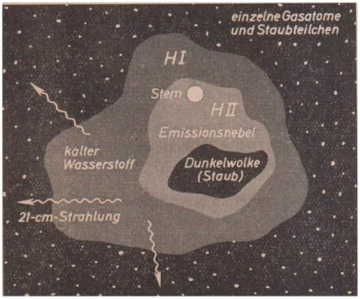
schimmernde Band in einzelne Äste aufgabelt und es beinahe so aussieht, als ob sie hier große Löcher habe. In Wahrheit sind es riesige undurchsichtige Vorhänge, die dem Fernrohr die Sicht gerade nach der interessantesten Stelle des Himmels versperren, nach dem Zentrum des Milchstraßensystems.

Hiervon abgesehen ist die Hauptmasse des interstellaren Wasserstoffes dagegen optisch fast vollkommen durchsichtig. An einzelnen Stellen ballt er sich ebenfalls zu Wolken zusammen. In der Nähe von Sternen verraten sich manche solcher Wolken durch ein schwaches Eigenleuchten und werden daher als Emissionsnebel bezeichnet. Einen dieser Nebel, den großen Orionnebel, kann man im Winter leicht mit dem bloßen Auge erkennen (Bild 78). Er bildet eine diffus leuchtende Wolke im unterhalb des Gürtels liegenden „Schwertgehänge". So unscheinbar sie dem Auge erscheint, ist sie doch von gewaltiger Größe. Ihr Durchmesser beträgt etwa 15 Lichtjahre; die Masse dürfte rund 10 Sonnenmassen betragen, obwohl ein Kubikzentimeter selbst in den dichtesten Partien nicht mehr als 10000 Atome enthält.

In diesen sogenannten H II-Gebieten der interstellaren Materie wird der Wasserstoff durch das starke, von den Sternen kommende ultraviolette Licht ionisiert. Die dabei abgespaltenen Elektronen werden dann von den Ionen wieder eingefangen. Dieser Rekombinationsvorgang verläuft so, wie es nach dem auf S. 106 beschriebenen Mechanismus des Bohrschen Atommodells leicht zu verstehen ist: Das jeweilige Elektron fällt in einzelnen, größeren oder kleineren Schritten wieder in den Grundzustand zurück, wobei Lichtquanten entsprechender Energie emittiert werden.

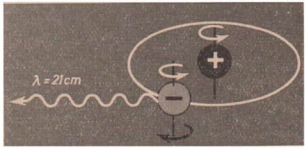
Die 21-cm-Welle

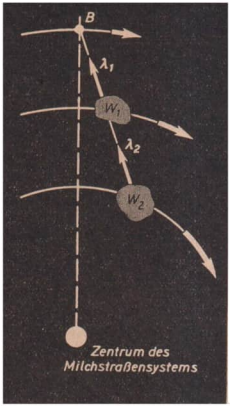
In der weiteren Umgebung der Emissionsnebel sind die Wasserstoffatome nicht mehr ionisiert. Diese H I-Gebiete bestehen daher aus neutralem Gas und machen 90 % der interstellaren Wolken aus (Bild 97). Sie können deshalb auch keine der gewöhnlichen Strahlungen aussenden. Wie man aber erst seit einigen Jahren weiß, hat der kalte interstellare Wasserstoff die seltsame Eigenschaft, eine Strahlung der Wellenlänge 21,105 cm zu erzeugen. Im irdischen Laboratorium ist diese merkwürdige Erscheinung nicht zu beobachten. Sie tritt nur bei sehr großen und kalten Gasmassen bei gleichzeitig extremster Verdünnung auf, wie sie eben nur im Weltenraum zu finden sind.
Unter gewöhnlichen Bedingungen kann man nur feststellen, daß das Elektron des Wasserstoffatoms im Grundzustand auf der kernnächsten Bahn umläuft und zugleich um seine eigene Achse rotiert. Auch der Atomkern hat eine Eigenrotation. Dabei gibt es die beiden Möglichkeiten, daß der *Spin* des Elektrons im gleichen oder entgegengesetzten Sinn zu dem des Kerns orientiert ist (Bild 98). Gleichsinniger Rotation entspricht eine etwas höhere Energie des Systems. Beim Übergang in den entgegengesetzten Zustand wird die Energiedifferenz als Strahlungsquant abgegeben. Aber die Wahrscheinlichkeit, daß der Spin des Elektrons umklappt, ist außerordentlich gering. Die Verweilzeit des Elektrons auf den höheren Bahnen des Bohrschen Modells, die der Emission eines gewöhnlichen Lichtquants vorausgeht, beträgt etwa 10^{-8} s. Ehe sich das Elektron jedoch besinnt, seine Spinrichtung zu wechseln, vergehen im Mittel 10 Millionen Jahre! Nur der ungeheuren Verdünnung und Ausdehnung dieser kalten Wasserstoffwolken ist es zu verdanken, daß die 21-cm-Strahlung überhaupt gemessen werden kann.
Um diese 21-cm-Welle zu empfangen, hat man mächtige, bis zu 180 m große Antennengebilde gebaut und tastet damit systematisch den Himmel nach den Wasserstoffwolken ab.
Hierbei geht es aber nicht nur um die Bestimmung der Lage, Ausdehnung und Dichte der Wolken, sondern vor allem auch darum, ihre Bewegung zu erkennen. Nun ist aus anderen Beobachtungs-



97. Die Hauptformen der interstellaren Materie

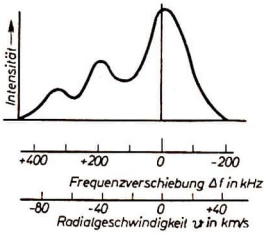
98. Entstehung der 21-cm-Strahlung des Wasserstoffs





99. Zur Bestimmung der Entfernung von Wasserstoffwolken

100. Linienprofil dreier hintereinander liegender Wasserstoffwolken



methoden bereits bekannt, daß das Milchstraßensystem nicht wie ein starres Rad rotiert, sondern die Bahngeschwindigkeit v mit zunehmender Entfernung vom Zentrum Z abnimmt. Das ist übrigens nach dem 3. Keplerschen Gesetz auch im Planetensystem der Fall.
Auf Bild 99 sind zwei solcher Wolken W_1 und W_2 schematisch angedeutet, die vom Beobachtungspunkt B verschieden weit entfernt sind. Da die Wolke W_2 schneller läuft als Wolke W_1, wird sie sich in der gezeichneten Stellung vom Punkt B schneller entfernen als W_1. Um diese unterschiedliche Radialgeschwindigkeit längs des Strahls $B\ W_1\ W_2$ zu messen, bedient man sich des uns bereits bekannten Dopplereffektes. Ihm zufolge muß die von W_2 empfangene Wellenlänge λ_2 größer als die von W_1 herrührende λ_1 und diese wiederum größer als die Originalwelle λ sein. Wie sich leicht berechnen läßt,[44]) macht das bei einer Radialgeschwindigkeit von 1 km/s 4,74 kHz aus. Da die Beziehung zwischen Bahngeschwindigkeit und Entfernung vom Milchstraßenzentrum bekannt ist, lassen sich aus den gemessenen Frequenzverschiebungen die Entfernungen der Gaswolken berechnen. Bild 100 zeigt ein typisches Linienprofil, das bei fester Antenneneinstellung in einer bestimmten Richtung aufgenommen wurde. Da zu jedem Maximum des Δf-Wertes eine bestimmte Geschwindigkeit gehört, zeigt das Diagramm drei Wasserstoffwolken in verschiedenen Entfernungen.

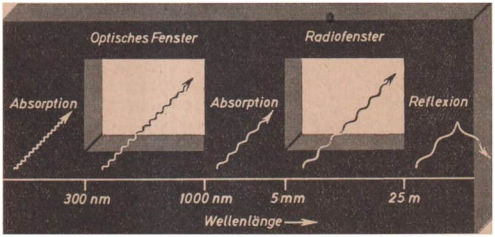
[44]) Da die relative Änderung der Wellenlänge $\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ nahezu gleich der relativen Frequenzänderung ist, kann man für Gleichung (61) auch schreiben $\frac{\Delta f}{f} = \frac{v}{c}$. Setzt man nach (60) $f = \frac{c}{\lambda}$, so erhält man $\Delta f = \frac{v}{\lambda}$; mit $v = 1000$ m/s und $\lambda = 0{,}211$ m erhält man $\Delta f = \frac{1000 \text{ m/s}}{0{,}211 \text{ m}} = 4{,}74$ kHz.

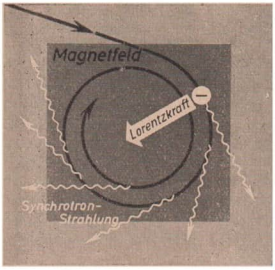
Auf diese Weise konnte man die großräumige Verteilung der gesamten interstellaren Materie im Milchstraßensystem frei von optischen Täuschungen und ohne Sichtbehinderung erkunden.
An sich geht es dabei gar nicht um den Wasserstoff selbst. Man weiß vielmehr, daß die H-Wolken in enger Beziehung zur Häufigkeit der Sterne stehen. Um es auf eine Faustregel zu bringen: Wo viel Wasserstoff ist, da sind auch viele Sterne. Und wo diese durch die erwähnten Dunkelwolken der Beobachtung entzogen sind, springt die 21-cm-Welle hilfreich ein und läßt die optisch nicht wahrnehmbaren Objekte indirekt erkennen. Auf diese Weise konnte man die großräumige Verteilung der gesamten interstellaren Materie im Milchstraßensystem so genau erkunden, daß sie kartographisch festgehalten werden konnte. Was man früher schon vermutet hatte, ist jetzt mit Sicherheit erwiesen. Unser Milchstraßensystem ist ein Spiralnebel, ähnlich einem kreisenden Feuerrad, das die einzelnen Arme bei der Rotation nachschleppt.

Die Radiofrequenzstrahlung

Im griechischen Altertum glaubte man, daß die Weltkörper bei ihrem Umlauf um das „Zentralfeuer", womit nicht etwa die Sonne gemeint war, eine in vollkommener Harmonie ertönende Sphärenmusik erzeugten. Die einzelnen Töne sollten gemäß den Abständen der Himmelskörper genau denen der dorischen Tonleiter entsprechen, und allein PYTHAGORAS soll es vergönnt gewesen sein, sie zu hören. Man kann sich nur noch schwer in diese aus Mathematik, einfachsten astronomischen und mystischen Vorstellungen gemischte Denkweise hineinversetzen. Selbst ein JOHANNES KEPLER war ihr noch verfallen und suchte nach geheimnisvollen Beziehungen zwischen Harmonielehre und Planetenbewegung. Da es heute um weit interessantere Fragen geht, brauchen wir uns in dieser Richtung nicht weiter zu bemühen. Die Naturgesetze selbst bieten in ihrem Aufbau und ihren gegenseitigen Zusammenhängen so unerschöpflich viel an innerer Harmonie und ästhetischem Reiz, daß es einfach überflüssig ist, solche Beziehungen noch künstlich zu konstruieren.

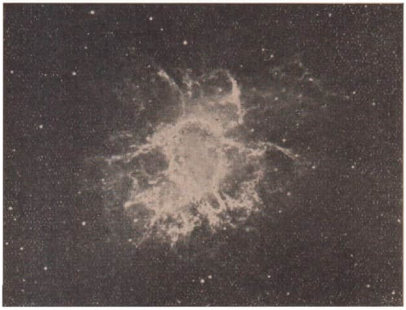
101. Durchlässigkeit der Erdatmosphäre für die verschiedenen Wellenbereiche





102. Entstehung der Synchrotron-Strahlung (Die Linien des Magnetfeldes verlaufen senkrecht zur Zeichenebene)

103. Krebsnebel



Zufälligerweise gibt es so eine Art Sphärenmusik wirklich, wenn sie auch nicht gerade so lieblich klingt, wie es sich die Pythagoreer vorgestellt hatten. Ein amerikanischer Radioamateur hörte im Jahre 1932 ihr Rauschen zum ersten Mal, als er nach Störungen im Rundfunkempfang suchte und erkannte, daß das Rauschen aus der Richtung der Milchstraße kam. Man nennt sie allgemein *Radiofrequenzstrahlung*. Es ist ein kontinuierliches Gemisch hochfrequenter elektromagnetischer Wellen, das aus den verschiedensten Regionen des Kosmos zur Erde gelangt. Man empfängt sie im Bereich von wenigen Millimetern bis zu 25 m Wellenlänge, für den die Erdatmosphäre durchlässig ist. Noch längere Wellen werden von der elektrisch leitenden Ionosphäre reflektiert und können die Erdoberfläche nicht erreichen. Außer diesem als „Radiofenster" bezeichneten Durchlässigkeitsbereich existiert noch das für das sichtbare Licht bestehende „optische Fenster" (Bild 101). Die noch kürzeren Wellen des Ultraviolett werden vom Sauerstoff- und Ozongehalt der Luft absorbiert. Nur dem Umstand, daß unsere Atmosphäre diese zwei Fenster hat, ist es zu verdanken, wenn wir uns so leicht über die Verhältnisse im Kosmos orientieren können. Neben der uns schon bekannten 21-cm-Welle ist die Radiofrequenzstrahlung heute ein wichtiges Hilfsmittel, die optischen Fernrohrbeobachtungen in wertvollster Weise zu ergänzen. So entstand ein ganz neuer Zweig der Himmelskunde, die *Radioastronomie*.

Die Radiofrequenzstrahlung kann auf verschiedene Weise entstehen. Wenn man die Strahlungskurven des schwarzen Körpers (Bild 77) noch einmal besieht, könnte man denken, daß die Temperaturstrahlung nur aus sehr kurzen Wellenlängen besteht. Das liegt aber nur am Maßstab des

104. Radioteleskop des Heinrich-Hertz-Instituts in Berlin-Adlershof

Diagramms. Nach rechts hin setzen sich diese Kurven ohne Unterbrechung in die Gebiete großer Wellenlängen unbegrenzt fort. Demnach sendet jeder Körper, sofern er überhaupt eine Temperatur besitzt, eine *thermische Radiostrahlung* aus, deren Intensität bei niederen Temperaturen verschwindend gering wird. Diese Strahlungsart kann beispielsweise von der Sonne und auch vom Mond und von den Planeten empfangen werden.

Der wichtigere Teil der Radiofrequenzstrahlung ist jedoch nichtthermischer Art. Grundsätzlich erzeugt jede periodisch schwingende elektrische Ladung auch eine elektromagnetische Strahlung. In den großen Plasmafeldern des interstellaren Mediums, wo die elektrischen Ladungen der ionisierten Atome räumlich voneinander getrennt sind, kommt es vermutlich zu *Plasmaschwingungen* und damit zu einer kontinuierlichen Strahlung.

Ein zweiter Effekt ist sicher noch einleuchtender. Gerät beispielsweise ein schnelles Elektron in ein homogenes Magnetfeld, dessen Feldlinien rechtwinklig zu seiner Bewegung verlaufen, so wird seine ursprünglich gerade Bahn zu einem Kreis gekrümmt (Bild 102). Dies ist die Folge der „Lorentzkraft", die es in jedem Augenblick seiner Bewegung rechtwinklig von seiner Bahn ablenkt. Diese Kreisbewegung ist aber nichts anderes als eine periodische Schwingung. Man braucht sie nur von der Seite her zu betrachten und sieht, daß das kreisende Elektron längs des Kreisdurchmessers hin und her schwingt. Es sendet daher eine elektromagnetische Welle aus, deren Frequenz der Umlaufsfrequenz entspricht. Das Elektron verliert dabei an Bewegungsenergie, und der Kreisradius verengt sich entsprechend.

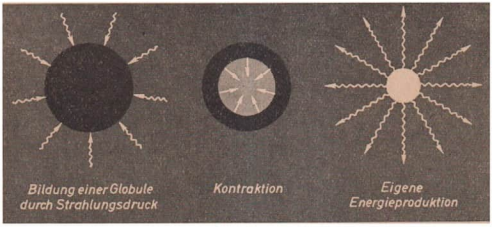
Dieses Bewegungsprinzip wird nun in bestimmten Typen von Geräten benutzt, mit denen man Elektronen auf große Geschwindigkeiten beschleunigt. Auch hier stößt man auf das Problem, den mit der Ausstrahlung verbundenen Energieverlust wieder auszugleichen und gelangte auf diese Weise zur Konstruktion des in der Kerntechnik benutzten *Elektronensynchrotrons*. Da hier die Elektronen von ihrem geringen Anfangswert auf sehr große Endgeschwindigkeiten beschleunigt werden, entsteht ein breites kontinuierliches Spektrum elektromagnetischer Wellen. Bei sehr großen Endenergien sieht man, wie der ringförmige, im Magnetfeld kreisende Elektronenstrom je nach seiner Geschwindigkeit in verschiedenen Farben leuchtet.
Im Prinzip der gleiche Vorgang wird sich überall dort abspielen, wo sich ausgedehnte Magnetfelder und schnell bewegte elektrische Teilchen vorfinden, also in den meisten Plasmafeldern des Weltenraums. Wenn auch die Stärke des interstellaren Magnetfeldes im Durchschnitt nur etwa 1/10000 von dem der Erde beträgt, so muß man doch an seine großen Abmessungen denken. Dann gibt es aber wiederum Sterne mit außerordentlich starken Feldern, so daß die Möglichkeit der Entstehung von *Synchrotronstrahlung* allenthalben gegeben ist.
Gegenüber der optischen haben radioastronomische Beobachtungen den Vorteil, daß sie ebenso wie die 21-cm-Welle von den Dunkelwolken nicht behindert werden. Die auch optisch leuchtenden H II-Gebiete senden vorzugsweise thermische Strahlung im Dezimeterbereich aus. Im Wellenbereich von über 10 m erscheinen diese Emissionsnebel dagegen „dunkel" auf dem helleren Untergrund der aus allen Richtungen kommenden Synchrotronstrahlung. Besonders auffallend sind dann noch viele sich am Himmel abzeichnende diskrete *Radioquellen* von großer Intensität. Eine der bekanntesten ist der „Krebsnebel" (Bild 103), eine Gaswolke von krebsähnlicher Gestalt, auf die wir S. 132 noch einmal zurückkommen werden.
Um solche Radioquellen genauer zu lokalisieren, peilt man sie mit riesigen, hohlspiegelartigen Antennengebilden, den *Radioteleskopen*, an (Bild 104). Die Genauigkeit, mit der das geschehen kann, ist eine Frage des Auflösungsvermögens, die uns bei den optischen Instrumenten schon beschäftigte. Da es sich um das gleiche Grundproblem handelt, gilt wiederum die Gleichung (56) $\sin\alpha = \frac{\lambda}{d}$. Hieraus läßt sich errechnen, daß man bei Benutzung der Wellenlänge 1 m einen Reflektor von 70 m Durchmesser benötigt, wenn eine Radioquelle mit der Genauigkeit von 1° erfaßt werden soll.[45])
Dies ist der Grund für die so großen Abmessungen derartiger Geräte. Andere Anordnungen, die mit zwei getrennten Empfangssystemen arbeiten und auf dem Interferenzprinzip beruhen, erreichen zwar eine Genauigkeit von wenigen Bogenminuten, haben aber viel geringere Empfangsleistungen. Auf jeden Fall hat aber sich die Astronomie mit diesen Radioaugen neue Sinnesorgane geschaffen, mit denen die Struktur und die Beschaffenheit der Welt immer klarer durchschaut werden wird.

[45]) Da $\sin 1° = 0{,}01\,745$ ist und bei kreisförmiger Öffnung zu λ noch der Faktor 1,22 tritt, erhält man für $\lambda = 1$ m

$$d = \frac{1{,}22 \cdot \lambda}{\sin\alpha} = \frac{1{,}22 \cdot 1\,\mathrm{m}}{0{,}01745} = 70\,\mathrm{m}.$$

Sternentstehung

In den Wasserstoffwolken findet sich besonders ein bestimmter Typ von sehr heißen Sternen eingebettet, von denen man mit Sicherheit annehmen darf, daß sie sich durch Kondensation aus diesem interstellaren Gas gebildet haben und noch fortlaufend neu entstehen. In diesen jugendlichen Objekten bieten sich daher noch am ehesten Anhaltspunkte, eine Antwort auf die schwierige Frage zu finden: Wie entstehen Sterne überhaupt?
Für die Berechnung der Lebensdauer der Sonne (S. 114) waren zwei Hauptfaktoren entscheidend: die Ausstrahlung, d. h. ihre Leuchtkraft, und die Masse. Dieses Verhältnis zwischen Energieabgabe und Energievorrat ist jedoch nicht bei allen Sternen so günstig. Besonders in den Spiralarmen der Milchstraße gibt es extrem heiße, blau strahlende Sterne, deren Leuchtkraft zehn- bis hunderttausendmal größer sein kann als die der Sonne. Im Vergleich zu ihr gehen sie mit ihrem Energievorrat so verschwenderisch um, daß ihre strahlende Herrlichkeit nicht von langer Dauer sein kann. Ihr Wasserstoffvorrat muß bereits nach wenigen Millionen Jahren erschöpft sein. Da aber solche Sterne heute noch beobachtet werden, können sie erst vor sehr kurzer Zeit entstanden sein. Es sprechen sogar gute Gründe dafür, daß solche Sterne vor unseren Augen heute noch geboren werden.
Es fällt zunächst auf, daß diese Sterne meist inmitten oder in unmittelbarer Nachbarschaft dichter Nebelmassen zu finden sind. Häufig bilden sie geschlossene Gruppen, sogenannte *Assoziationen*. Ein besonders interessantes Bild bietet der schon erwähnte Orionnebel (S. 118). Hier und auch in anderen ähnlichen Fällen läßt es sich nachweisen, daß die darin eingehüllten Sterne in radialer Richtung auseinanderstreben. Es liegt daher sehr nahe anzunehmen, daß diese zudem noch sehr jungen Sterne sich aus interstellarer Materie gebildet haben.
Wie das im einzelnen vor sich geht, darauf scheinen dunkle, kugelförmige Gebilde hinzuweisen, die sich gegen den helleren Hintergrund des Nebels abheben. Diese *Globulen* bestehen aus verdichteten, noch kalten Staub- und Gasmassen, deren Dichte viele tausendmal größer als bei gewöhnlichen Dunkelwolken ist. Wahrscheinlich entstehen sie durch den allgemeinen im Milchstraßensystem herrschenden Strahlungsdruck (S. 102), der wohl in der Lage sein kann, nichtstrahlende Staubwolken konzentrisch zusammenzupressen. Die dann einsetzenden, zuerst schwachen und dann immer stärker werdenden Gravitationskräfte bewirken eine zunehmende *Kontraktion* dieser Globulen, wobei die freiwerdende Gravitationsenergie als Wärme in Erscheinung tritt (Bild 105). Temperatur und Dichte steigen an und erreichen schließlich diejenigen hohen Werte, die für das Einsetzen von Kernfusionsprozessen (S. 113) erforderlich sind. Wahrscheinlich bilden sich anfänglich größere Komplexe, die dann in einzelne Sterne zerfallen.



105. Die Anfangsphasen der Sternentstehung

Diese Kontraktion und damit verbundene Aufheizung wird übrigens um so schneller vor sich gehen, je größer die Masse des sich bildenden Sterns ist. Auch die folgenden Prozesse verlaufen bei sehr massereichen Sternen um ein vielfaches schneller, womit es sich erklärt, daß die besagten Sterne den ganzen Entwicklungsgang im Zeitraffertempo durcheilen.
Die anschließende Umwandlung von Wasserstoff in Helium, die man kurz als das *Wasserstoffbrennen* bezeichnet, hält solange an, bis der gesamte Wasserstoff verbraucht ist. In dem Maße, wie Temperatur und Druck nachzulassen beginnen, gewinnt die Gravitation erneut die Oberhand und führt zu einem weiteren Zusammenbruch des Sterninnern. Temperatur und Druck steigen auf noch höhere Werte an als zuvor, möglicherweise auf 100 Millionen Grad. Unter diesen neuen Bedingungen ist dann eine zweite Phase der Energieproduktion denkbar. Sie besteht aus der weiteren Fusion von Heliumkernen zu Beryllium, Kohlenstoff und noch schwereren Elementen bis zum Eisen und Nickel. Da die Kerne von Nickel und Eisen sich vom kernphysikalischen Standpunkt aus im Zustand geringster Energie befinden, ist die Reihe der Fusionsprozesse damit abgeschlossen.
Die letzten Phasen der Sternentwicklung lassen sich nur schwer rekonstruieren. Hier beginnt das Reich der Spekulationen, die meist von dem Wunsch getragen werden, die Vielfalt der einzelnen Sterntypen als Glieder einer oder mehrerer geschlossener Entwicklungsreihen zu deuten. Ob das überhaupt sinnvoll ist, muß sich erst noch herausstellen. Als Endstadium der Sternentwicklung betrachtet man jedenfalls den Zustand der „weißen Zwerge" (S. 98). Er ist erreicht, wenn alle Reserven an Kernenergie erschöpft sind und die Temperatur nur noch durch Kontraktion aufrechterhalten werden kann. Damit wäre auch die abnorm hohe Dichte dieser Sterne, die bis zu Tonnen/cm^3 gehen kann, erklärt.
So interessant es auch ist, den verschiedenen Hypothesen über den Lebensgang der Sterne zu folgen, so muß man doch recht vorsichtig sein. Jederzeit muß man daran denken, daß neue Beobachtungen und Erkenntnisse völlig andere Gesichtspunkte ergeben können und manche heute für richtig gehaltene Anschauung sich als Irrweg erweisen kann.

Die kosmische Strahlung

Die Zusammensetzung der kosmischen Strahlung

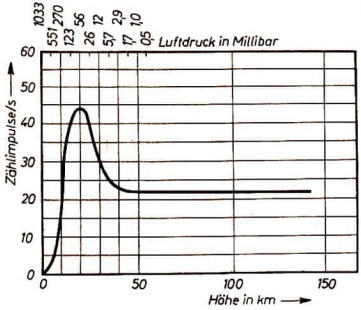
Licht-, Wärme- und Radiowellen sind bei weitem nicht die einzigen Strahlungen, die in unseren Lebensraum eindringen. Ihnen gemeinsam ist, daß es allesamt elektromagnetische Wellen sind, deren jeweiliger Ursprungsort mit optischen Mitteln und gerichteten Strahlungsempfängern genauestens angepeilt werden kann. Man weiß genau, wo und wie sie entstehen. Aber da ist noch eine zweite Gruppe von Strahlen, die nicht aus Wellen, sondern aus kleinen Teilchen besteht, die sich von den Lichtquanten eindeutig unterscheiden. Von den Lichtquanten, den Photonen, weiß man, daß ihre Ruhmasse gleich Null ist. Sie existieren also nur und insofern, als sie mit Lichtgeschwindigkeit dahinfliegen. Hiervon unterscheiden sich grundsätzlich die Korpuskularstrahlen, deren Teilchen auch im Ruhezustand eine bestimmte Masse haben. Dafür können sie wiederum nicht das, was zur ersten Natur der Lichtquanten gehört: sie können niemals die Lichtgeschwindigkeit erreichen. Diese Symmetrie in den Eigenschaften der beiden Strahlenarten ist so schön, daß man sie sich besonders leicht merken kann.

Diese zweite Gruppe von Strahlungen besteht also aus Teilchen von bestimmter Masse und sehr hoher Geschwindigkeit. Daher sind sie mit gewaltiger kinetischer Energie geladen, durchbohren unbarmherzig unseren wehrlosen Leib, durchdringen Dächer und Mauern, als ob diese aus Luft bestünden. Noch am Grund tiefer Seen kann man sie nachweisen.

Als diese Strahlung im Jahre 1911 entdeckt wurde, ahnte man nicht, welche Fülle von physikalischen Problemen sich daraus noch ergeben würde. Nur eins stand fest: die Intensität dieser Strahlung, die sich vor allem in einer zunehmenden elektrischen Leitfähigkeit der Luft bemerkbar machte, nimmt mit wachsendem Abstand vom Erdboden immer mehr zu (Bild 106). Bald stellte sich auch heraus, daß sie ihren Ursprung irgendwo außerhalb der Erde haben müsse, weshalb sie auch *Höhen- oder kosmische Strahlung* genannt wurde.

Die Schwierigkeit, die wahre Natur der kosmischen Strahlung zu ergründen, bestand in der komplizierten Zusammensetzung und vielfältigen Wechselwirkung mit den Atomkernen der Lufthülle der Erde. Man muß also unterscheiden zwischen der *Primärstrahlung*, die direkt aus dem Weltenraum stammt, und der *Sekundärstrahlung*, die als Folge der Primärstrahlung erst in der Erdatmosphäre entsteht.

Die unterschiedliche Anzahl der primären und sekundären Teilchen läßt sich ungefähr aus Bild 106 erkennen. Die Teilchen der Primärstrahlung erzeugen im Zählrohr relativ wenig Impulse. Beim



106. Höhenabhängigkeit der Intensität der kosmischen Strahlung

tieferen Eindringen in die Atmosphäre steigt die Zahl der sekundär gebildeten Teilchen stark an und erreicht in etwa 20 km Höhe ein Maximum. Infolge der dann überhandnehmenden Absorption durch die Luft klingt dann die Intensität dieser sekundären Strahlung wieder schnell ab. Um die Zusammensetzung und Energie der primären Komponente festzustellen, muß man sie nach Möglichkeit in großen Höhen mit Hilfe von Stratosphärenballons oder am besten außerhalb der Erdatmosphäre mit Raketen und künstlichen Satelliten untersuchen. Als Nachweis- und Meßgeräte dienen die auch in der Kernphysik benutzten Geiger-Müller-Zählrohre, Ionisationskammern und Pakete von photographischen Platten mit besonders dicker strahlenempfindlicher Schicht, in denen die Teilchen feine Spuren hinterlassen. Man fand dabei, daß die primäre Strahlung aus überaus schnell fliegenden Atomkernen besteht. In der überwiegenden Mehrzahl sind es Wasserstoffkerne, d. h. Protonen. Ihre Bewegungsenergie übersteigt alles bisher Gekannte.

Wie auch in der Kernphysik ist es üblich, diese Energie in *Elektronenvolt* (eV) auszudrücken. Diese Maßeinheit ist wegen ihrer Anschaulichkeit leicht zu verstehen. Hierzu denken wir uns im luftleeren Raum zwei Metallplatten, zwischen denen die Spannung 1 Volt aufrechterhalten werden möge (Bild 107). Befindet sich nun in der Nähe der negativen Platte ein Elektron, das bekanntlich negativ geladen ist, so wird dieses von der positiven Platte angezogen. Wie ein Stein im Schwerefeld bewegt es sich beschleunigt und kommt mit einer bestimmten Geschwindigkeit an der positiven Platte an. Die dabei zurückgelegte Wegstrecke spielt übrigens gar keine Rolle, wenn nur die Spannung zwischen Anfangs- und Endpunkt seiner Bahn 1 Volt beträgt. Die dementsprechende Endenergie beträgt dann 1 eV.

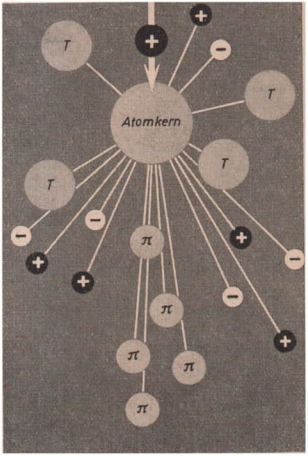
Liegt an einer Radioröhre die Anodenspannung 100 V, dann ist die Endenergie der von der Katode emittierten Elektronen 100 eV. Die von radioaktiven Stoffen ausgesandten Teilchen haben dagegen Energien in der Größenordnung von 10^6 eV, und die größten Teilchenbeschleuniger der Welt liefern Protonen von $25 \cdot 10^9$ eV. Die Partikel der kosmischen Strahlung aber haben eine durchschnittliche Energie von $30 \cdot 10^9$ eV, vereinzelte Teilchen erreichen 10^{16} eV!

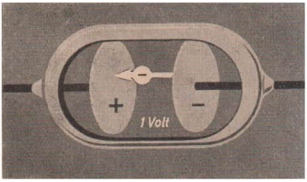
Sie übertreffen die Energie der gefürchteten radioaktiven Strahlungen um das 10^{10}fache. In etwa dem gleichen Verhältnis stehen die kinetischen Energien eines Regentropfens und einer D-Zug-Lokomotive zueinander (Bild 108). Tödliche Gefahr scheint allen Lebewesen von seiten der kos-

108. Die kinetische Energie
eines Regentropfens und einer fahrenden D-Zug-Lokomotive verhalten sich zueinander wie $1 : 10^{10}$

mischen Strahlung zu drohen, kein lebender Organismus kann sich dagegen schützen. Wir entgehen ihr nur dadurch, daß die Anzahl der auf die Flächeneinheit fallenden Teilchen sehr gering ist. In Meereshöhe wird je cm^2 und Minute nur etwa 1 Teilchen registriert. Mag es da und dort einen Zellkern dabei zerstören oder die Struktur eines einzelnen, die Erbmasse tragenden Gens erblich verändern, so hat uns doch die biologische Entwicklung stark genug gemacht, derart winzige Schäden ohne weiteres zu ertragen.
Wie schon gesagt, stoßen die primären, in die Lufthülle schießenden Teilchen mit den Kernen der Sauerstoff- und Stickstoffatome zusammen. Jeder Zusammenprall führt eine explosionsartige Zerstörung des getroffenen Kerns herbei, und die mit größter Gewalt davonfliegenden Bruchstücke rufen ihrerseits wieder die verschiedensten Effekte hervor (Bild 109). Das wichtigste hierbei ist, daß in dieser sekundären Strahlung eine ganze Anzahl von Elementarteilchen auftritt, die in der Primärstrahlung gar nicht enthalten ist: leichte Teilchen (Elektronen und Positronen), mittelschwere Teilchen (z. B. die verschiedenen Arten der sogenannten Mesonen) und überschwere Teilchen bis zu über 2000facher Elektronenmasse. Die meisten von ihnen konnten in den

109. Zersplitterung (Spallation) eines Atomkerns beim Aufprall eines Protons der kosmischen Strahlung
T Kernsplitter π Mesonengarbe
— Elektronen + Positronen





107. Definition des Elektronenvolts

letzten Jahren mit den Großgeräten der Kernphysik künstlich hergestellt werden und sind damit unmittelbare Objekte physikalischer Experimente geworden. Was am Erdboden registriert wird, ist mithin größtenteils nicht die eigentliche kosmische Strahlung selbst, sondern ihr Folgeprodukt. Von 1000 Protonen, die in die Atmosphäre eindringen, kommt nur etwa eines an der Erdoberfläche an.

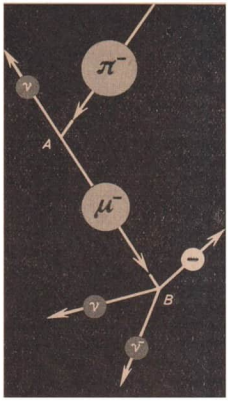
Der Zerfall des μ-Mesons

Um die Reichtümer und Kuriositäten der Natur kennenzulernen, unternahmen wagemutige Männer abenteuerliche Reisen nach allen Gegenden dieser Erde. Die Fülle der äußeren Erscheinungsformen im Tier-, Pflanzen- und Mineralreich zog sie in ihren Bann, und reiche Ernte ward ihrem Forscherdrang zuteil. Was die Erde an makroskopisch erkennbaren Dingen zu bieten hat, ist aber heute so gut wie vollständig bekannt, grundsätzlich Neues ist kaum noch zu erwarten. Doch die Natur hat noch andere Dimensionen. Sie reichen hinab in die Urgründe des Substantiellen, und der Weg dorthin ist nicht minder fesselnd und reich an Überraschungen. Die Welt des Mikrokosmos, der Atome und Elementarteilchen existiert nicht getrennt vom Geschehen im Makrokosmos. Kernphysik und Astrophysik, so haben wir es eindrucksvoll genug erfahren, hängen aufs engste miteinander zusammen. Wo es um die feinsten Strukturen des Stofflichen geht, schneidet man, ob man es haben will oder nicht, in vielen Fällen Fragen an, die weit hinausgreifen in die Existenz der Welt als Ganzes.

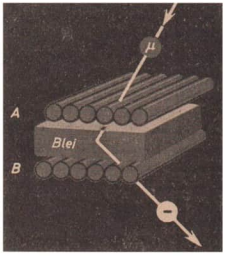
Die kosmische Strahlung ist ein solches Bindeglied. Sie zeigt Eigenschaften, die zu kennen für das Verständnis anderer, in kosmischem Maßstab gültiger Gesetze unerläßlich ist. Die uns an der Erdoberfläche erreichenden Teilchen sind besonders interessant. Zu etwa 80 % sind es positiv oder negativ elektrisch geladene *μ-Mesonen*, die man eine Zeitlang auch „schwere Elektronen" genannt hat. Ihre Masse beträgt das 206,7fache von der eines Elektrons. Sie gehen durch Zerfall aus dem etwas schwereren π-Meson hervor, das seinerseits bei der vorhin erwähnten Wechselwirkung zwischen Primärteilchen und Atomkernen entsteht. Technisch kann man mit den μ-Mesonen nichts anfangen, da sie äußerst kurzlebige Gebilde sind und wie radioaktive Atomkerne mit einer Halbwertszeit von 1,5 μs (Mikrosekunden) in je ein positives oder negatives Elektron und je ein Neutrino und Antineutrino zerfallen. Dies drückt die folgende Gleichung aus:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu + \bar{\nu}.$$

Bild 110 zeigt, wie das μ-Meson aus dem π-Meson entsteht und dann von selbst weiter zerfällt. Da es mit der Lebensdauer der Mesonen eine besonders merkwürdige Bewandtnis hat (S. 147), sei hier kurz, skizziert, wie diese gemessen wird. Nach Bild 111 verwendet man hierzu zwei Batterien *A* und *B* jeweils parallel geschalteter Geiger-Müller-Zählrohre, zwischen denen ein Bleiklotz (Pb) liegt. Sobald ein Meson in den Bleiklotz eindringt, löst es in der oberen Zählrohrgruppe einen Impuls aus. Die unteren Zählrohre dagegen sprechen auf das beim Zerfall freiwerdende Elektron an. Die zwischen Eintritt in die Apparatur und dem Zerfall verstreichende Zeit wird nun dadurch gemessen, daß der erste Impuls einen Hochfrequenzgenerator einschaltet, der je Sekunde eine ganz bestimmte Anzahl von Schwingungen ausführt. Der von den unteren Zählrohren gelieferte Impuls stoppt den Generator wieder ab. Die Anzahl der in der Zwischenzeit stattgefundenen Schwingungen wird genau registriert, woraus sich die Zeit ergibt, innerhalb deren das Meson zerfallen ist.

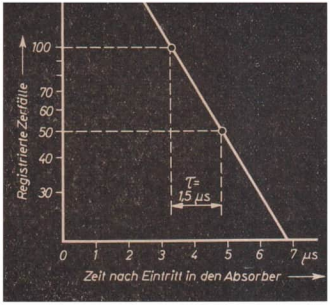


110. Zerfallsschema eines negativen π-Mesons
Bei A: Umwandlung in ein μ-Meson
Bei B: Zerfall des μ-Mesons



111. Messung der Lebensdauer von μ-Mesonen

Die Zerfallszeiten der einzelnen Teilchen sind jedoch, wie bei allen radioaktiven Prozessen, nicht gleich lang, da der Vorgang nach den Gesetzen der Statistik erfolgt. Nach einer längeren Versuchsserie kann man aber feststellen, wieviel Teilchen nach 1 μs, wieviel nach 2 μs usw. zerfallen. Hat man einige Tausend solcher Einzelereignisse beobachtet, so findet man, daß ihre Gesamtheit das bekannte Zerfallsgesetz befolgt, nach dem die Anzahl der Teilchen in jeweils gleichbleibenden Zeitabständen auf die Hälfte der vorangegangenen Anzahl abnimmt. Diese Zeit nennt man die *Halbwertszeit*.
Das theoretische Ergebnis einer solchen Meßreihe zeigt Bild 112. Man liest beispielsweise ab, daß von anfänglich 100 Teilchen nach Ablauf von 1,5 μs noch 50 Teilchen übrig sind. Damit ist die Halbwertszeit schon gefunden. Die Lebensdauer der einzelnen Teilchen ist also ganz verschieden. Manche explodieren fast augenblicklich nach ihrem Eintritt in den Bleiabsorber, während sich andere unverhältnismäßig viel Zeit dazu lassen. Daher ist es für manche Betrachtungen bequemer, mit der *mittleren Lebensdauer* τ eines einzelnen Teilchens zu rechnen. Nach den Gesetzen der mathematischen Statistik erhält man sie, indem man die Halbwertszeit mit dem Faktor 1,443 multipliziert. So findet man $\tau = 1{,}443 \cdot 1{,}5\ \mu\text{s} = 2{,}16\ \mu\text{s}$.
Da auch viele andere Elementarteilchen und Atomkerne nur eine begrenzte Lebensdauer haben – manche sind weit kurzlebiger und andere bedeutend stabiler – wäre dieses Ergebnis an sich nicht besonders bemerkenswert. Wir werden aber in einem ganz anderen Zusammenhang nochmals hierauf zurückkommem müssen, bei dem gerade das μ-Meson ein gewichtiges Wort mitzureden hat.



112. Zur Bestimmung der Halbwertszeit zerfallender μ-Mesonen

Der Ursprung der kosmischen Strahlung

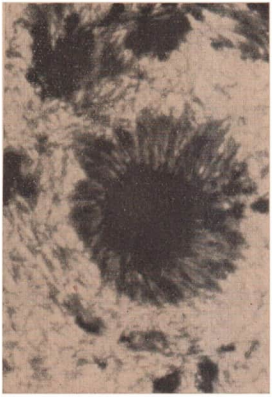
Über den Ursprung der kosmischen Strahlung läßt sich trotz aller Bemühungen und Theorien noch nichts Bestimmtes sagen. Das Problem wird von vornherein dadurch sehr erschwert, daß das Magnetfeld der Erde ihre ursprüngliche Richtung vollständig verändert. Es sieht so aus, als ob sie von allen Seiten her in das Sonnensystem eindringe. Das wiederum kann daher rühren, daß interstellare Magnetfelder die Teilchen nach allen Richtungen hin zerstreuen. Damit lassen sich aber über ihren Ursprung nur mehr oder weniger vage Vermutungen anstellen.
Deshalb glaubt man z. B. in der Zusammensetzung der Strahlung einen gewissen Anhaltspunkt gefunden zu haben. Die in der primären Komponente vorkommenden Atomkerne entsprechen im großen und ganzen der kosmischen Häufigkeit der Elemente (S. 108). Man könnte also vermuten, daß die Strahlung von einem typischen Durchschnittsstern ausgesandt wird, wie die Sonne einer ist und von denen es im Milchstraßensystem an die 100 Milliarden gibt. Doch weicht ihre Zusammensetzung in zwei wesentlichen Punkten von der durchschnittlichen Häufigkeit der Kerne ab. Sie enthält im Vergleich dazu etwa zehnmal zuviel an Nickel und Eisen und auch merkliche Mengen an Lithium, Beryllium und Bor, die in den Sternen praktisch fehlen.
Diese und noch andere Umstände machen es wahrscheinlich – obwohl man es nicht direkt beweisen kann –, daß die Strahlung von riesigen Sternexplosionen herrührt, die als sogenannte *Supernovae* gelegentlich am Himmel aufleuchten. Dies sind plötzlich auftauchende neue Sterne auffallend großer Helligkeit, die meist nach ein paar Tagen wieder verschwinden. Chinesische Astronomen haben im Jahre 1054 ein solches Phänomen zum ersten Mal beobachtet. Seine Überreste sind heute noch vorhanden, und zwar in Gestalt des „Krebsnebels" im Sternbild des Stiers (Bild 103). Dort streben die Gasmassen mit einer Geschwindigkeit von 1100 km/s auseinander. Das ist mehr als die Geschwindigkeit des Gases im Zentrum einer Atombombe. Wie eine solche Supernova entstehen kann, läßt sich ebenfalls nur mutmaßen. Vielleicht ist es das Gleichgewicht zwischen Gravitation und Kernprozessen, das in einem bestimmten Stadium eines Sterns zugunsten der Gravitation umkippt und zum katastrophalen Zusammenbruch des Sterns führt.

Große Mengen an Wasserstoff und Helium stürzen aus der Atmosphäre in das heiße Innere. Die schon erwähnten Kernreaktionen, die sonst ruhig und ausgeglichen verlaufen, führen in Bruchteilen von Sekunden zu einer ungeheuren Explosion. Die Leuchtkraft steigert sich dabei um das 40millionenfache und kommt in den ersten Tagen derjenigen von 10^9 Sonnen gleich.
Somit ist eine Supernova kein neuer Stern, sondern sie entwickelt sich aus einem älteren Objekt. Wenn hier schon verhältnismäßig viel Nickel und Eisen angereichert war, ist die relativ große Häufigkeit solcher Atomkerne in der Strahlung erklärt. Das Vorkommen von Lithium, Beryllium und Bor aber kann wiederum von Zertrümmerungen herrühren, die diese Kerne auf ihrem weiten Weg durch den Weltenraum bei Zusammenstößen mit den dort vorhandenen Partikeln erleiden.
Das zweite große Problem ist die außerordentliche Energie der Strahlung. Es sind keinerlei radioaktive Vorgänge oder Kernprozesse bekannt, bei denen Teilchenenergien bis zu 10^{16} eV auftreten. Um diese zu erklären, muß man annehmen, daß sie in Magnetfeldern kosmischer Ausdehnung beschleunigt werden. Solche Felder sind tatsächlich allenthalben vorhanden. Im Milchstraßensystem laufen beispielsweise magnetische Feldlinien parallel zu den Spiralarmen. Viele Sterne haben eigene Magnetfelder von bedeutender Stärke, und vor allem ist das interstellare Medium von Magnetfeldern durchsetzt, die durch die starken Ionenströme entstehen. Da nun ein zeitlich veränderliches Magnetfeld elektrische Felder induziert, ist damit auch ohne weiteres die Möglichkeit gegeben, daß die elektrisch geladenen Teilchen der kosmischen Strahlung entsprechende Beschleunigungen erfahren.

Die solare Strahlung

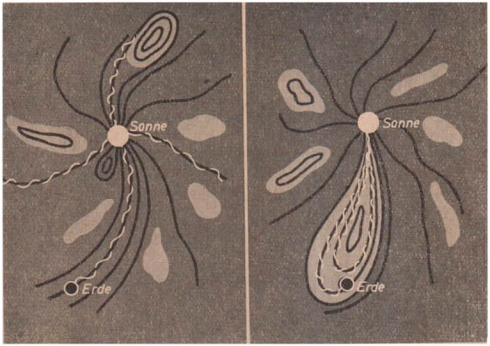
Schon vor längerer Zeit war der Gedanke aufgetaucht, ob die kosmische Strahlung nicht wenigstens teilweise von der Sonne stammen könnte. In Ermangelung genügender Anhaltspunkte kam man aber von dieser Hypothese wieder ab. Erst in den letzten Jahren ergab sich genügend Beobachtungsmaterial, das Klarheit in dieser Frage brachte: Außer der mit etwa konstanter Intensität einfallenden kosmischen Strahlung existiert auch eine bisweilen sehr starke *solare Strahlung*, die vorwiegend aus Protonen und Elektronen besteht.
Sie hängt aufs engste mit den *Sonnenflecken* zusammen, deren eigentliche Entstehungsursache bis heute noch ungeklärt ist (Bild 113). In diesen wirbelartigen Störungsgebieten ist die Temperatur der Sonnenoberfläche um rund 1000 Grad niedriger als in der Umgebung, so daß die Flecken optisch schwächer strahlen und schwarz erscheinen. Das Auffälligste, und dies läßt sich an der damit verbundenen Aufspaltung der Spektrallinien erkennen, sind die aus den Sonnenflecken aufsteigenden starken Magnetfelder. Sie erreichen eine Stärke bis zu 4000 Gauß[46]) und greifen weit in den Raum, bis über die Erdbahn hinaus.
In der Nähe solcher Sonnenflecken kommt es nun mitunter zu starken Eruptionen, die von hellen Lichterscheinungen, starker Ultraviolett- und Röntgenstrahlung eingeleitet werden. Sie machen sich als Störungen im Funk- und Kurzwellenverkehr unangenehm bemerkbar. Gleichzeitig oder unmittelbar danach aber werden gewaltige Wolken von Sonnengas ausgestoßen, die nach etwa

[46]) Dieser Wert entspricht der Induktion eines kräftigen Elektromagneten, 4000 Gauß = 0,4 Vs/m².

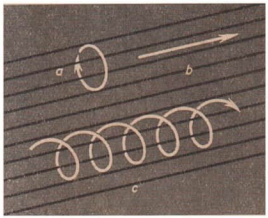


113. Sonnenfleck

15 bis 40 Stunden die Erde erreichen. Man kann leicht errechnen, daß die darin enthaltenen Teilchen Geschwindigkeiten von 1000 bis 3000 km/s aufweisen. Wenn man davon hört, daß diese Strömung 1000 bis 100000 Teilchen je Kubikzentimeter enthalten kann, so erscheint der Ausdruck „Protonensturm" durchaus angebracht.
Jedoch nicht jeder solche Ausbruch erreicht die Erde. Ob er bis zu uns gelangt oder nicht, hängt vom interplanetaren „Wetter" ab, das wiederum entscheidend von der Form und Verteilung der mit den Sonnenflecken verbundenen Magnetfelder bestimmt wird. Infolge der Rotation der Sonne nehmen sie zunächst, wie die bogenförmig gekrümmten Wasserstrahlen eines Rasensprengers, eine spiralige Struktur an (Bild 114a). In größerer Entfernung von der Sonne werden sie dann von dem stoßweise abströmenden Plasma in äußerst unregelmäßiger Weise verzerrt. Die Feldlinien werden wolkenartig deformiert und können sich schließlich blasenförmig abschnüren.
Wie nun bereits aus Bild 102 hervorging, beschreibt ein Ladungsträger eine Kreisbahn, wenn seine Flugrichtung rechtwinklig zu den Feldlinien verläuft. Daß sich diese Kreisbahnen infolge des mit der Synchrotronstrahlung verbundenen Energieverlustes spiralig verengen, lassen wir einstweilen außer acht. Bewegt sich ein elektrisches Teilchen dagegen genau parallel zur Feldrichtung, dann schlüpft es sozusagen an den Feldlinien entlang und erfährt überhaupt keine Ablenkung. Es fliegt völlig ungehindert geradeaus.
Ein aus dem Kosmos kommendes Teilchen bewegt sich jedoch im allgemeinen weder rechtwinklig noch parallel zu den Feldlinien, sondern stets in mehr oder weniger schräger Richtung. Seine Bewegung ist daher weder kreisförmig noch geradlinig, sondern verläuft auf einer Schraubenlinie. Auf solchen Schraubenbahnen folgt es der Richtung der Feldlinien (Bild 115). So kommt es dann, daß die von der Sonne kommenden Teilchen innerhalb der abgeschnürten Feldpartien im großen und ganzen gefangen bleiben. Man nennt so etwas eine *magnetische Flasche*.
Erst wenn die dadurch gebildete Plasmazunge in Erdnähe gerät, kann es zu einem stärkeren Ein-



114. a) Solare Magnetfelder und darin eingeschlossene Plasmawolken. Weiß: Bahnen von Teilchen solarer Strahlung
b) In magnetischer Flasche eingeschlossene Plasmazunge erreicht die Erde

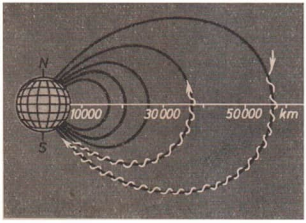


115. Bewegung elektrischer Teilchen im homogenen Magnetfeld
a: senkrecht
b: parallel
c: schräg zu den Feldlinien

bruch von Protonen kommen (Bild 114b). Ein amerikanischer Satellit registrierte beispielsweise innerhalb von 17 Monaten 21 kleinere und größere Protonenstürme.
Die Energie der in der solaren Strahlung vorhandenen Protonen liegt über $20 \cdot 10^6$ eV und geht nur selten über $15 \cdot 10^9$ eV hinaus. Es ergibt sich somit, daß die Teilchen der solaren Strahlung weit energieärmer als die der kosmischen Strahlung sind. Dagegen übertrifft sie die kosmische Strahlung bedeutend an Teilchendichte. Diese und viele weitere Einzelheiten zu ergründen erfordert zahlreiche mühevolle Einzelbeobachtungen. Besonders deshalb, weil die solare Strahlung infolge ihrer relativ geringen Energie an der Erdoberfläche nur indirekt erkundet werden kann. Bereits oberhalb von 14 km wird sie durch Ionisation abgebremst oder durch Auslösung der schon erwähnten Reaktionen mit den Atomen der Atmosphäre absorbiert.
Um jedoch zu gesicherten Tatsachen zu kommen, ist es ohne Zweifel der beste Weg, wenn man die Strahlung an Ort und Stelle, im Weltenraum selbst, studieren kann. Ein großer Teil des mit dem Start künstlicher Satelliten und Raumschiffe verbundenen sowjetischen Forschungsprogramms ist deshalb der weiteren Erforschung der kosmischen und solaren Strahlung gewidmet.

Die Strahlungsgürtel

Eine ganz neue und unerwartete Entdeckung ist dieser Arbeit bereits zu verdanken. Die Erde ist von mehreren Zonen umgeben, in denen die Dichte der Strahlung ungewöhnlich hohe Werte annimmt. Diese sogenannten *Strahlungsgürtel* hängen mit dem Magnetfeld der Erde zusammen und mit dem Gesetz, nach dem sich elektrisch geladene Teilchen darin bewegen. Dabei haben wir vorhin (S. 134) erfahren, daß sie sich im allgemeinen auf Schraubenbahnen um die Feldlinien herumwinden.



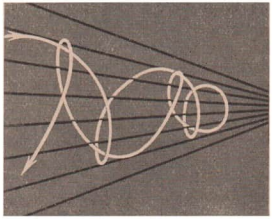
116. Einfang elektrisch geladener Teilchen im Magnetfeld der Erde

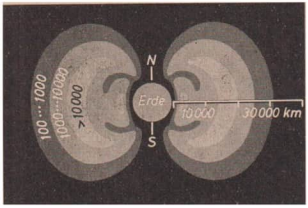
Hierzu tritt aber noch eine weitere Komplikation; denn im Magnetfeld der Erde gibt es keine parallelen Feldlinien. Sie laufen bekanntlich bogenförmig zwischen den beiden magnetischen Polen der Erde und drängen sich dort immer mehr zusammen (Bild 116). Ein elektrisches Teilchen gerät zwangsläufig in Gebiete, wo die magnetische Feldstärke immer mehr zunimmt. Die Schraubenwindungen werden immer enger, ihr Steigungswinkel immer kleiner. Dem Teilchen droht die Gefahr steckenzubleiben. Dies verhindern jedoch die Gesetze von der Erhaltung der Energie und des Drehimpulses. An einem Punkt bestimmter Feldstärke kippt der Steigungswinkel der Schraube nach negativen Werten um, und das Teilchen läuft wieder rückwärts aus der Falle heraus (Bild 117). Es wird reflektiert und tritt seine Reise nach dem magnetischen Gegenpol an. Dort wiederholt sich das gleiche Spiel, und so kann das Teilchen längere Zeit in diesem Magnetfeld wie in einem Käfig gefangen bleiben. Nur sehr energiereiche Teilchen können bei günstiger Flugrichtung quer zu den Feldlinien triften und aus dem Käfig entweichen.

Bisher kannte man den Einfluß des Magnetfeldes nur aus dem *West-Ost-Effekt*, demzufolge die kosmische Strahlung überwiegend aus westlicher Richtung am Erdboden ankommt. Zahlreiche und sorgfältige Untersuchungen haben jetzt ergeben, daß sich die kosmische und auch die solare Strahlung in bestimmten Entfernungen von der Erde in beängstigender Weise verdichten.

Dabei muß man einen *inneren* und einen *äußeren Strahlungsgürtel* unterscheiden (Bild 118). Für den inneren, der auch *van-Allen-Gürtel* genannt wird, sind die Wechselwirkungen zwischen den

117. Reflexion eines elektrischen Teilchens im inhomogenen Magnetfeld





118. Querschnitt durch die Strahlungsgürtel der Erde. Die Zahlen geben die Teilchen je cm^3 an

Strahlungsteilchen und den Atomen der Atmosphäre charakteristisch. Hier findet man besonders die energiereicheren Protonen bis zu 10^8 eV der kosmischen Strahlung konzentriert. Die energieärmeren Teilchen sowie die Elektronen der solaren Strahlung werden vor allem im äußeren Gürtel abgefangen. Man fand hier überwiegend Elektronen von weniger als 10^5 eV in einer Dichte von 10^{11} Elektronen je cm^2 und Sekunde.
Wenn wir eingangs meinten, daß die am Erdboden ankommende kosmische Strahlung weiter keine Gefahr für den Menschen darstelle, so muß diese Ansicht für das Gebiet der Strahlungsgürtel entscheidend revidiert werden. Raumflüge in diesen Zonen, wo 10000 bis 50000 Teilchen je cm^2 und Sekunde einfallen, wären äußerst gefährlich. Bei ausgedehnten Reisen ins Weltall müssen die Strahlungsgürtel unbedingt so rasch durchstoßen werden, daß keine ernsthaften Strahlungsschäden auftreten können. Die Strahlung durch Schutzpanzer abzuschirmen dürfte wegen deren enormer Masse problematisch sein. Um den gefährlichen Gürtelzonen aus dem Weg zu gehen, könnte der Start auch durch einen der beiden trichterförmigen strahlungsarmen Korridore erfolgen, die oberhalb der Erdpole liegen. Auf jeden Fall aber müssen die strahlenbiologischen Bedingungen für einen längeren Aufenthalt des Menschen im Weltenraum noch sehr sorgfältig erkundet werden, ehe man sich an größere Raumfahrten heranwagen kann.

Die relative Welt

Bezugssysteme

Geschwindigkeiten spielen in der Physik eine große Rolle und sind auch sonst ein ausgesprochen beliebtes Thema moderner Unterhaltungen. Mehr oder weniger imponierende Zahlen haften uns noch im Gedächtnis. Während wir in aller Ruhe am Schreibtisch sitzen und dies und jenes bedenken, kommt es uns aber nicht in den Sinn, daß doch das ganze Haus auf einem Karussell steht und infolge der Erdrotation rund 300 km in der Stunde zurücklegt. Nichts verspüren wir davon, daß die Erde außerdem mit schwindelerregenden 30 km/s um die Sonne eilt und die Sonne ihrerseits im Milchstraßensystem. . . . Hat das überhaupt ein Ende? Welche Geschwindigkeit ist denn eigentlich die richtige?

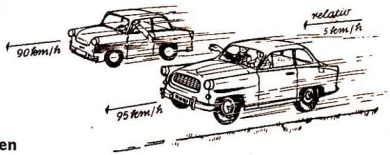
Aller Zweifel ist sofort beseitigt, wenn man sich darauf besinnt, was denn der Begriff Geschwindigkeit überhaupt bedeutet. Es kann damit nichts anderes gemeint sein als die Verschiebung eines Körpers gegenüber einem als ruhend angenommenen Hintergrund, ein festliegend gedachtes Bezugssystem. Es gibt keine Bewegung an sich, sondern immer nur in bezug auf irgend etwas anderes. So wandert der Mond friedlich von einem Horizont zum anderen, solange wir die Erde als Bezugssystem annehmen. In manchen Nächten passiert es aber, daß er wie ein vom Sturm getriebener Ballon durch die Wolken jagt, wenn wir in Gedanken versunken den Horizont eine Weile aus dem Auge verlieren. Natürlich ist das eine Täuschung, sagt man sich; denn die Wolken sind es ja, die vom Wind gehetzt werden. Der Mond läuft nur scheinbar so schnell, weil wir einige Augenblicke lang den in Bewegung geratenen Himmel als Bezugssystem wählten.

Man kann es drehen und wenden, wie man will, alle Geschwindigkeitsangaben haben nur dann einen Sinn, wenn man zugleich das System nennt, in bezug auf welches sie gelten sollen. Von diesem System nimmt man dann an – schon um sich nicht unnötig nervös zu machen –, daß es stillstünde, wie die Wände unseres Zimmers, das Fensterkreuz und der Baum da draußen. Aber ein wirklich ruhendes, ein sogenanntes absolutes Bezugssystem gibt es nicht. Im ganzen Weltall findet sich nicht ein einziger Punkt, von dem man mit vernünftigem Grund behaupten kann, daß er gegenüber allen anderen unbeweglich feststünde.

119. Gleichförmig bewegtes Bezugssystem

Am einfachsten liegen die Verhältnisse bei solchen Bezugssystemen, die sich gegenseitig in gleichförmiger geradliniger Bewegung befinden. In bezug auf die physikalischen Vorgänge, die sich in ihnen abspielen, sind sie alle gleichwertig. Ein Pendel schwingt in einem geradeaus fliegenden Düsenflugzeug mit genau der gleichen Periodendauer und nach dem gleichen Gesetz wie auf der ruhenden Erde. Alle die komplizierten Instrumente an Bord funktionieren um kein Haar anders als in der Fabrik, in der sie zuletzt ausprobiert wurden. Wenn der Fahrgast einen Augenblick das Geräusch des brausenden Motors vergißt, könnte er glauben, zu Hause am Frühstückstisch zu sitzen (Bild 119). Ein gleichförmig bewegtes Bezugssystem stellt eine in sich geschlossene Einheit dar. Alle darin stattfindenden Vorgänge und physikalischen Experimente werden durch die Bewegung nicht im geringsten beeinflußt.
In allen gleichförmig zueinander bewegten Bezugssystemen gelten in diesem Sinne die gleichen Naturgesetze.
Wie es sich mit Systemen verhält, die sich nicht gleichförmig und geradlinig, sondern beschleunigt oder rotierend bewegen, werden wir noch untersuchen und stellen diese Frage einstweilen noch zurück.

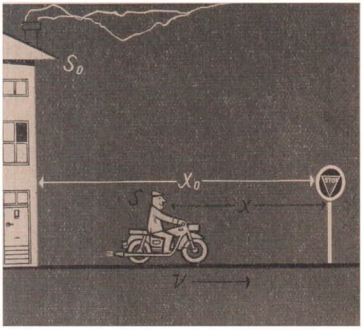
120. Relativgeschwindigkeit



Relativgeschwindigkeiten

Auch der auf der Autobahn dahinsurrende „Trabant" ist ein gleichförmig bewegtes Bezugssystem. 90 km/s zeigt das Tachometer an; relativ zur ruhenden Erde, versteht sich. Hinter ihm taucht jetzt mit 95 km/h und drohendem Brummen ein „Skoda" auf. Mit blinkenden Lichtern setzt er zum Überholen an, biegt seitwärts aus und schiebt sich mit betonter Überlegenheit am „Trabant" vorbei. Fast könnte man sich auf gleicher Höhe die Hände reichen, so langsam geht es vor sich. Die 95 km/h des Überholers sind mit einem Male auf 5 km/h zusammengeschrumpft (Bild 120). Anders gesprochen: Transformiert man die Geschwindigkeit des Skodawagens auf das Bezugssystem des „Trabant", so muß man die Differenz der Geschwindigkeitsbeträge bilden. Würden sich beide Fahrzeuge begegnen, dann käme als Relativgeschwindigkeit die Summe (95 + 90) km/h = 185 km/h heraus, und beide könnten sich etwas darauf einbilden.
Noch eine andere Transformationsgleichung wollen wir betrachten. Ein Punkt (auf Bild 121 ist es ein Verkehrsschild) liege in einem ruhenden Bezugssystem S_0 fest und habe hier die Koordinate x_0. Ein zweites System (etwa ein Motorradfahrer) bewegt sich relativ zu S_0 mit der Geschwindigkeit v nach rechts. Zur Zeit $t = 0$ mögen sich die Anfangspunkte beider Systeme (an der Hausecke) miteinander decken. Während nun im System S_0 die Lage des Punktes unverändert bleibt, wird er sich im System S im Laufe der Zeit t verschieben. Seine Koordinate x wird hier immer kürzer, und zwar um die Strecke $v \cdot t$, um die sich das System S im Laufe der Zeit t nach rechts

121. Zur Galilei-Transformation



verschiebt. Es gilt die Transformationsgleichung

$$(75)\quad x = x_0 - v\,t$$

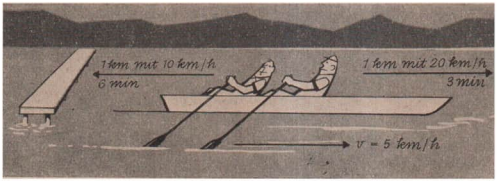
Derartige Gleichungen, die den Übergang von einem gleichförmig bewegten Bezugssystem in ein anderes beschreiben, entsprechen allen Erfahrungen des täglichen Lebens. Wir halten sie selbstverständlich für richtig. Man nennt sie *Galilei-Transformationen.*

So einfach wie solche Rechnungen aussehen, kann man auch leicht danebentappen, wenn man nicht richtig aufpaßt. Da tragen zwei junge Männer ein Ruderboot zu Wasser, einen schnittigen Zweier, der auf ruhigem See mit der Geschwindigkeit $c = 15$ km/h dahinflitzt. Beide haben sich ausgerechnet, daß sie die 2 km lange Strecke in genau 8 min zurücklegen.

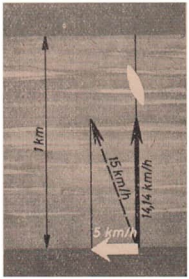
Heute aber wird auf der Elbe trainiert. Die Strömung des Wassers macht $v = 5$ km/h aus. Um ihren Einfluß zu beseitigen, beschließt man daher, einen Kilometer hin und den andern wieder zurückzurudern. Dann müßte sich der stromaufwärts entstehende Zeitverlust gerade wieder ausgleichen; denn man fährt ja *gegen* den Strom mit der auf das Ufer bezogenen Geschwindigkeit $(c - v) = (15 - 5)$ km/h $= 10$ km/h und *mit* dem Strom mit $(c + v) = (15 + 5)$ km/h $= 20$ km/h, was ganz ohne Zweifel den richtigen Mittelwert von 15 km/h ergeben sollte.

Natürlich stimmt der Mittelwert auch – leider aber nicht die Fahrzeit, auf die es gerade ankommt! Denn für den Hinweg brauchen sie die Zeit $\frac{s}{v_1} = \frac{1\text{ km}\cdot 60\text{ min}}{10\text{ km}} = 6$ min und für die Rückfahrt $\frac{s}{v_2} = \frac{1\text{ km}\cdot 60\text{ min}}{20\text{ km}} = 3$ min. Das macht zusammen nicht 8, sondern 9 Minuten! Eine ganze Minute werden sie länger brauchen, als sie es sich vorgestellt hatten. Die Rückfahrt ist nicht schnell genug, den hinwärts entstandenen Zeitverlust wieder auszugleichen.

122. Bootsfahrt mit und gegen die Strömung



Wenn die Elbe breit genug wäre, könnten sie es auch anders versuchen. Sie könnten 1 km quer, von einem Ufer zum anderen, und dann wieder 1 km zurückrudern. Doch gäbe auch das einen Zeitverlust. Um nämlich zu verhindern, daß sie seitlich abgetrieben werden, müssen sie schräg gegen die Strömung steuern, und zwar so, daß die resultierende Geschwindigkeit rechtwinklig zu beiden Ufern gerichtet ist. Nach Bild 123 verringert sich dadurch die Geschwindigkeit auf den Betrag $\sqrt{(15^5 - 5^2)}$ km/h = 14,14 km/h. Die ganze Fahrzeit ist dann $\frac{2\text{ km} \cdot 60\text{ min}}{14{,}14\text{ km}} = 8{,}5$ min und wenigstens noch um eine halbe Minute vorteilhafter als längs der Strömung.

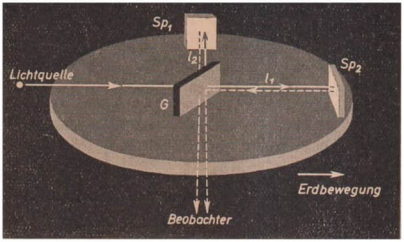


123. Resultierende Geschwindigkeit bei der Überquerung eines Flusses

Der Michelsonsche Versuch

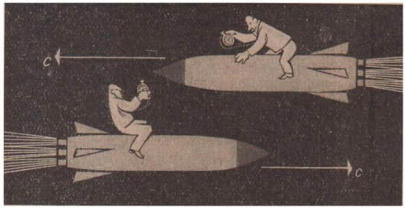
Die Bootsgeschichte ist ein typisches Beispiel dafür, wie man Relativbewegungen seit eh und je in der klassischen Physik zu behandeln pflegte und wie man auch heute noch rechnen muß, wenn es sich um gewöhnliche, d. h. im täglichen Leben und in der Technik vorkommende Geschwindigkeiten handelt.

Aber da gab es ein Problem, von dem man es am liebsten gesehen hätte, wenn es gleichfalls nach der Ruderbootsmethode zu lösen gewesen wäre. Es handelt sich wieder einmal um das alte Sorgenkind der Physik, um das Licht. Es breitet sich in Form von Wellen aus. Sind diese Wellen wirklich vorhanden, dann - und dieser Gedanke ist so naheliegend und natürlich wie nur irgendeiner - muß etwas da sein, was die Wellen macht, so etwa wie das plätschernde Wasser oder die vom Schall durchzitterte Luft. Da sich das Licht aber auch im Vakuum ausbreitet, mußte man etwas erfinden, das als unsagbar feines und natürlich unwägbares Medium alle Räume erfüllt. Von den Zwischenräumen in den Atomen bis in das Innere der Sterne dachte man sich diesen Zauberstoff ausgebreitet und nannte ihn den *Äther*. Dann wäre die Sache mit dem Licht leicht geklärt. Seine kleinsten Teilchen ließen sich leicht zu Schwingungen anregen und diese trügen dann das Licht in Form von Ätherwellen überall dorthin, wo man es haben wollte. Und dieser Äther hätte noch eine zweite Lücke geschlossen. Falls er im Raum stillstehen sollte, wie etwa die Luft in einem vornehmen Salon, hätte man auch endlich das ersehnte feste Bezugssystem gefunden, von dem aus man den Absolutwert aller Geschwindigkeiten bestimmen konnte. Wenn man so bedachte, wie schnell die Erde um die Sonne jagt, hörte man schon den Ätherwind förmlich um die Erde pfeifen.



124. Prinzip des Michelsonschen Versuches

Nun ist aber die Physik nicht dazu da, erfundene Hypothesen zu hüten, sondern experimentell zu beweisen, ob sie richtig sind oder nicht. Und so hat wohl kaum ein Experiment in der Geschichte der Physik soviel Aufsehen erregt und so viele Folgen nach sich gezogen wie der Versuch des Amerikaners MICHELSON, der es im Jahre 1881 unternahm, den Ätherwind dingfest zu machen.
Er ließ einen Lichtstrahl auf eine schrägstehende, schwach versilberte Glasplatte G fallen (Bild 124), die ihn in zwei Teilstrahlen spaltete. Die eine Hälfte des Lichtes wurde nach dem Spiegel Sp_1 und von da wieder zurück nach G reflektiert. Die zweite Hälfte ging rechtwinklig zum ersten Strahl durch das Glas G hindurch. Von da aus fiel das Licht auf den Spiegel Sp_2 und dann wieder zurück nach G. Hier vereinigten sich die beiden Strahlen wieder und kamen in einem Interferenzmeßgerät höchster Präzision zur Überlagerung. Die beiden Lichtwege l_1 und l_2 waren genau gleich lang, und der ganze, auf einer Steinplatte montierte Apparat schwamm in einem mit Quecksilber gefüllten Trog, so daß er sich völlig erschütterungsfrei drehen ließ.
Verlief nun der eine Arm l_1 des Gerätes in Richtung der Erdbewegung, so mußte das Licht einmal gegen und einmal mit dem Strom des gedachten Äthers laufen. Im dazu senkrecht gerichteten Arm l_2 lief es zweimal quer zum Ätherstrom. Es lagen also genau die gleichen Verhältnisse vor wie bei unserem Ruderboot auf der Elbe. Das Licht ist das hin und herfahrende Boot und der Äther das strömende Wasser. Der Zeitunterschied kann, da er winzig klein ist, nicht mit der Stoppuhr gemessen werden. Dafür aber bildet sich bei der Überlagerung der beiden Strahlen ein System



125. Zwei mit Lichtgeschwindigkeit c entgegenfliegende Körper ergeben die Relativgeschwindigkeit c

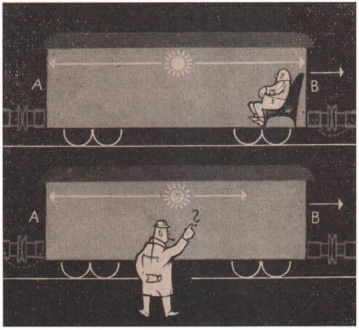
von Interferenzstreifen, das auf die geringste Veränderung der Laufzeiten der beiden Strahlen in empfindlichster Weise reagieren muß. Wenn jetzt das Gerät um 45° gedreht wird, stehen beide Arme symmetrisch zum Ätherwind, womit die anfängliche Laufzeitdifferenz verschwinden muß. Legt man die Erdbahngeschwindigkeit $v = 30$ km/s und die Lichtgeschwindigkeit $c = 300000$ km/s zugrunde, so müßte sich eine Streifenverschiebung von etwa einer halben Lichtwellenlänge ergeben. Bei einer Drehung um 90° ist eine Verschiebung um eine ganze Wellenlänge zu erwarten. Der Effekt wäre bei der Exaktheit der Einrichtung mit Leichtigkeit zu beobachten gewesen.
Aber man konnte den Apparat hin und her drehen, wie man wollte, die Interferenzstreifen dachten nicht daran, ihre Lage zu verändern, sie blieben schnurgerade und zeigten höchstens geringfügige, apparativ bedingte Schwankungen. War der Versuch mißglückt? Im Gegenteil! Er hatte glashart erwiesen, daß der Äther nicht existiert und das Licht immer die gleiche Geschwindigkeit zeigt, ganz unabhängig davon, wie sich das Bezugssystem bewegt, in dem man sie mißt.
Auch spätere, noch bis zum Jahre 1930 wiederholte und mehrfach abgewandelte Versuche führten zum gleichen Resultat. Wenn man einem Lichtstrahl mit der Geschwindigkeit v entgegenfährt, so ergibt sich als Lichtgeschwindigkeit nicht die klassische Relativgeschwindigkeit $(c + v)$, sondern eben nur c. Wenn man mit ihm läuft, kommt nicht $(c - v)$ heraus, sondern ebenfalls nur c. Und zwei Lichtstrahlen, die sich begegnen, huschen nicht mit der Relativgeschwindigkeit $2\,c$ aneinander vorbei, wie dies zwei Wagen auf der Autobahn tun würden, sondern wiederum nur mit der Geschwindigkeit c (Bild 125). Die Galilei-Transformation der Geschwindigkeiten gilt nur bei niedrigen Geschwindigkeiten v. Sie wird bei sehr großen Werten von v immer ungenauer und versagt schließlich ganz, wenn v mit der Lichtgeschwindigkeit c vergleichbar wird.

Die spezielle Relativitätstheorie

Nicht länger als 30 Seiten war die Arbeit, die der erst 26jährige Physiker Albert Einstein im Jahre 1905 in den „Annalen der Physik" veröffentlichte. Sie trug den Titel „Zur Elektrodynamik bewegter Körper" und enthielt alles Wesentliche über seine so berühmt gewordene spezielle Relativitätstheorie. Er war zu der Überzeugung gekommen, daß es nur einen Ausweg gab, das mit dem Zusammenbruch der Ätherhypothese für die Physik entstandene Dilemma zu lösen. Man mußte die althergebrachten Anschauungen von Raum und Zeit prinzipiell korrigieren, da sie in offenkundigen Widerspruch mit der Erfahrung geraten waren. Von diesen Erfahrungen braucht man nur zwei herauszugreifen, von denen wir nunmehr wissen, daß sie unumstößlich feststehen:

1. In allen gleichförmig gegeneinander bewegten Systemen gelten die gleichen Naturgesetze.
2. Die Lichtgeschwindigkeit c hat relativ zu allen gleichförmig bewegten Bezugssystemen stets den gleichen Betrag und ist daher eine absolute Naturkonstante.

Der erste Satz ist das schon von Galilei erkannte klassische Relativitätsprinzip, der zweite enthält das Ergebnis des Michelsonschen Versuches. Welche Denkschwierigkeiten entstehen können, wenn man beide Sätze zugleich anwenden will, zeigt am besten ein Beispiel, das Einstein selbst einmal gebracht hat.
In der Mitte eines gleichförmig geradeaus fahrenden D-Zug-Wagens werde eine Lampe einge-



126. Ausbreitung des Lichtes, vom mitbewegten und vom ruhenden Bezugssystem aus beobachtet

schaltet (Bild 126). Die Lichtstrahlen breiten sich nach allen Richtungen mit gleicher Geschwindigkeit aus, weil sich nach Satz 1 das Licht im fahrenden Zug genau so verhält wie in einem ruhenden. Ein mitreisender Passagier wird daher beobachten, daß das Licht Vorder- und Rückwand des Wagens gleichzeitig erreicht.

Ein außerhalb des Wagens, etwa am Bahndamm stehender Mann aber kommt zu einem anderen Resultat. Wohl hat auch für ihn die Lichtgeschwindigkeit nach Satz 2 den gleichen Betrag wie für den Passagier. Es spielt keine Rolle, ob sich die Lichtquelle im Moment des Einschaltens bewegt hat oder nicht, da ja das klassische Additionsprinzip der Geschwindigkeiten für das Licht nicht gilt. Er wird also bemerken, daß das Licht eine gewisse Zeit braucht, um beispielsweise die Vorderwand *B* des Wagens zu erreichen. Währenddessen aber hat sich der Wagen um ein kleines Stück nach vorn verschoben. Das Licht hat eine größere Strecke zurückzulegen und wird die Vorderwand *B* ein wenig später erreichen. In umgekehrter Weise ist die Rückwand *A*, während das Licht unterwegs war, ein wenig an den ursprünglichen Standort der Lampe herangerückt und wird deshalb vom Licht früher getroffen. Kurzum, der Mann am Bahndamm sieht zunächst die Rückwand *A* und später erst die Vorderwand *B* des Wagens hell werden. Beide Ereignisse finden, von seinem Standpunkt aus gesehen, nicht gleichzeitig statt.

Hieraus folgt, daß zwei Ereignisse, die sich in einem Bezugssystem gleichzeitig abspielen, dies in einem gleichförmig dazu bewegten System nicht tun. Dieses unerklärliche und paradoxe Ergebnis läßt sich aber aus der Welt schaffen, wenn man mit Einstein annimmt, daß beide Beobachter für ihre Zeitmessung verschiedene Maßstäbe verwenden. Es gibt somit nicht nur keine absolute Bewegung, sondern auch keine absolute Zeit. Es gibt keine Weltenuhr, die irgendwo im Himmel tickt und allen Gestirnen vorschreibt, was eine Sekunde ist. Jedes Bezugssystem hat sein eigenes Zeitmaß, nach dem sich alles richtet, was in ihm vorgeht.

Die gedehnte Zeit

Die beiden auf S. 143 aufgestellten Sätze dürfen wir demnach nicht zusammenhanglos nebeneinander zur Kenntnis nehmen, sondern sie müssen auf jeden Naturvorgang gleichzeitig anwendbar sein. Auch den Michelsonschen Versuch haben wir bis jetzt nur von der einen Seite her kennengelernt. Mitsamt dem Apparat und der Erde flogen wir durch das Weltall und befanden uns damit in einem bewegten Bezugssystem. Für die Laufzeit des Lichtstrahls von der schrägstehenden Platte G bis zum Spiegel Sp_2 und wieder zurück zur Platte ergibt sich als Quotient aus Weg und Geschwindigkeit

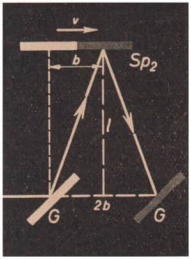
a) $$t = \frac{2\,l}{c}\,.$$

Hierbei bedeutet natürlich t die im bewegten System verstreichende Zeit!
Wie aber würde die Sache aussehen, wenn wir uns in Gedanken auf einen im Verhältnis hierzu festen Bezugspunkt begeben und die ganze Angelegenheit von außen her betrachten?
Von der schrägstehenden Platte G aus eilt der Strahl zum Spiegel Sp_2. Während das Licht dorthin unterwegs ist, hat sich dieser Spiegel, ähnlich wie die Vorderwand des vorhin betrachteten Eisenbahnwagens, um ein Stück b weiterbewegt (Bild 127). Die ganze Strecke bis zur Ankunft des Strahls bei G ist

b) $$2b = v\,t_0.$$

Jetzt müssen wir aber unter t_0 diejenige Zeit verstehen, die an unserem festliegenden Standort vergeht. Ob sie mit der im bewegten Bezugssystem gemessenen Zeit t identisch ist oder nicht, wird sich erst noch herausstellen.
Um wieder zur Platte G zurückzugelangen, muß das Licht jedenfalls jetzt in schräger Richtung laufen. Es hat nicht die kurze Strecke l sondern den längeren Weg $\sqrt{l^2 + b^2}$ zurückzulegen. Für Hin- und Rückweg wird daher die Zeit

c) $$t_0 = \frac{2\sqrt{l^2 + b^2}}{c}$$



127. Zur Auswertung des Michelsonschen Versuches

benötigt. Um nun herauszubekommen, in welchem Verhältnis die beiden Laufzeiten t und t_0 zueinander stehen, setzen wir nach a) $l = \frac{ct}{2}$ und nach b) $b = \frac{v t_0}{2}$ in den Ausdruck c) ein und erhalten die[47])

$$(76)\ \textit{relativistische Zeitdilatation:}\ t_0 = \frac{t}{\sqrt{1-\beta^2}},$$

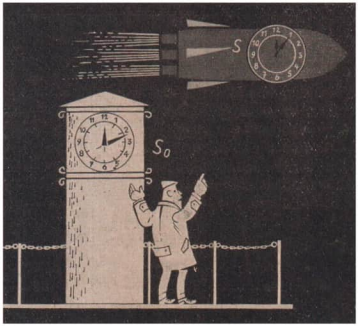
wobei der Kürze halber der Quotient v/c mit dem Buchstaben β bezeichnet ist.
Demnach muß ein im bewegten Bezugssystem gemessenes Zeitintervall t für einen Beobachter, der sich im ruhenden System befindet, einen anderen Wert t_0 haben. Und dieses Zeitintervall t_0 muß nach Gleichung (76) größer sein als das Intervall t, weil der Wurzelausdruck eine Zahl darstellt, die auf jeden Fall kleiner als 1 ist (s. Tabelle S. 148).
Um einzusehen, was das praktisch bedeutet, denken wir an ein Auto, das zwischen zwei Kilometersteinen dahinfährt. Der Fahrer selbst sei mit einer Stoppuhr bewaffnet und messe dabei eine bestimmte Fahrzeit t, sagen wir einmal 6 Sekunden. Ein am Straßenrand postierter Beobachter mißt den gleichen Vorgang und erhält die Zeit t_0. Diese ist also größer als t, vielleicht mögen es 10 Sekunden sein.[48]) Der Mann am Straßenrand muß daher, wenn er nur ein bißchen gesunden Menschenverstand hat, den Schluß ziehen: Die Uhr des Fahrers geht nach, sie geht zu langsam! Hinterher aber, nach beendetem Experiment, zeigt sich wiederum, daß beide Uhren im Ruhezustand vollkommen in Ordnung sind und absolut fehlerfrei und synchron laufen. So bleibt denn nur eine letzte, und es mag den Anschein haben, verzweifelte Konsequenz. Nicht die Uhren sind daran schuld, sondern die Zeit selbst. Derselbe Vorgang, der im bewegten System 6 Sekunden dauert, zerfällt im ruhenden System in 10 Zeitintervalle. Vom Straßenrand aus beurteilt, eilt die im Auto vergehende Zeit nicht im gleichen Maße, sondern schleicht langsamer dahin. Die Zeit des Autofahrers erscheint, vom ruhenden Bezugssystem aus erlebt, wie ein Metermaß aus Gummi gedehnt. Man nennt den Vorgang deshalb auch *Zeitdehnung*.
So funktioniert das Zusammenwirken der beiden Bezugssysteme wie eine Zeitdehnungsmaschine. Während der Mann am Straßenrand um 10 Sekunden älter wurde, vergingen für den Fahrer nur 6 Sekunden. Er könnte die eingesparten Sekunden dazu verwenden, sich noch in Ruhe eine Zigarette anzuzünden und hätte auf diese Weise mehr vom Leben.
Die Zeitdehnung ist jedoch nicht an das Vorhandensein einer Taschenuhr gebunden. Allgemein gesprochen ist so eine Uhr doch nichts weiter als irgendeiner der vielen denkbaren Apparate, in denen ein periodisch wiederkehrender Vorgang sich abspielt, der mechanisch gezählt wird. Es braucht durchaus kein Rädchen zu sein, das von einer feinen Schneckenfeder gehalten, rhythmisch hin und her pendelt. Auch alle anderen Vorgänge in bewegten Systemen werden, von einem ruhenden Standpunkt aus beurteilt, langsamer ablaufen, jeder physikalische, chemische oder

[47]) Nach dem Einsetzen erhält man zunächst $c\,t_0 = 2\sqrt{\left(\frac{ct}{2}\right)^2 + \left(\frac{v t_0}{2}\right)^2}$ und nach entsprechender Vereinfachung $c^2 t_0^2 = c^2 t^2 + v^2 t_0^2$.
Hieraus folgt $t_0^2 = \frac{c^2 t^2}{c^2 - v^2} = \frac{t^2}{1-(v/c)^2}$ oder $t_0 = \frac{t}{\sqrt{1-(v/c)^2}}$.
[48]) Wir werden nachher noch sehen, daß das stark übertrieben ist!

biologische Vorgang, dessen Ablauf mit einem Zeitmeßinstrument verfolgt werden kann. Aus diesem Grunde kann der bewegte Beobachter selbst die Zeitdehnung niemals feststellen, solange er sich in seinem Bezugssystem befindet, da eben alle irgend zu einem Vergleich geeigneten Vorgänge sich im gleichen Tempo verlangsamen, sein Herzschlag, sein Bartwuchs und ganz ohne Zweifel auch sein Zeitgefühl. Für ihn bleibt alles beim alten, weil es auch nicht das winzigste Merkmal dafür gibt, das auf eine Veränderung des Zeitmaßes hindeuten könnte.

Bewegte Mesonen

Die soeben geäußerten Gedanken sind bestens dazu geeignet, jeden nur gewünschten Zweifel an der Relativitätstheorie hervorzurufen; denn es muß doch äußerst verdächtig erscheinen, daß ein Effekt von so tiefgreifender Bedeutung wie die Zeitdehnung noch von keinem Menschen beobachtet werden konnte. Das wird jedoch sofort verständlich, wenn man die Gleichung (76) rechnerisch untersucht. Es ergibt sich dann, daß die Zeitdehnung bei den im täglichen Leben und in der Technik vorkommenden Geschwindigkeiten so geringfügig ist, daß sie überhaupt keine Rolle spielen kann. Selbst bei einem Düsenflugzeug, das sich mit doppelter Schallgeschwindigkeit bewegt, würde sie nur 2 billionstel betragen. Keine Uhr wäre imstande, eine solche Zeitdifferenz anzuzeigen.
Nehmen wir dagegen an, ein Körper würde mit 80 % der Lichtgeschwindigkeit c dahinstürmen,



128. Die Zeitdilatation

dann kommt immerhin schon $t_0 = 1{,}67$ t heraus.[49]) 6 Sekunden im bewegten System dehnen sich zu 10 Sekunden im ruhenden System aus. Das ist gerade der Betrag, den wir in unserem Beispiel auf S. 146 willkürlich angenommen hatten und sehen jetzt ein, daß kein Autofahrer jemals derlei erleben wird.

Es ist recht nützlich, wenn man den Umrechnungsfaktor $\sqrt{1-(v/c)^2}$, der bei vielen Gelegenheiten gebraucht wird, gleich bei der Hand hat. Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht, aus der man erkennt, daß die relativistische Veränderung erst dann eine praktische Rolle zu spielen beginnt, wenn die Geschwindigkeit v des betrachteten Körpers 50 % der Lichtgeschwindigkeit übersteigt.

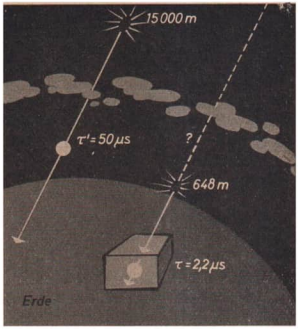
Relativistische Veränderung bei verschiedenen Geschwindigkeiten

v (in Prozenten von $c = 300\,000$ km/s)	$\sqrt{1-(v/c)^2}$	$\frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}}$
0	1,000	1,000
10	0,995	1,005
50	0,866	1,155
80	0,600	1,667
86,6	0,500	2,000
90	0,436	2,294
99	0,141	7,09
99,5	0,0999	10,01
99,9	0,0447	22,36
99,99	0,0141	70,71
99,999	0,00447	223,6
99,9999	0,00141	707,1
100	0	∞

Man ersieht hieraus, daß die Zeitdehnung ganz beträchtliche Werte annimmt, wenn die Geschwindigkeit des betrachteten Bezugssystems der des Lichtes sehr nahe kommt. Für einen Körper, der sich selbst mit Lichtgeschwindigkeit bewegt, wäre $v = c$, woraus $t_0 = \infty \cdot t$ folgt. Die Zeit würde, vom ruhenden Standpunkt aus beurteilt, auf diesem Körper stillstehen, oder noch einfacher: der Zeitbegriff als solcher verliert hier seinen Sinn.

Bei allen Schwierigkeiten, die einem Nachweis der Zeitdilatation im Wege zu stehen scheinen, gibt es doch wenigstens ein entscheidendes Experiment, das jeden Zweifel an ihrer Realität beseitigt. Wir haben auf S. 131 erfahren, wie man die mittlere Lebensdauer des μ-Mesons bestimmt, indem man seinen Zerfall in einem Bleiblock beobachtet. Hier wird das Meson kurz vor seinem Zerfall so stark abgebremst, daß man es praktisch als ruhend betrachten kann. In der freien

[49])
$$t_0 = \frac{t}{\sqrt{1-\left(\frac{0{,}8\,c}{c}\right)^2}} = \frac{t}{\sqrt{1-0{,}64}} = \frac{t}{0{,}6} = 1{,}67\,t\,.$$

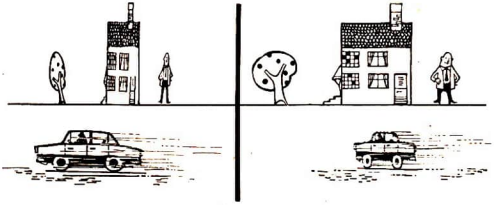


129. Zeitdehnung des zerfallenden μ-Mesons

Atmosphäre, vor dem Eintritt in die Meßapparatur, läuft es jedoch nahezu mit Lichtgeschwindigkeit. Wenn nun die mittlere Lebensdauer $\tau = 2{,}16\ \mu s$ beträgt, könnte es in dieser Zeit nur die ziemlich kurze Strecke von $c \cdot \tau = 2{,}16 \cdot 10^{-6}\ s \cdot 3 \cdot 10^{8}\ m/s = 648\ m$ zurücklegen (Bild 129). Das allerdings steht in krassem Widerspruch zur Tatsache, daß die Mesonen viele Kilometer hoch in der Atmosphäre entstehen. Sie könnten die Erdoberfläche niemals erreichen und müßten schon in großen Höhen ihres unvermeidlichen physikalischen Todes gestorben sein. Von den beiden Faktoren $c \cdot \tau$ kann aber höchstens die mittlere Lebensdauer falsch sein, und die Relativitätstheorie gibt sofort die richtige Antwort: Das zerfallende Meson ist eine Uhr, allerdings eine, die in ihrem Leben nur einmal tickt. Infolge ihrer dem Wert c nahekommenden Geschwindigkeit läuft sie bedeutend langsamer als im abgebremsten Zustand. Wie die in großer Zahl angestellten Beobachtungen zwischen großen Höhenunterschieden im Gebirge erwiesen haben, entspricht die Verlängerung der Lebensdauer genau der Gleichung (76). Die Zeitdehnung ist daher ebenso real wie die Schwerkraft. Sie ist kein Rechenkunststück, sondern beruht auf einem Naturgesetz, an dem es nichts zu rütteln gibt.

Die Längenkontraktion

Kehren wir noch einmal zum Experiment mit dem Auto zurück, an Hand dessen wir uns die Wirkung der Zeitdilatation deutlich machten! Für den Insassen des Wagens ergab sich eine Verkürzung der Fahrzeit um den Faktor $\sqrt{1 - \beta^2}$. Da die von ihm benutzte Uhr nach seinen Begriffen vollkommen normal geht, wird ihm eine andere Deutung des Versuches viel näher liegen. Er kann mit vollem Recht sagen: „Daß meine Uhr richtig geht, dafür verbürge ich mich! Es ist ein erstklassiges Markenfabrikat, und der Garantieschein ist noch nicht einmal abgelaufen. Folglich kann der Abstand der Kilometersteine nicht stimmen. Während ich vorbeifahre, rücken sie auf eine mir allerdings unerklärliche Weise enger zusammen. Dann ist es vollkommen klar, daß die von mir gestoppte Zeit kürzer ausfallen muß.“



130. Längenkontraktion von zwei verschiedenen Standpunkten aus betrachtet

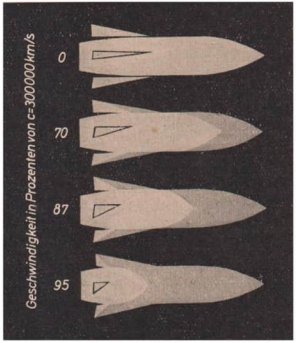
Die Einsteinsche Theorie kann nicht umhin, dem Autofahrer recht zu geben. Ebensowenig wie es eine absolute Zeit gibt, existiert ein absolutes Längenmaß. Nicht nur die Zeit, sondern auch die Länge eines Gegenstandes ist ein relativer Begriff. Beide hängen ab von der Relativgeschwindigkeit, die zwei Bezugssysteme gegeneinander haben. Von einem jeden Paar gegeneinander bewegter Bezugssysteme kann man aber immer annehmen, daß sich eines von beiden im Ruhezustand befindet. Welches man hierfür auserwählt, ist gleichgültig. Der Mann im Auto hat den Eindruck, daß die Kilometersteine nur so an ihm vorüberflitzen, während er selbst ruhig am Steuer sitzt. Auch physikalisch betrachtet macht es gar nichts aus, wenn man seinen Wagen als ruhend und das System der Kilometersteine als bewegt annimmt. Kurzum, bezeichnet man den von der Straßenbauverwaltung festgelegten Abstand der Steine mit l, so verkürzt sich dieser für den Autofahrer auf den Betrag l_0. Man nennt diese Erscheinung *Längenkontraktion.*

(77) *Relativistische Längenkontraktion:* $$l_0 = l\sqrt{1-\beta^2}$$

Aber auch der Mann am Straßenrand bemerkt bei genauem Hinsehen etwas Seltsames: das Auto schiebt sich in seiner Bewegungsrichtung wie eine Ziehharmonika zusammen (Bild 130). Denn alle Relativität beruht auf Gegenseitigkeit. Kein Gegenstand auf dieser Welt, auch nicht das beim Deutschen Amt für Meßwesen liegende Urmeter, darf behaupten, eine absolute Länge zu besitzen.

Diese Längenänderung wurde bereits vor Einstein von dem Holländer Lorentz im Jahre 1882 vermutet und wird daher auch Lorentzkontraktion genannt. Es gelang ihm damals, damit den Michelsonschen Versuch zu erklären, indem er annahm, daß sich der in der Bewegungsrichtung der Erde liegende optische Arm des Apparates um den Faktor $\sqrt{1-\beta^2}$ verkürzt. Doch erst Einstein stellte den Gesamtzusammenhang mit den übrigen Gesetzen seiner umfassenden Theorie her.

Mit einem Blick auf die Tabelle S. 148 stellen wir zu unserer Beruhigung wieder fest, daß die Längenkontraktion im gewöhnlichen Leben keine Rolle spielt. Erst bei Geschwindigkeiten, die mit der des Lichtes vergleichbar werden, wirkt sie sich zahlenmäßig aus (Bild 131). Am schlimmsten wird es, wenn man annimmt, daß sich ein Körper mit Lichtgeschwindigkeit bewegt. Dann wird vom ruhenden Standpunkt aus gesehen, $\beta = \frac{c}{c} = 1$ und der Radikand gleich 0. Der Körper muß



131. Betrag der Längenkontraktion bei Annäherung an die Lichtgeschwindigkeit

zu einer in der Bewegungsrichtung unendlich dünnen Platte zusammengequetscht erscheinen – wenn es möglich wäre, ihm diese Geschwindigkeit zu erteilen.

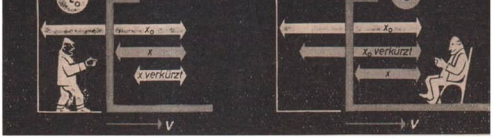
Nachdem wir jetzt über die eigentümlichen Veränderungen von Länge und Zeit Bescheid wissen, können wir auch einen vorsichtigen Versuch machen, diese Verhältnisse in einigen Gleichungen darzustellen. Wenn man die Lage eines Punktes in zwei gleichförmig zueinander bewegten Bezugssystemen in der einfachen klassischen Art beschreibt, so benutzt man die auf S. 140 besprochene Gleichung der Galileitransformation (75)

$$x = x_0 - v\,t.$$

Berücksichtigt man aber den Umstand, daß sich der Abstand x im bewegten System verkürzt, so muß man schreiben

$$(78)\quad x\sqrt{1-\beta^2} = x_0 - v\,t_0.$$

Man muß also ausdrücklich t_0 anstatt t setzen; denn es ist das Zeitmaß anzuwenden, das im ruhenden System gilt, von dem aus beurteilt der Abstand x nach der Längenkontraktion kleiner wird. Zum Unterschied gegenüber der Galileitransformation (75) handelt es sich hier um eine Gleichung der *Lorentztransformation*.



132. Zur Lorentztransformation

Bild 132 zeigt schematisch, wie das System S vom Beobachter davoneilt. Die im bewegten System liegende Koordinate x eines gegenüber dem Beobachter festliegenden Punktes erscheint ihm verkürzt und steht auf der linken Gleichungsseite.
Nunmehr wechseln wir aber unseren Standpunkt und denken uns in das bewegte System S hineinversetzt. Würden wir die gewöhnliche Galileitransformation zugrunde legen, so wäre nichts weiter zu tun, als Gleichung (75) umzustellen: $x_0 = x + vt$; denn hier bleiben die Werte x_0, x und t konstant, und es besteht keinerlei Veranlassung, an der Zuverlässigkeit der verwendeten Maßstäbe zu zweifeln. So einfach geht es aber bei der entsprechenden Lorentztransformation nicht. Es muß ja bedacht werden, daß vom Standpunkt S aus gesehen sich jetzt der Abstand x_0 verkürzt und dafür der Abstand x unverändert bleibt. Zweitens kann man nicht mehr das im System S_0 gültige Zeitmaß verwenden, sondern muß dasjenige verwenden, das im System S gilt. Die verbesserte Form der Gleichung $x_0 = x + vt$ lautet also

$$(79)\quad x_0 \sqrt{1-\beta^2} = x + v\,t.$$

Die weitere Fortsetzung solcher Überlegungen muß dann zu Ergebnissen führen, die keinerlei Widersprüche mit der Erfahrung mehr enthalten. Andererseits führen die neuen Gleichungen wieder zu den Galileitransformationen zurück, wenn man Probleme langsam bewegter Objekte damit behandelt. Die klassischen Umrechnungsformeln sind daher nicht falsch, sondern ergeben sich lediglich als Grenzfälle, und zwar dann, wenn es sich um Geschwindigkeiten handelt, die viel kleiner als die Lichtgeschwindigkeit sind. Man erkennt das sofort daran, daß der Wurzelausdruck $\sqrt{1-\beta^2}$ gleich 1 wird, wenn der Bruch $\beta = \frac{v}{c}$ sehr klein wird. Außerdem erübrigt es sich dann, zwischen zwei verschiedenen Zeitmaßen t_0 und t zu unterscheiden.

Die Massenzunahme

Länge und Zeit sind aber bei den verschiedensten physikalischen Vorgängen untrennbar mit der Masse verknüpft. Es gibt keine Zeit „an sich". Sie schwebt nicht als Spukgestalt mit drohend erhobener Sense und einer dicken Warze auf der Nase über den Dingen, um mit hämischem Grinsen die Welt zu regieren. Sie existiert nur in enger Verkettung mit der Materie. Diese wechselseitige Beziehung zwischen Länge, Zeit und Masse bringt es auch mit sich, daß die Masse m eines Körpers keine absolut feststehende Größe ist. Bei der Anwendung seiner Theorie auf die Dynamik bewegter Körper fand Einstein die

$$(80)\quad \textit{relativistische Massenzunahme:}\quad m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}\,.$$

Die Gleichung sagt aus, daß die Masse m_0 eines mit der Geschwindigkeit v bewegten Körpers, von einem ruhenden Standpunkt aus beurteilt, in entsprechender Weise zunimmt (Bild 133). m_0 be-

133. Relativistische Massenzunahme

zeichnet man dabei als *Ruhmasse*. Die sogenannte *Impulsmasse* m wird mit der Ruhmasse identisch, wenn ihre Geschwindigkeit v gegenüber der Lichtgeschwindigkeit c sehr klein ist. Dann ist nämlich $\beta = \frac{v}{c}$ und erst recht β^2, eine so kleine Zahl, daß man sie gegenüber der 1 vernachlässigen kann und $m = m_0$ wird. Daher ist diese Massenzunahme unter gewöhnlichen Verhältnissen nicht bemerkbar.
Doch gibt es heute bereits Zweige der Technik, wo man sich mit dieser Massenzunahme ernsthaft auseinandersetzen muß. In den Teilchenbeschleunigern der Kernphysik beispielsweise erlangen die erzeugten Protonen, Elektronen usw. so große Geschwindigkeiten, daß ihre nach dieser Formel exakt errechenbare Massenzunahme beim Bau und Betrieb sorgfältig zu berücksichtigen ist, wenn sie überhaupt funktionieren sollen. Wollte man einem Körper die Lichtgeschwindigkeit c erteilen, so würde die Masse – da der Nenner von Gleichung (80) in diesem Fall gleich Null wird – unendlich groß werden. Das würde aber einen unendlich großen Energieaufwand voraussetzen, was natürlich technisch und physikalisch ein Unding ist. Hieraus folgt wiederum, daß sich kein Körper bis zur Lichtgeschwindigkeit beschleunigen läßt.
Geradezu weltumwälzend ist jedoch die letzte Folgerung, die Einstein aus seiner Theorie zog. Es ist die mit Gleichung (74) bereits genannte Masse-Energie-Beziehung $E = m\,c^2$. Einstein hat damals, als er sie entdeckte, nur dunkel ahnen können, welche Bedeutung ihr einst zukommen sollte, indem er 1906 schrieb: „Es ist nicht ausgeschlossen, daß bei Körpern, deren Energiegehalt in hohem Maß veränderlich ist (z. B. bei den Radiumsalzen), eine Prüfung der Theorie gelingen wird."

Relativistische Raumfahrt

Die Ergebnisse der speziellen Relativitätstheorie sind ebenso real wie erstaunlich. Wie kaum andere Erkenntnisse der modernen Physik sind sie dazu angetan, die Phantasie zu beflügeln und ungeahnte wissenschaftlich-technische Entwicklungsmöglichkeiten vorauszusagen. Dazu kommen die großartigen Erfolge der Raumfahrt, die zu weiteren kühnen Erwartungen berechtigen. Es ist auch gar nicht zu bezweifeln, daß sich Aktionsradius, Tragfähigkeit und Zuverlässigkeit der Raumfahrzeuge immer mehr steigern werden. Wenn es jedoch darum geht, auch mutmaßlich existierende Planeten anderer Sterne aufzusuchen, stößt man zuallererst auf die Schwierigkeit,

daß diese viele Lichtjahre, gegebenenfalls Hunderte von Lichtjahren, entfernt sind. Die Reisezeiten werden dann undiskutabel lang und die Lebensdauer eines Menschen bei weitem überschreiten.

Doch dem Denken sind keine Grenzen gesetzt, und sehr rasch findet sich der rettende Ausweg. Man braucht nur Raketen genügend hoher Geschwindigkeit zu bauen. Da aber die Lichtgeschwindigkeit nicht erreichbar ist, wird man bescheiden sein und sich beispielsweise mit 99,5 % des c-Wertes begnügen. Damit kämen die Reisenden zugleich in den angenehmen Genuß der Zeitdilatation. Weil alle Vorgänge in diesem Raumschiff dann 10 mal langsamer ablaufen (s. Tabelle S. 148), würde in diesem Falle die 10 Jahre betragende Reisezeit nach dem Stern Proxima Centauri (nächstgelegener Fixstern, S. 68) für die Passagiere nur 1 Jahr dauern. Bei ihrer Rückkehr zur Erde fänden sie allerdings die dort gebliebenen Menschen um 20 Jahre gealtert vor. Das wäre nicht weiter schlimm, wenn die Geschichte nicht noch einige Haken hätte.

Es gibt nämlich keinen Raketentreibstoff, mit dessen Hilfe man auch nur annähernd die Lichtgeschwindigkeit erreichen kann, denn die Ausströmgeschwindigkeit muß dann ebenfalls der Lichtgeschwindigkeit sehr nahe kommen. Nur eine Möglichkeit besteht noch: der Treibstoff müßte nicht in Form von Gasen, sondern in Form von Strahlungsquanten, die ja selbst Lichtgeschwindigkeit besitzen, die Antriebsdüsen verlassen. Da man die Quanten elektromagnetischer Strahlung auch Photonen nennt, handelt es sich also um den Bau einer *Photonenrakete*. Wie aber soll man diese Photonen produzieren?

Die theoretische Höchstgrenze, bis zu der man Masse auf dem Weg von Kernreaktionen in Strahlungsenergie umsetzen könnte, beträgt noch nicht einmal 1 %. Auf S. 114 hatten wir den Massendefekt bei der Heliumsynthese berechnet und gefunden, daß er $\frac{0{,}03}{4{,}03} = 0{,}75\,\%$ ausmacht. Der Photonentreibstoff müßte aber eine hundertprozentige Umwandlung von Masse in Energie ermöglichen, andernfalls wäre das Verhältnis zwischen Start- und Leermasse (S. 25) noch viel ungünstiger, als es ohnehin schon ist. Man hat ausgerechnet, daß mit derartigen Kernreaktionen selbst bei Ausnutzung der entstehenden stofflichen Reaktionsprodukte maximal einige Zehntel der Lichtgeschwindigkeit erreichbar sind, was aber hinsichtlich der Zeitdehnung völlig uninteressant ist.

So wäre denn der letzte Ausweg die vollständige Zerstrahlung von Elementarteilchen, die man in Einzelfällen durchaus beobachten kann. Es handelt sich dann darum, einen größeren Vorrat von beispielsweise positiven Protonen und negativen Antiprotonen zu „tanken" und diese dann aufeinander einwirken zu lassen. Dabei verschwindet die Masse dieser Teilchen unter gleichzeitiger Entstehung entsprechend energiereicher γ-Strahlungs-Quanten. Nach dem Impulssatz haben diese paarweise aber entgegengesetzte Richtung, so daß man vor der kitzligen Frage steht, wie man diesen Photonen eine einheitliche Richtung geben soll. Außerdem benötigt man nach dem heutigen Stand der Kerntechnik mindestens 10^6 Protonen, um ein einziges Antiproton zu erzeugen, und man würde mit einer der heute existierenden Großanlage viele Milliarden Jahre brauchen, um nur ein Gramm Antiprotonen herzustellen. Völlig unbeantwortet bleiben dabei natürlich alle mit der technischen Verwirklichung zusammenhängenden Detailfragen.

So läßt sich mancher gutgemeinte Gedanke und manches utopische Projekt gar leicht entwerfen. Einwände gegen seine praktische Durchführung lassen sich ebenfalls leicht zerstreuen mit dem großzügigen Argument, wie doch so vieles heute Erkannte und Erreichte früher für absolut unmöglich gehalten wurde. Wenn aber die Photonenrakete und die mit ihrer Hilfe erfolgende Reise

zu anderen Sternen einmal möglich sein sollte, so werden jedenfalls die heute bekannten physikalischen Vorgänge und Gesetze nicht dazu ausreichen. Man muß schon hoffen, daß völlig neue Entdeckungen und physikalische Effekte dazu verhelfen werden. An dem nötigen Optimismus soll es uns nicht fehlen!

Nicht zu vergessen sind schließlich die mit der Nahezu-Lichtgeschwindigkeit verbundenen Gefahren. Wie der sowjetische Gelehrte Prof. RYTOW eingehend darlegte, bestehen diese in dem mit ungeheurer Wucht erfolgenden Zusammenprall des Raumschiffes mit Mikrometeoriten, kosmischen Staubteilchen und dem interstellaren Wasserstoff. Bei der Geschwindigkeit $v = 260000$ km/s würde beim Zusammenstoß mit einem nur 1 mg schweren Teilchen die Energie von 21 Milliarden Kalorien frei werden,[50]) die ausreichen würde, 10 m^3 Eisen sofort in Dampf zu verwandeln. Es ist ausgeschlossen, daß auch das stabilste Raumschiff eine solche Katastrophe überstehen wird.

Noch unmittelbarer und vernichtender wäre die Wirkung des interstellaren Wasserstoffs. Bei der angenommenen Geschwindigkeit würde er sich physikalisch wie Protonen der Energie 10^9 eV, d. h. ebenso wie eine kosmische Strahlung dieser Energie, verhalten. Bei der Dichte des interstellaren Wasserstoffs von 1 Atom/cm^3 (S. 117) ergäbe das nach der Berechnung von Prof. Rytow einen Ansturm von 10^{10} Teilchen je cm^2 und Sekunde. Diese das 10milliardenfache des natürlichen Niveaus betragende Strahlung würde alles Leben im Raumschiff augenblicklich abtöten, selbst wenn es gelingen sollte, den sonstigen damit verbundenen Zerstörungs- und Verbrennungsprozessen vorzubeugen.

Das Projekt der Photonenrakete hat bei seinem Auftauchen viel Aufsehen in der ganzen Welt hervorgerufen. Die Gründe seiner Unmöglichkeit sind aber fast noch interessanter als all das, was es zu versprechen schien.

[50]) Bei $v = 260000$ km/s verdoppelt sich die gegebene Ruhmasse $m_0 = 1$ mg wegen $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{2{,}6}{3}\right)^2}} = \frac{m_0}{0{,}5}$. Es wird beim Zusammenstoß derselbe Energiebetrag frei, der zur Bildung dieses Massenzuwachses erforderlich wäre, d. h. $W = m\,c^2 = 10^{-6}\,\mathrm{kg} \cdot 3^2 \cdot 10^{16}\,\mathrm{m^2/s^2} = 9 \cdot 10^{10}$ Nm (Ws) $= 21{,}5 \cdot 10^9$ cal.

Letzte Perspektiven

Galaxien

Das Weltganze in seiner Struktur richtig zu erfassen hat dem Menschen viel Mühe gekostet, und es ist nicht abzusehen, welche Arbeit ihm überhaupt noch bevorsteht. Einen Bereich von, wie uns dünkt, ansehnlicher Breite können wir gut übersehen. Er reicht von der Kenntnis der Elementarteilchen, aus denen sich die Atome zusammensetzen, bis zur Erforschung des Aufbaus unseres Milchstraßensystems. Jedes Vorwärtsschreiten, vom Kleineren bis zum Größeren hin, läßt einen stufenweisen Aufbau der Materie vom Elementaren zum Komplizierten erkennen, und alles Elementare ist wieder im höher Entwickelten enthalten. Wir sahen, wie eng kernphysikalische Gesetze und solche der Relativitätstheorie mit kosmischen Fragen verknüpft sind. Ohne Kenntnis der Newtonschen Axiome könnten wir die Bewegung der Sterne nicht verstehen, ohne Atomtheorie blieben uns entscheidende Vorgänge auf und in den Sternen ein Rätsel. Der Erkenntnisprozeß ist aber noch längst nicht abgeschlossen. Noch wissen wir nicht, an welcher Stelle der Physik der nächste größere Durchbruch zu noch tieferen Einsichten erfolgen wird und welche Veränderungen für unser gesamtes Weltbild daraus erwachsen werden. Gar manche heute noch liebevoll gepflegte Theorie kann dereinst veraltet sein.

Was sich aber nicht ändern wird, sind die Tatsachen, die Beobachtungen und Meßergebnisse, festgehalten in Zahlen und Tabellen, auf Registrierstreifen und photographischen Platten. Ehe wir aber auf eine der merkwürdigsten Tatsachen eingehen, die in den letzten Jahrzehnten Anlaß zu besonders kühnen Spekulationen über die Beschaffenheit der Welt Anlaß gaben, sei nur noch kurz angedeutet, wie der uns gegenwärtig bekannte Teil des Universums aufgegliedert ist.

Daß unsere Sonne mitsamt dem Planetensystem eine von den 100 Milliarden Sternen des Milchstraßensystems ist, wissen wir bereits. Dieses für unsere Begriffe riesenhafte Gebilde schwebt wie ein einsame Insel im Raum und mag aus der Ferne wie ein spiralförmiges Nebelgebilde aussehen. Außer diesem Sternensystem gibt es aber noch andere, die ihm zum Teil sehr ähnlich sind. Man nennt sie *Galaxien*, obwohl mit der Bezeichnung „Galaxis" ursprünglich nur unser eigenes System gemeint war. Eine davon kann man mit bloßem Auge als schwachen Nebelfleck am nördlichen Himmel sehen. Es ist der Andromedanebel, der in seiner Form – einer diskusartigen, in der Mitte verdickten Scheibe mit spiraligen Armen – unserer Galaxis wohl recht ähnlich ist (Bild 134). Seiner Form wegen bezeichnet man ihn als *Spiralnebel*. Auch Größe, Leuchtkraft, Masse und Rotationsdauer scheinen mit unserem Milchstraßensystem weitgehend übereinzustimmen. Er enthält etwa 250 Milliarden Sonnenmassen, seine Entfernung wird auf etwa 2 Millionen Lichtjahre

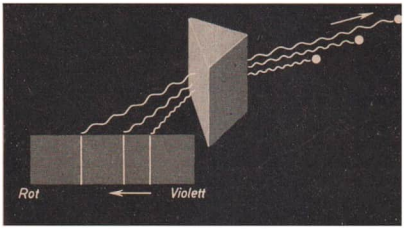
134. Andromedanebel

geschätzt. Der Andromedanebel ist daher das am weitesten entfernte Himmelsobjekt, das mit dem unbewaffneten Auge gesehen werden kann.
Es muß hier bemerkt werden, daß die Bezeichnung „Nebel" in diesem Zusammenhang etwas ganz anderes bedeutet als bei den schon erwähnten, meist formlosen Ansammlungen interstellarer Materie innerhalb des Milchstraßensystems. Das nebelartige Aussehen der Galaxien ist nur die Folge ihrer gewaltigen Entfernung, in der die Lichter der einzelnen Sterne zu einem diffus leuchtenden Schleier zusammenfließen. Erst mit den modernsten Instrumenten ist es gelungen, sie wenigstens teilweise in Einzelsterne aufzulösen.
Nicht alle Galaxien haben Spiralform. Manche sind kugelförmig, elliptisch oder haben zwei gekrümmte Balkenarme. Trotz der gewaltigen Abstände, die die Galaxien voneinander trennen, ist ihre Anzahl unfaßbar groß. So weit die Fernrohre heute reichen, mögen es an die 100 Millionen sein. Aus der großen Entfernung sieht man auch, daß fast alle Galaxien einen deutlich abgegrenzten *Kern* haben, den wir wegen der besprochenen Dunkelwolken in unserer eigenen Galaxis noch nie zu Gesicht bekommen haben. Im Andromedanebel hat er den relativ kleinen Durchmesser von etwa 25 Lichtjahren. Der Kern der Galaxien stellt eine besonders dichte Anhäufung von Millionen von Sternen dar und ist wiederum eigentümlichen und besonderen Gesetzen unterworfen. Ihm entströmen große Massen interstellarer Gase und Staub, wie es auch bei dem nicht

direkt sichtbaren Kern unseres Milchstraßensystems mit Hilfe der 21-cm-Strahlung (S. 119) festgestellt werden konnte.
Ein besonderes Gesetz, nach dem die Galaxien im Raum verteilt sind, konnte bisher noch nicht aufgefunden werden. Man kann lediglich feststellen, daß sie in mehr oder weniger großen Gruppen oder Haufen völlig unregelmäßig im Kosmos verstreut sind. Auch unser Milchstraßensystem bildet zusammen mit dem Andromedanebel und den schon erwähnten Magellanschen Wolken eine solche lokal abgegrenzte Gruppe.

Die Nebelflucht

Wenn soeben gesagt wurde, daß der Anordnung der Galaxien im Raum kein irgendwie auffallendes ordnendes Prinzip zugrunde liegt, so trifft das wohl für die Art ihrer Verteilung zu. Hinsichtlich ihrer Bewegung aber machte der amerikanische Astronom E. P. Hubble (1889···1953) eine aufsehenerregende Entdeckung. Bei der spektroskopischen Untersuchung des von fernen Galaxien ausgesandten Lichtes stellte er fest, daß die darin enthaltenen Spektrallinien nicht an der richtigen Stelle liegen, sondern nach dem roten Ende des Spektrums hin verschoben sind. Man kennt nun in der Physik zwei Ursachen, die eine *Rotverschiebung* zur Folge haben können. Die eine beruht auf der Wirkung starker Schwerefelder auf Lichtquanten, die von Sternen großer Masse emittiert (ausgesandt) werden (S. 168). Sie ist nach der allgemeinen Relativitätstheorie leicht berechenbar, scheidet aber wegen ihres geringen zahlenmäßigen Betrages für die Deutung der Hubbleschen Beobachtung aus.



135. Die Rotverschiebung der Spektrallinien ist der Entfernung proportional

So verbleibt als zweitmögliche Ursache noch der bereits betrachtete Dopplereffekt (S. 80). Da sich mit seiner Hilfe so viele wertvolle astronomische Daten haben errechnen lassen, weshalb sollte dieses Prinzip nicht auch in diesem Falle anwendbar sein? Es drängt sich somit die Antwort auf, daß alle Galaxien sich von uns wegbewegen mit einer Geschwindigkeit, die um so größer sein muß, je stärker ihre Spektrallinien nach Rot hin verschoben sind. Das Aufregendste der Ent-

deckung ist aber der zweite Umstand: Der Betrag der Rotverschiebung ist proportional zur jeweiligen Entfernung r des beobachteten Sternsystems (Bild 135). Damit muß auch die *Fluchtgeschwindigkeit* v selbst proportional zur Entfernung r sein. Man kann sie deshalb durch das Produkt

$$(81)\ \textit{Fluchtgeschwindigkeit:} \qquad v = \alpha \cdot r$$

darstellen, wobei der Proportionalitätsfaktor die sogenannte

$$(82)\ \textit{Hubble-Konstante:} \qquad \alpha = 0{,}25 \cdot 10^{-17}\ 1/\mathrm{s}$$

ist.
Zum Verständnis ihrer Bedeutung diene das folgende Beispiel. Eine bestimmte Galaxie habe die Entfernung $r = 14 \cdot 10^6\ \mathrm{pc} = 43{,}2 \cdot 10^{19}\ \mathrm{km}$. Das ergibt nach (81) eine Fluchtgeschwindigkeit von

$$v = 0{,}25 \cdot 10^{-17}\ 1/\mathrm{s} \cdot 43{,}2 \cdot 10^{19}\ \mathrm{km} = 1080\ \mathrm{km/s}.$$

Auf S. 81 aber hatten wir für die relative Änderung der Wellenlänge λ infolge des Dopplereffektes den Ausdruck (61) gefunden:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}.$$

Setzen wir hier für die Geschwindigkeit des davoneilenden Objektes den Ausdruck (81) ein, so folgt die

$$(83)\ \textit{Rotverschiebung der Nebelflucht:}\ \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\alpha \cdot r}{c}.$$

Das am weitesten von uns entfernte bisher festgestellte Objekt ist ein Nebel, der als kleiner, verwaschener Fleck mit dem erwähnten 5-m-Spiegel photographiert wurde. Auf Grund der Linienverschiebung ergab sich eine Fluchtgeschwindigkeit von 144000 km/s, d. h. etwa 46 % der Lichtgeschwindigkeit. Daraus errechnet sich[51]) eine Entfernung von 6 Milliarden Lichtjahren. Diese Rotverschiebung $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c} = 0{,}46$ bedeutet für eine z. B. im Violetten bei $\lambda = 380\ \mathrm{nm}$ liegende Spektrallinie den Betrag $\Delta\lambda = 380\ \mathrm{nm} \cdot 0{,}46 = 175\ \mathrm{nm}$. Sie liegt im Spektrum dieses Nebels an der Stelle, wo unter irdischen Verhältnissen die grüne Linie $(380 + 175)\ \mathrm{nm} = 555\ \mathrm{nm}$ erscheint.
Über den Hubble-Effekt ist schon sehr viel geschrieben, nachgedacht und philosophiert worden. Von vornherein ist zu sagen, daß der Betrag der Konstanten α nur einer ungefähren Schätzung

[51]) $$r = \frac{v}{\alpha} = \frac{144000\ \mathrm{km/s}}{0{,}25 \cdot 10^{-17}\ 1/\mathrm{s}} = 5{,}76 \cdot 10^{22}\ \mathrm{km} = 6 \cdot 10^9\ \text{Lichtjahre}.$$

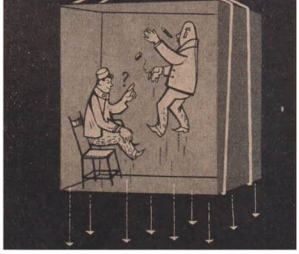
entspricht, also keineswegs sehr genau bekannt ist. Bei großen Fluchtgeschwindigkeiten ist zudem Formel (61) für den Dopplereffekt nach der Relativitätstheorie zu korrigieren. Wegen der großen Schwierigkeit, größere Entfernungen als 16 pc genau zu bestimmen, nimmt auch die Unsicherheit des Betrages α entsprechend zu, so daß man äußerst vorsichtig sein muß, weitere Konsequenzen aus der Fluchtbewegung zu ziehen.
Nehmen wir sie als gegebenes Faktum an, so verhalten sich die Galaxien demnach umgekehrt wie ein Einbrecher, dem die Polizei auf den Fersen ist. Je weiter sie von uns entfernt sind, desto schneller laufen sie davon. Ihre Geschwindigkeit nimmt je Mpc (Megaparsec) um etwa 75 km/s zu. Von uns aus gesehen fliegt das Weltall in radialer Richtung auseinander. Es dehnt sich aus wie eine platzende Granate, und wohin das letzten Endes führen soll, vermag kein Mensch zu sagen.
Hieraus aber zu folgern, das Milchstraßensystem oder gar die Erde seien der Mittelpunkt der Welt, wäre törichte Überheblichkeit. Man muß vielmehr annehmen, daß sich dieses Bild der radialen Fluchtbewegung von jedem beliebigen Standpunkt in der Welt in genau gleicher Weise darbietet wie von der Erde aus. Wie man dies verstehen kann, ist offenbar eine Frage der Geometrie des Universums. Mit ihr müssen wir uns im Zusammenhang mit der allgemeinen Relativitätstheorie noch beschäftigen.

Die Ausgangsposition der allgemeinen Relativitätstheorie

Die *spezielle Relativitätstheorie*, obwohl eines der genialsten Gedankengebäude, das je ein Mensch geschaffen hat, befriedigte Einstein selbst noch nicht. Vor allem war es der Umstand, daß die ihr zugrunde liegenden Formeln der Lorentztransformation nur auf *gleichförmig* bewegte, nicht aber auf *beschleunigte* Bezugssysteme zugeschnitten waren. Dazu gesellte sich noch das ungelöste Problem der Gravitation. Zwar war das Newtonsche Gravitationsgesetz hinlänglich bekannt, und aus diesem Gesetz ließ sich die gesamte Himmelsmechanik mit einer Präzision herleiten, die bis zum heutigen Tage kaum zu wünschen übrig läßt. Dennoch ging Einstein in jahrelanger Arbeit daran, sein Werk zur *allgemeinen Relativitätstheorie* zu erweitern, das zur Lösung beider Grundfragen führen sollte.
Was aber ist ein *beschleunigtes Bezugssystem*? Wenn wir in dem nach außen hin völlig abgeschlossenen Wagen eines vollkommen und erschütterungsfrei fahrenden D-Zuges sitzen, können wir mit keinem Mittel feststellen, ob er sich überhaupt bewegt. Ganz anders aber geht es zu, wenn der Zug *beschleunigt* anfährt oder plötzlich scharf abbremst. Da stürzen Aktentaschen und Koffer aus den Gepäcknetzen, und die im Korridor herumstehenden Reisenden stolpern und fallen sich gegenseitig in die Arme (Bild 136). Man entschuldigt sich mit höflichem Lächeln, weil ja keiner etwas dafür kann, für diese plötzlich aufgetretenen Trägheitskräfte. Nichts weiter als das Beharrungsvermögen ist es, die in jeder Masse schlummernde Trägheit, die mit einem Mal zur Kraft wird, wenn das Bezugssystem seine gleichförmige Bewegung ändert. Solange die Beschleunigung anhält, bleiben auch die Trägheitskräfte wirksam.
Auch in einer rotierenden Kabine sind Kräfte vorhanden, die es im gleichförmig geradeaus fahrenden Zug nicht gibt. Hier ist es die Fliehkraft, die alle Gegenstände von der Drehachse weg nach außen schleudert. Auch das ist eine Trägheitskraft, die dadurch entsteht, daß der Masse eine

136. Beschleunigtes Bezugssystem

Bewegungsart aufgezwungen wird, die ihr nach dem 1. Newtonschen Axiom (S. 15) zuwider läuft.
Der Unterschied zwischen einem gleichförmig bewegten und einem beschleunigten Bezugssystem liegt demnach auf der Hand. Im ersten gelten die Newtonschen Gesetze, z. B. das Trägheitsgesetz, im zweiten aber nicht. Während man gleichförmig bewegte Systeme nicht voneinander unterscheiden kann, verrät sich ein beschleunigtes System sofort durch das Vorhandensein und die Größe der in ihm wirkenden Trägheitskräfte.
Außer der Trägheit zeigt die Masse noch die Eigenschaft der Schwere. Wir haben uns bereits auf S. 32 Gedanken darüber gemacht. Man kann zunächst leicht beweisen, daß auch die *Schwerkraft* nur ein gewöhnlicher Fall von *Trägheitskraft* ist. Versetzen wir uns zu diesem Zweck in den Fahrstuhl eines ziemlich hohen Wolkenkratzers. Gerade will sich unser Begleiter seine Zigarre anzünden, da reißt das Seil, und der Fahrstuhl saust in die Tiefe (Bild 137). Das Gedankenexperiment erscheint zwar ein wenig grausam; doch sorgt eine im Keller eingebaute raffinierte Fangvorrichtung dafür, daß nichts Schlimmes passieren kann. Außerdem sei der Wolkenkratzer so hoch, daß wir genug Zeit haben, um verschiedene Beobachtungen anzustellen.
Sie werden sehr interessant sein. Zuerst bleibt dem Mann vor Schrecken der Mund offen stehen, aber die Zigarre fällt nicht herunter. Sie bleibt vor seinem verblüfften Gesicht in der Luft stehen und wartet geduldig auf das Streichholz. Einfach deswegen, weil Mann und Zigarre mit derselben Beschleunigung in die Tiefe fallen. Der Mann selbst verspürt sein eigenes Gewicht nicht mehr, die

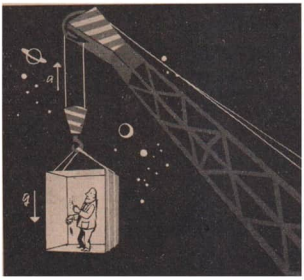


137. Verschwinden der Schwerkraft beim freien Fall

Schwerkraft ist plötzlich verschwunden. Selbst das Streichholz will nicht mehr brennen. Es flammt nur kurz auf, um sogleich wieder zu ersticken. Mit der fehlenden Schwerkraft fällt auch der Auftrieb der heißen Flammengase weg. Wir konstatieren

> *Erstens:* Für den äußeren Beobachter ist die Schwerkraft nach wie vor vorhanden; für den inneren Beobachter ist sie ausgelöscht.

Es herrscht genau der gleiche Zustand wie im schwerelosen Raum irgendwo im Weltall und weitab von allen anziehenden Gestirnen.
Befände sich der Fahrstuhl wirklich da draußen, wo von Anfang an keine Schwerkraft existiert, so könnte man das Experiment fortsetzen. Ein mächtiger aus der Hölle geborgter Riesenkran packt das Seil und zieht den Fahrstuhl mit konstanter Beschleunigung $a = 9{,}81\ \mathrm{m/s^2}$ senkrecht nach oben (Bild 138). Der Erfolg ist erstaunlich. Der Mann fühlt endlich wieder sein Gewicht und



138. Schwerkraft als Trägheitskraft

festen Boden unter den Füßen. Das Streichholz brennt wieder ordentlich. Dafür ist aber jetzt die Zigarre hin, weil sie inzwischen herunterfiel. In der Kabine herrschen vollkommen irdische Verhältnisse, als ob sie fest und ruhig auf der Erde stünde. Und trotzdem, so haben wir es im D-Zug erfahren, sollen dies alles nur Trägheitskräfte sein. Sie täuschen jetzt ein Schwerefeld vor, das gar nicht vorhanden ist. Doch nichts von alledem! Die Schwerkraft ist echt, und wir konstatieren

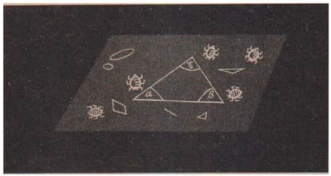
> *Zweitens:* Für den außenstehenden Beobachter ist die Schwerkraft ausgelöscht, für den inneren Beobachter ist sie vorhanden.

Damit haben wir die Position gewonnen, von der Einstein bei der Schaffung der allgemeinen Relativitätstheorie ausging. Daß träge und schwere Masse einander proportional sind (S. 32), ist weder Zufall noch Täuschung, sie sind sogar miteinander identisch. Die Schwerkraft entsteht

und verschwindet, wenn man von einem Bezugssystem zu einem anderen übergeht, das sich relativ beschleunigt dazu bewegt.
Die allgemeine Relativitätstheorie stellt sich daher die Aufgabe, diejenigen Gesetzmäßigkeiten in der Natur herauszufinden, die von *jeder* Wahl des Bezugssystems unabhängig sind. Die Bewegungen der Körper verlaufen dann so, daß man zu ihrer Beschreibung in ruhenden Bezugssystemen *Kräfte* braucht, die in anderen relativ dazu beschleunigt bewegten verschwinden und umgekehrt.
Das von der allgemeinen Relativitätstheorie gestellte Problem ist daher viel schwieriger als das der speziellen; denn dort bestand lediglich die Aufgabe, die Maßstäbe für Länge, Zeit und Masse richtig zu transformieren. Jetzt aber müssen beim Wechsel des Bezugssystems *Kräfte* herauskommen, und zwar genau die richtigen. Der hierzu benötigte mathematische Apparat ist sehr kompliziert und mußte im Laufe der Jahre zum Teil eigens entwickelt werden. Es ergab sich dabei ein System von Feldgleichungen, das den räumlichen und zeitlichen Zustand des Schwerefeldes in ähnlicher, wenn auch in weitaus verwickelterer Form beschreibt wie die Maxwellschen Gleichungen das elektromagnetische Feld. Sie gestatten die Transformation der physikalischen Gesetze in jedes beliebige Bezugssystem, wobei sich u. a. die Gravitation ganz von selbst ergibt.

Der gekrümmte Raum

Die Grundlage unseres Anschauungsvermögens ist die *dreidimensionale euklidische Geometrie*. Mit ihrer Hilfe orientieren wir uns im Raum und können jederzeit anschauliche Modelle von physikalischen Vorgängen herstellen, die uns das Verständnis erleichtern helfen. So ist die Anschauung ein stets willkommenes Hilfsmittel wissenschaftlicher Arbeit. Aber sie ist nicht deren Zweck. Kann man sich anschaulich vorstellen, was Energie ist oder Elektrizität oder ein Meson, das kein Mensch je zu Gesicht bekommen wird? Gewiß nicht. Und dennoch geht man mit all diesen Dingen um, als könne man sie mit Händen greifen. Man kennt alle ihre Schliche und geheimen Beziehungen, beherrscht sie mathematisch bis zur Perfektion und hat sie in den Dienst der Menschheit gezwungen. Sie sind restlos durchschaut und erkannt, aber angeschaut hat sie noch niemand. Wer dennoch auf Anschaulichkeit besteht, wird nie etwas von Physik verstehen.
Ebenso fragt auch die allgemeine Relativitätstheorie nicht nach Anschaulichkeit, sondern es geht ihr um das Bedürfnis, die Welt rechnerisch noch vollständiger als bisher zu erfassen, ohne mit den bereits gesicherten Erkenntnissen in Widerspruch zu geraten. Hierzu mußte Einstein anstelle der euklidischen Geometrie eine andere, allgemeinere verwenden. Es ist eine *vierdimensionale Geometrie* des Raumes, deren Gesetze so beschaffen sind, daß man die neuen Feldgleichungen damit darstellen kann. Auf diese Weise entsteht ein ganz neues Gebilde, das sich dem Zugriff der Anschauung entzieht: der gekrümmte Raum. Um verständlich zu machen, was das ist, sei die be-



139. Die Welt zweidimensionaler Lebewesen

rühmte Sage von den Wanzen berichtet. – Da gab es einst eine Welt, die nur zwei Dimensionen hatte, Länge und Breite (Bild 139). Sie war nichts als eine ungeheure Ebene, und die auf ihr hausenden Lebewesen waren flacher noch als Wanzen. Sie ernährten sich redlich von Vierecken und Kreisen, an Feiertagen gab es Ellipsen und ähnliche Leckerbissen. Sie waren gar nicht so oberflächlich, wie sie aussahen. Im Gegenteil, sie studierten sorgfältig die euklidische Geometrie der Ebene und hatten selbstverständlich längst herausgefunden, daß die Winkelsumme im Dreieck genau 180° beträgt. Von der Physik kannten sie eine ganze Reihe von Bewegungsgesetzen, trieben wohl auch ein wenig Optik und was sich so an bescheidenen Dingen noch anfangen läßt. Sie wußten, wenn man geradeaus läuft, kommt man niemals ans Ende der Welt, die demzufolge unendlich groß war. Die Unendlichkeit ihrer Welt berauschte sie und ward zur Grundlage ihrer Religion.

So lebten diese Wesen mit sich und ihrer plattgedrückten Landschaft in bester Harmonie dahin. Da erschien aber eines Tages ein böser Geist und setzte einige der Wanzen mit niederträchtigem Grinsen auf eine große runde Kugel (Bild 140). Da die Kugel sehr groß war und die Wanzen schlechte Augen hatten, bemerkten sie die äußerst sanfte Rundung ihrer neuen Umgebung nicht. Eifrig eilten sie in ihrer neuen Welt hin und her und beruhigten sich bald wieder, da nichts Auffallendes zu entdecken war.

Erst als sie systematischer und gründlicher an die Erforschung des neuen Landes gingen, machten sie eine unbegreifliche Entdeckung: Die Winkelsumme im Dreieck betrug nicht mehr 180°, sondern je nach Größe des Dreiecks bedeutend mehr. Eine Vermessungsexpedition kam sogar mit dem Ergebnis 270° zurück! Eine wegen ihrer mathematischen Fähigkeiten besonders berühmte Wanze stellte nach langem Nachdenken eine Theorie auf und hielt darüber einen tiefgründigen Vortrag. Die Welt sei gekrümmt. Ob regelmäßig wie eine Kreislinie, ob hyperbolisch oder ganz unregelmäßig, das sei schwierig zu ermitteln. Die Welt sei jedenfalls nicht zwei- sondern dreidimensional. Andächtig hörten alle zu, aber sie verstanden es nicht. Es ging über ihren flachen Horizont. Nur der Respekt vor dem sonst noch unbescholtenen Ruf ihres großen Mathematikers hielt sie davor zurück, ernstlich an seinem Geisteszustand zu zweifeln.

Es ging ja letzten Endes nicht um einige Winkelgrade mehr oder weniger, sondern es stand mehr auf dem Spiel. Die Theorie von der 3. Dimension war geeignet, den Bestand ihrer ganzen Weltanschauung aufs äußerste zu gefährden. Nur widerwillig unternahmen sie schließlich noch eine

140. Zweidimensionale Lebewesen auf der Kugel

letzte Forschungsreise, zu der ihr Mathematiker dringend aufgerufen hatte. Viele Wochen marschierte man geradeaus, und es schien wahrhaftig kein Ende zu nehmen. Einige hatten schon Blasen an den Füßen und schimpften über die Sinnlosigkeit des Unternehmens, daß es nur so eine Art hatte.
Da, eines Tages tauchten am fernen Horizont lebende Wesen auf. Zögernd und mit der letzten Kraft ihrer müden Beine schleppten sie sich heran. Als sie näher kamen, trauten sie ihren Augen nicht; denn, oh Wunder, es waren ihre eigenen Kameraden, die sie vor langen Wochen so leichtsinnig verlassen hatten! Die Freude des Wiedersehens war zuerst unbeschreiblich. Tränengerührt schüttelte man sich die wenigen noch gesundgebliebenen Beinchen. Dann aber bemächtigte sich ihrer eine tiefe Niedergeschlagenheit. Die schöne flache Welt besaß nun doch jenen schrecklichen unfaßbaren Abgrund, den ihr großer Meister prophezeit hatte. Sie waren in die dritte Dimension hineingelaufen und wieder aus ihr herausgekommen, ohne sie selbst zu sehen. Sie war und blieb unanschaulich, unbegreiflich und doch war sie vorhanden.
Was dann noch folgte, ist nicht überliefert. Vielleicht brach unter den Wanzen eine Revolution aus, wobei der Mathematiker selbstverständlich Präsident wurde. Es kann auch sein, daß man nur eine neue Religion gründete. –
Wir auf der Erde kennen solche Sorgen anscheinend nicht. Unser Raum ist von vornherein dreidimensional, und wir fühlen uns wohl darin wie die Fische im Wasser. Doch wenn man an die Wanzengeschichte zurückdenkt, besteht gar kein Grund, einen vierdimensionalen Raum nur aus Prinzip abzulehnen. Die Krümmung der zweidimensionalen Wanzenlandschaft war so beschaffen, daß eine Kugel dabei herauskam. Der Krümmungsradius stimmte überall mit dem Kugelradius überein. Das Maß der *relativistischen Raumkrümmung* ist jedoch nicht beliebig, sondern wird von der Größe und gegenseitigen Entfernung der jeweils anwesenden Massen bestimmt. Die Raumkrümmung ändert sich daher von Punkt zu Punkt und muß in großen massefreien Gebieten praktisch gleich Null sein.
Zufolge der allgemeinen Relativitätstheorie ist der Raum demnach alles andere als ein leeres Nichts. Er kann auch keine bloße „Abschauungsform a priori" im Sinne idealistischer Philosophien sein. Der Raum „an sich" ist ebenso ein Hirngespinst wie die Zeit „an sich". Der wirkliche Raum und die Zeit existieren nur im Zusammenhang mit der Materie. Erst die Verteilung dieser Materie bestimmt die Metrik des Raumes. Mit einem Raum ohne Metrik kann die Physik nichts mehr anfangen. Physik und Geometrie sind in der allgemeinen Relativitätstheorie zu einer untrennbaren Einheit verschmolzen. Wenn schon Lenin sagte: „In der Welt existiert nichts als die sich bewegende Materie, und die sich bewegende Materie kann sich nicht anders bewegen als im Raum und in der Zeit", so hat die allgemeine Relativitätstheorie den Beweis dafür erbracht, daß die Struktur von Raum und Zeit völlig von der Verteilung und Bewegung der Materie abhängt.

Ergebnisse der allgemeinen Relativitätstheorie

Der Gedanke einer *nichteuklidischen Geometrie* ist als solcher nicht neu. Kein geringerer als der geniale Mathematiker Karl Friedrich Gauss (1777···1855) hat sich viel damit beschäftigt. Er korrespondierte ausführlich darüber mit seinem russischen Freund Nikolaus Lobatschewski, der gleichfalls an der alleinigen Gültigkeit der euklidischen Geometrie seine Zweifel hatte. Ob ein

mathematisches System richtig oder falsch ist, entscheidet aber nicht der spekulative Verstand, sondern allein die Erfahrung. Aber weiß es nicht jeder 12jährige Schuljunge, daß die Winkelsumme im ebenen Dreieck 180° betragen muß? Gauß sagte sich jedoch, was im Kleinen zu stimmen scheine, könne im großen Maßstab sehr wohl anders sein. Wenn es eine Raumkrümmung wirklich gibt, muß sie sich in einer Abweichung der Winkelsumme bemerkbar machen.
Im Jahre 1840 entschloß er sich dazu, die Winkelsumme eines großen Dreiecks (Inselsberg – Hoher Hagen – Brocken) mit größter Genauigkeit nachzuprüfen. Er hat nie etwas darüber veröffentlicht, die schadenfrohen Bemerkungen seiner Fachkollegen wären ihm peinlich gewesen; denn er konnte innerhalb der Fehlergrenzen keinerlei Abweichung feststellen. Wir wissen heute, weshalb sein Versuch mißlang. Sein Dreieck war noch viel zu klein. Die relativistische Raumkrümmung kann erst in den riesigen Entfernungen des Kosmos meßbar in Erscheinung treten.

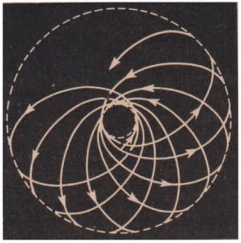
1. Geodätische Linien

Das Licht ist das einzige Mittel, mit dem man nachprüfen kann, ob eine Linie gerade ist oder nicht. Das haben wir (S. 66) schon einmal überlegt. Wenn wir aber jetzt bedenken, daß ein Lichtstrahl auf seiner langen Reise durch das Weltall an den verschiedensten Massen vorbeilaufen muß, kann es niemals einen geraden Lichtstrahl geben. Wenn er bei uns ankommt, ist er bereits in völlig unkontrollierbarer Weise zu einer unregelmäßigen Schlangenlinie verbogen. Eine schmerzliche Enttäuschung für alle Zeichner und Geometer: es gibt keine gerade Linie. Aber sie werden ein wenig gereizt antworten: „Vom Licht haben wir ja auch gar nicht gesprochen. Wir haben, wie schon unser großer Kollege EUKLID, nur gesagt: die Gerade ist die kürzeste Verbindung zweier Punkte!"
Das allerdings gilt nur für die Ebene. Stechen wir zwei Reißzwecken in eine Kugel und verbinden sie mit einem straffgezogenen Faden, so bildet er keineswegs eine gerade Linie. Er legt sich bogenförmig als Teil eines Großkreises an die Oberfläche. Kürzer geht es nicht. Wir stellen also fest, daß die kürzeste Verbindung auf einer gekrümmten Fläche durchaus keine Gerade zu sein braucht, sondern eine *geodätische Linie*. Wenn nun unser gewohnter dreidimensionaler Raum zu einem vierdimensionalen verbogen wird, kann es auch hier keine Geraden mehr geben, sondern nur geodätische Linien. Wir brauchen sie nicht mühsam zu konstruieren. Jeder Körper beschreibt sie, wenn er allein seiner Trägheit folgt. Auch die Wurfparabel eines geschleuderten Steins ist eine geodätische Linie, wie die Kreisbahn der Erde um die Sonne eine ist. Diese geodätischen Linien liegen nicht im Raum fest wie das Netz der Längen- und Breitengrade auf dem Globus. Ihr Verlauf hängt von der Lage der Massen ab, zwischen denen sich der Körper bewegt, und auch von seiner eigenen. Als die ersten Mathematiker die gerade Linie erdachten, glaubten sie, ihr Ideal im Lichtstrahl zu finden und bauten danach ihre Geometrie auf. Von allen möglichen geodätischen Linien des vierdimensionalen Raumes wählten sie unbewußt diejenige, die den anderen gegenüber am wenigsten verbogen ist. Zum Glück ist die Verbiegung unter irdischen Verhältnissen so gering, daß sie keine mathematische Verwirrung anrichtet.

2. Die Periheldrehung des Merkurs

Als Einstein seine Theorie bekanntgab, bestand nur ein Anhaltspunkt, ihre Richtigkeit nachzuprüfen. Es war die schon seit langer Zeit bekannte, aber unerklärliche Periheldrehung des Planeten

141. Periheldrehung des Merkurs (stark übertrieben)

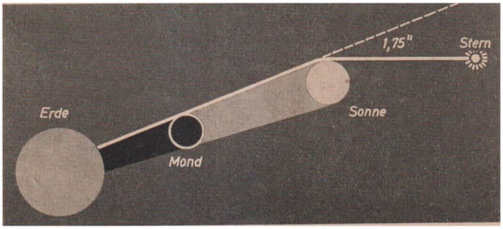


Merkur. Sie besteht darin, daß der sonnennächste Punkt der Bahnellipse innerhalb eines Jahrhunderts um rund 43 Bogensekunden vorrückt. Die Ellipsen schließen sich deshalb nicht völlig, sondern bilden ein sehr enges, rosettenförmiges Schleifensystem (Bild 141). Bei den übrigen Planeten macht sich diese Erscheinung weit schwächer bemerkbar. Man kann sie zunächst mit der speziellen Relativitätstheorie zu erklären versuchen, derzufolge die Masse wegen der erhöhten Geschwindigkeit in Sonnennähe (Flächensatz!) zunimmt. Diese Rechnung ergibt jedoch nur 7″. Die allgemeine Relativitätstheorie liefert aber sofort 43″, in ausgezeichneter Übereinstimmung mit dem beobachteten Wert.

3. Die Lichtablenkung im Schwerefeld

Besonders stark muß ein Lichtstrahl dann gekrümmt werden, wenn er sehr nahe an einer großen Masse vorbeiläuft. Das einzige Versuchsobjekt von genügend großer Masse ist die Sonne. Er wird, wie man auch sagt, im Schwerefeld nach der Sonne hin abgelenkt. Man kann die Ablenkung nach der speziellen Relativitätstheorie berechnen, und zwar auf Grund der Tatsache, daß die Photonen des Lichtes gemäß $W = m\,c^2$ eine ihrer Energie proportionale Masse haben. Man findet dann, daß ein den Sonnenrand passierender Lichtstrahl hyperbelförmig gekrümmt wird (Bild 142), wobei die Asymptoten einen Winkel von 0,87″ bilden. Unter Berücksichtigung der Raumkrümmung liefert die allgemeine Relativitätstheorie dagegen den doppelten Betrag 1,75″.

142. Ablenkung des Sternenlichtes im Schwerefeld der Sonne (stark übertrieben)



Um das nachzumessen, muß man eine Lichtquelle anpeilen, die hinter der Sonne stehen muß. Hierzu verwendet man geeignete Sterne. Das grelle, zudem in der Atmosphäre noch stark gestreute Sonnenlicht überblendet jedoch alle in ihrer Nähe stehenden Sterne derart, daß eine Messung nur dann möglich ist, wenn die Sonnenscheibe während einer totalen Sonnenfinsternis vom Mond verdeckt wird und nur eben die Randpartie mit dem zu beobachtenden Stern freibleibt. Zuvor muß man wiederum die genaue Lage des Sterns bei nicht vorhandener Sonne kennen. Daher photographiert man nachts genau die Stelle des Himmels, wo ein halbes Jahr später die Sonne samt zugehöriger, vorausberechneter Finsternis erscheinen wird. Auf der dann gemachten zweiten Aufnahme muß sich die Position des Sterns entsprechend verschoben haben. Da aber die theoretische Ablenkung nur 1,75 Bogensekunden beträgt, wird die Sache sehr schwierig. Die geringsten Einflüsse, Verwerfung der Gelatineschicht beim Entwicklen der Platten, Änderungen in der Justierung der aufgestellten Geräte, die Abkühlung der Atmosphäre und die damit verbundene Änderung ihrer Strahlenbrechung während der Sonnenfinsternis und viele unvorhergesehene Umstände können alles verderben. Es hat vieljähriger Versuche bedurft, um nachzuweisen, daß die zu beobachtende Verschiebung wenigstens ungefähr dem berechneten Wert entspricht.

4. Die Rotverschiebung im Schwerefeld

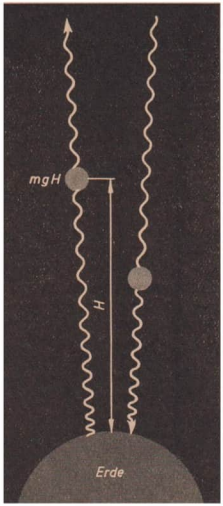
Daß auch dem Licht und jeder anderen elektromagnetischen Strahlung eine *träge Masse* zukommt, zeigte bereits die spezielle Relativitätstheorie mit ihrer grundlegenden Beziehung $W = m\,c^2$. Zeigen aber die Photonen auch die Eigenschaft der *Schwere*? Mit der genauen Messung der Lichtablenkung am Sonnenrand wäre diese Frage bereits eindeutig beantwortet. Leider fehlt es hier noch an der wünschenswerten Präzision. Es gibt aber noch eine zweite Möglichkeit, die Identität von Trägheit und Schwere nachzuweisen. Dies ist die Rotverschiebung der Spektrallinien im Schwerefeld.

Wenn man im Schwerefeld der Erde einen Stein anhebt, muß man eine bestimmte Arbeit aufwenden. Nach Gleichung (41) ist sie gleich dem Produkt aus Gewicht mal Höhe $= m\,g\,H$. Soll ein Körper nun das Schwerefeld ohne Energiezufuhr von außen von selbst überwinden, so kann er dies nur auf Kosten eigenen Energievorrates tun. Einen Stein muß man erst mit der gehörigen Portion kinetischer Energie füttern, eine Rakete mit dem nötigen Treibstoff. Ebenso zehrt auch der Aufstieg des Lichtquants aus dem Schwerefeld an seiner Energie. Wie soll man es auch verlangen, daß ein Lichtstrahl ohne jeden Arbeitsaufwand in die Höhe fährt?

Schickt man demnach ein Lichtquant senkrecht in die Höhe, so muß es dabei die Energie $\Delta W = m\,g\,H$ verlieren, wenn man unter m seine *schwere* Masse versteht (Bild 143). Seine Gesamtenergie ist nach Gleichung (74) $W = m\,c^2$. Hierbei ist m seine *träge* Masse. Dann ist die relative Energieeinbuße $\frac{\Delta W}{W} = \frac{m\,g\,H}{m\,c^2}$. Wenn träge und schwere Masse miteinander identisch sind – und eben das behauptet die allgemeine Relativitätstheorie – darf man den Faktor m herauskürzen. Weiterhin ist die Energie eines Lichtquantes proportional zu seiner Frequenz ν. So stellte es Max Planck im Jahre 1900 mit der Gleichung $W = h\,\nu$ fest. Hierbei ist die Größe h der konstante Proportionalitätsfaktor.[52]) Setzt man also $\Delta W = h \cdot \Delta\nu$ und $W = h\nu$, so kürzt sich auch der Faktor h

[52]) Obwohl wir den Wert der Planckschen Konstante in diesem Zusammenhang nicht benötigen, sei er hier genannt: $h = 6{,}62 \cdot 10^{-34}\ \mathrm{Ws}^2$.

143. Rotverschiebung im Schwerefeld



heraus, und man erhält die

(84) *relative Frequenzänderung des Lichtes beim Durchlaufen des Höhenunterschiedes H:*

$$\frac{\Delta \nu}{\nu} = \frac{gH}{c^2}.$$

Nehmen wir beispielsweise einen Höhenunterschied von 44 m, so ergibt das eine relative Frequenzänderung von $4{,}8 \cdot 10^{-15}$.[53]) Eine solch geringe Frequenzschwankung zu messen muß geradezu utopisch erscheinen. Mit gewöhnlichem Licht ist es von vornherein unmöglich, da alle optischen Spektrallinien aus verschiedenen Gründen eine gewisse Breite haben, also nicht absolut scharf sind. Man kann das etwa mit der technisch notwendigen Bandbreite eines Rundfunksenders vergleichen. Mit Hilfe der γ-Strahlung radioaktiver Substanzen kann man jedoch heute Strahlungen von so großer Linienschärfe herstellen, daß es in jüngster Zeit möglich war, die erwartete Frequenzänderung an senkrecht nach oben oder unten geschickten Strahlen nachzuweisen. Bei zweimaligem Durchlaufen des Höhenunterschiedes von 22 m ergaben die Messungen eine Frequenzänderung von $5{,}1 \cdot 10^{-15} \pm 10\,\%$. Mehr an Genauigkeit kann gewiß nicht verlangt werden.

Nicht so genau waren die bisherigen Versuche mit gewöhnlichem, von Sternen ausgesandtem Licht. Ein etwa von der Sonne kommendes Lichtquant verliert dabei diejenige Energie, die zum Entweichen aus deren Schwerefeld aufzuwenden ist. Sie ist nach Gleichung (43) $\Delta W = \frac{f m_1 m_2}{r_1}$. Wenn m_2 die Masse des Lichtquantes ist, so erhält man dann anstatt von Gleichung (84) den Ausdruck

(85) *relative Frequenzänderung des Lichtes bei der Abstrahlung von einem Stern:* $\frac{\Delta \nu}{\nu} = \frac{f m}{r c^2}$

[53]) $\frac{\Delta \nu}{\nu} = \frac{9{,}81\ \mathrm{m/s^2} \cdot 44\ \mathrm{m}}{9 \cdot 10^{16}\ \mathrm{m^2/s^2}} = 4{,}8 \cdot 10^{-15}.$

Für die Sonne erhält man hiernach den Betrag $2 \cdot 10^{-6}$.[54]) Das konnte auch einigermaßen bestätigt werden. Besonders betont sei, daß dieser Effekt mit dem Dopplereffekt nicht das geringste zu tun hat, der ja nur für Strahlungsquellen gilt, die relativ zum Beobachter in Bewegung sind.

Weltmodelle

Überdenken wir alles bisher über die physikalischen Verhältnisse im Kosmos Gesagte, so drängt sich einem förmlich die Frage auf, wie denn nun die Welt als Ganzes beschaffen sei, wie sie sich darstellt, wenn man sie von einem gleichsam außerhalb der Welt befindlichen Standpunkt aus betrachten könnte. Um es gleich vorwegzunehmen – wir wissen es noch nicht. Gegenüber den in früheren Zeiten von Philosophen und Religionen frei erfundenen Weltsystemen hat diese Frage aber eine grundsätzliche Änderung erfahren. Wir haben soviel wissenschaftliche Erkenntnisse gewonnen, daß die Frage nach dem Bau der Welt nur noch Gegenstand absolut sachlicher Überlegungen sein kann. Hier ist mit metaphysischen Spekulationen nichts mehr auszurichten. An die Stelle pseudowissenschaftlicher Lehren von Weltschöpfung und Weltuntergang trat die moderne Kosmologie, deren Ergebnisse nicht von frommen Wünschen vorweggenommen werden, sondern sich aus nüchternen mathematisch-physikalischen Überlegungen bestimmen. Das Ziel ist dann, ein Weltmodell zu entwerfen, das mit allen nur erreichbaren Fakten in Einklang steht.
Im Mittelalter war das kein großes Problem. Die Entwicklung der Welt war in der Bibel genau beschrieben. Erde, Sonne, Mond und Sterne bildeten ein abgeschlossenes Ganzes. Die Welt war in räumlicher und zeitlicher Hinsicht endlich. Sie hatte ihren bestimmten Grund und ihr bestimmtes Ziel.
Mit dem Aufkommen der durch Galilei und Newton physikalisch begründeten Anschauungen vom Aufbau der Welt änderte sich das. Man fand, daß die Erde nur ein verlorenes Stäubchen war, in einem unendlich großen, von unzähligen Sonnen erfüllten Raum, eingebettet in die ewig dauernde Zeit, ohne Anfang und Ende. Keine Stelle dieses räumlich und zeitlich unendlichen Kosmos kann vor einer anderen den Vorzug verdienen. Von jedem beliebigen Punkt aus muß das Weltall etwa dasselbe Bild darbieten.
Doch sollte man mit Ausdrücken, wie „unendlich" und „ewig", ein wenig vorsichtiger umgehen. Wenn nämlich das Weltall wirklich unendlich groß wäre, müßte es auch unendlich viel Sonnen enthalten. Das Himmelsgewölbe müßte zwangsläufig Punkt für Punkt mit Sternen besetzt sein und seine Gesamtfläche mit der Helligkeit einer Sonne strahlen. Die Dunkelheit des Nachthimmels steht hierzu aber in krassem Widerspruch. Auf dieses Paradoxon hat bereits der deutsche Astronom Olbers (1758···1840) hingewiesen. Ein anderer Widerspruch ergibt sich, wenn man die allgemeine Gültigkeit des Gravitationsgesetzes annimmt – und keinerlei Erfahrung bietet Grund dazu, daran zu zweifeln. Die Anziehungskräfte nehmen mit dem Quadrat der Entfernung ab. Die Größe des Raumes nimmt aber mit der 3. Potenz der Entfernung zu. Wenn die Materie gleichmäßig darin ver-

[54]) Mit der Sonnenmasse $m = 2 \cdot 10^{30}$ kg und dem Sonnenradius $r = 6{,}96 \cdot 10^{8}$ m erhält man $\frac{\Delta \nu}{\nu} = \frac{6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \mathrm{m^3/kg\,s^2} \cdot 2 \cdot 10^{30}\ \mathrm{kg}}{6{,}96 \cdot 10^{8}\ \mathrm{m} \cdot 9 \cdot 10^{16}\ \mathrm{m^2/s^2}} = 2.1 \cdot 10^{-6}$.

teilt ist, nimmt auch die Masse mit der 3. Potenz zu. Dann müßten zwischen zwei beliebigen Raumgebieten gewaltige Gravitationskräfte wirken, deren Größe mit dem Abstand immer mehr zunimmt.
Eine im großen und ganzen in ihrer Ausdehnung und Massenverteilung unveränderliche Welt bezeichnet man als *statisch*. Das Vorhandensein der Gravitationskräfte läßt bei homogener Verteilung der Massen einen solchen statischen Zustand also nicht zu. Dann gibt es nur zwei Möglichkeiten: Das Weltall muß entweder dauernd auseinanderstreben, d. h. expandieren, oder sich immer mehr zusammenziehen, d. h. kontrahieren. Auch die im Rahmen der allgemeinen Relativitätstheorie entworfenen Weltmodelle sind nicht-statischer Art und gestatten ebenfalls nicht die Annahme eines ruhenden Kosmos.
Es gibt allerdings Möglichkeiten und Vorschläge, dennoch zu einem statischen Weltmodell zu gelangen. Ohne hierauf näher einzugehen sei nur bemerkt, daß hierzu stets eine von der Erfahrung her nicht beweisbare Hypothese eingeführt werden muß. Im Bereich der exakten Wissenschaften ist es allerdings nicht Brauch, einem Wunschbild zuliebe Naturgesetze nach Willkür abzuändern oder neu zu erfinden; es sei denn, daß sich derartige Änderungen oder Ergänzungen durch Beobachtung oder Experiment nachprüfen lassen.

Wie die Dinge heute liegen, kann man folgenden Standpunkt vertreten:

1. Alle uns bekannten Naturgesetze gelten im gesamten Kosmos und zu allen Zeiten.

   Vorbehalt: Es ist nicht absolut ausgeschlossen, daß sich im Maßstab größter Entfernungen Abänderungen ergeben, daß z. B. das Newtonsche Gravitationsgesetz nur bis zu gewissen Abständen gültig wäre. Es ist nicht ausgeschlossen, daß sich der Wert fundamentaler Naturkonstanten im Laufe der Zeit ändern kann.

2. Wenn man von allen Einzelheiten absieht und sich auf die im größten Maßstab wichtigsten Objekte, d. s. die Galaxien, beschränkt, ist die Materie in der Welt gleichförmig, d. h. homogen, verteilt. Von jedem beliebigen Standpunkt aus bietet sich das gleiche Gesamtbild.

   Vorbehalt: Es ist nicht ausgeschlossen, daß weitere Forschungen systematische Abweichungen von dieser Homogenität erbringen können.

3. Da die allgemeine Relativitätstheorie als gesichert betrachtet werden kann, ist die Struktur des Weltalls nichteuklidisch und entspricht einem vierdimensionalen gekrümmten Raum.

   Vorbehalt: Welche von den vielen möglichen nichteuklidischen Geometrien das Weltganze richtig darstellt, kann noch nicht entschieden werden.

4. Die beobachtete Nebelflucht entspricht höchstwahrscheinlich einer Expansion des Weltalls.

   Vorbehalt: Eine Ausdehnung braucht nicht immer stattgefunden zu haben. Es könnte sein, daß es auch Phasen der Kontraktion gegeben hat oder geben wird. Die Rotverschiebung könnte auch andere Ursachen haben, die uns heute noch nicht bekannt sind.

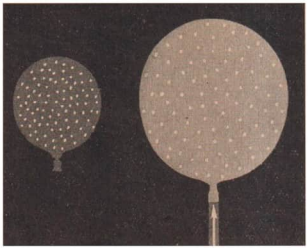
Die expandierende Welt

Sieht man über die genannten und weiteren denkbaren Einwände einmal großzügig hinweg, so kommt man zu folgendem Modell. Die Welt bildet einen vierdimensionalen, in sich geschlossenen Raum und ist somit von endlicher Größe. Gleichwohl hat der unserer Anschauung zugängliche dreidimensionale Raum nirgends ein Ende, wie die in kleinen Gebieten praktisch zweidimensionale Oberfläche einer Kugel. Diese Welt ist in einer Ausdehnung begriffen, die durch die Größe der Hubbleschen Konstanten (S. 169) gegeben ist. Diese „4. Dimension" ist kein „Jenseits", sondern untrennbarer Bestandteil dieser einzigen existierenden Welt. Diese Welt hat daher kein „außerhalb", sondern ist uns in allen ihren Teilen prinzipiell zugänglich.
Um die Expansion verständlicher zu machen, unterdrücken wir wieder eine Dimension. Unsere dreidimensionale Welt reduziert sich daher zur Oberfläche einer Kugel. Falls die Welt nicht genau sphärisch sein sollte, ändert das im Prinzip nichts daran. Wir greifen daher zu einem Gummiballon und halten ihn einen Augenblick in den Tröpfchenschauer einer Spritzpistole. Auf seiner schön runden Oberfläche liegen dann alle Sternsysteme dieser Welt (Bild 144). Sie sind hier willkürlich, aber im großen und ganzen gleichmäßig in Gestalt winzig kleiner Farbtupfen verteilt. Jedes dieser Pünktchen ist eine Galaxie zu je zirka 200 Milliarden Sternen.
Eines dieser Pünktchen (P_1) greifen wir willkürlich heraus (Bild 145). Es ist unser Milchstraßensystem. Ein zweites (P_2) sei davon um die Strecke a entfernt, ein drittes (P_3) um die doppelte Strecke $2\,a$. Jetzt werde der Ballon aufgeblasen. Die Welt expandiert, und die Pünktchen rücken auseinander. Wenn sich der Radius r des Ballons in der Zeit t verdoppelt hat, haben sich auch die gegenseitigen Entfernungen aller Pünktchen verdoppelt. P_2 hat jetzt von P_1 die Entfernung $2\,a$, P_3 von P_1 die Entfernung $4\,a$. Dann betragen die auf Punkt P_1 bezogenen Geschwindigkeiten

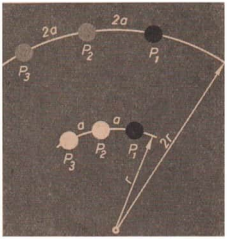
$$\text{für Punkt } P_2: \quad v_2 = \frac{2\,a - a}{t} = \frac{a}{t} \text{ und}$$

$$\text{für Punkt } P_3: \quad v_3 = \frac{4\,a - 2\,a}{t} = \frac{2\,a}{t}\,.$$

Wir sehen, es gilt hier genau das für die Nebelflucht charakteristische Gesetz: Die Geschwindigkeiten sind den jeweiligen Entfernungen vom Beobachtungszentrum proportional. Das trifft aber nicht nur für den Ausgangspunkt P_1, sondern für jeden beliebigen Punkt der gesprenkelten Oberfläche zu. Kein Punkt kann sich anmaßen, etwas Besonderes zu sein. Somit hat auch unsere dreidimensionale Welt keinen Mittelpunkt, alle Punkte der Kugeloberfläche sind gleichberechtigt. Die Nebelflucht bietet von allen anderen Sternsystemen aus das gleiche Bild.
Nun könnte man noch stirnrunzelnd auf das Innere des Ballons hinweisen, das in unserem Modell natürlich hohl sein muß. Aber so hohl ist es gar nicht. Jeder Punkt der Oberfläche war früher einmal darin, wie er später immer weiter in den Raum außerhalb der Kugel wandern wird. Das Modell hat damit die famose Eigenschaft, genügend Platz für die gesamte Vergangenheit und Zukunft zu bieten.
Die Sache wird aber gefährlich, wenn wir vergessen, wieviel Vorbehalte wir gestrichen haben, um zu diesem wahrhaft verblüffend einfachen Weltmodell zu gelangen. Wir fühlen uns aber schwindelfrei genug, um ungesichert weiterklettern zu können. Es entspricht zwar nicht dem Wesen der



144. Gummiballon als Weltmodell



145. Die Geschwindigkeit der Nebelflucht als Folge der Expansion der Welt

sonst so vorsichtigen Physik, auf dem Boden recht unsicherer Hypothesen weiterzurechnen, als ob schon alles hieb- und stichfest bewiesen wäre. Tut man es dennoch, so kommt man zu folgendem Ergebnis.

Wenn die Expansion in gleichem Maßstab immer schon bestanden hätte, so muß der auf Bild 145 angegebene Radius r der Weltkugel immer kleiner werden, je weiter man in die Vergangenheit zurückgeht. Die Hubble-Konstante hat (S. 159) den Wert $0{,}25 \cdot 10^{-17}$ 1/s oder, was dasselbe ist, $75 \frac{\text{km/s}}{\text{Mpc}}$. Dieses bedeutet: ein Punkt, der nach Bild 145 im jetzigen Augenblick um 1 Megaparsec $= 3{,}09 \cdot 10^{19}$ km von uns entfernt ist, befand sich vor einer Sekunde um 75 km näher. Fragen wir nach der Zeit, die verstrichen sein muß, damit er diese Entfernung erlangen konnte, so haben wir nur zu rechnen

$$T = \frac{3{,}09 \cdot 10^{19}\ \text{km}}{75\ \text{km/s}} = 4{,}11 \cdot 10^{17}\ \text{Sekunden oder 15 Milliarden Jahre}\,.$$

Diese Rechnung läuft auf nicht mehr oder weniger darauf hinaus, daß zu dieser Zeit alle Entfernungen im Kosmos zu einem einzigen Punkt zusammengeschrumpft waren. Alle Materie, die gesamte riesige Masse nebst der zugehörigen Energie all der Milliarden heute bestehender Himmelskörper war in einem Punkt oder zumindest in einem sehr kleinen Raumgebiet konzentriert. Aus unerklärlichen Gründen muß es dann eine ungeheure Explosion gegeben haben, womit die Materie begann, sich im Raum zu zerstreuen und von diesem Augenblick an ihre Entwicklung anzutreten.

Der einzige Umstand, der für diese Rechnung spricht, ist allerdings aufregend genug. Die Zeit von 15 Milliarden Jahren stimmt ungefähr mit den Schätzungen überein, die sich für das Alter der

Erde ergeben haben. Hier geht man u. a. davon aus, daß sich das bekannte radioaktive Element Uran auf dem Umweg einer vielgliedrigen Zerfallsreihe langsam in das stabile Radiumblei umwandelt. Untersucht man bestimmte Mineralien auf den prozentualen Gehalt an Uran und Blei, so läßt sich ziemlich mühelos die Zeit berechnen, die seit der Bildung dieser Bleimenge vergangen ist. Man erhält dabei ein Alter von etwa 5 Milliarden Jahren von dem Zeitpunkt an, in dem sich das natürliche Gleichgewicht in der Zusammensetzung der chemischen Elemente eingestellt hat. Rechnet man noch mit einem Zuschlag für die Zeit, bis zu der sich die Elemente aus dem anfänglichen Urplasma bildeten, und biegt vielleicht die Hubblekonstante noch etwas zurecht, so ist diese Übereinstimmung in der Tat erstaunlich.
Mag dieses Zusammentreffen dieser beiden, auf so grundverschiedene Weise berechneten Zahlenwerte ein Zufall sein oder nicht, so muß die Theorie vom explodierenden Universum an einem ganz wesentlichen Umstand scheitern. Die Vorstellung, es habe einen Moment gegeben, da einmal nichts und einen Augenblick später die gesamte Materie des Weltalls vorhanden war, widerspricht den Gesetzen von der Erhaltung der Masse und Energie. Sie widerspricht insbesondere dem ersten Leitsatz, den wir vorhin für den Entwurf eines akzeptablen Weltmodells aufstellten: die Gültigkeit der Naturgesetze an allen Punkten des Kosmos und zu allen Zeiten seiner Entwicklung.
Wenn wir von diesem Weltmodell überhaupt gesprochen haben, so geschah das, weil gerade dieses Modell überaus viel zitiert und diskutiert wird, und auch um zu zeigen, auf welche Abwege man geraten kann, wenn man den Boden dabei unter den Füßen verliert.
Zudem ist es noch gar nicht erwiesen, ob das Weltall tatsächlich in der eben beschriebenen Weise in sich geschlossen ist. Man kann sich ebenso gut vorstellen, daß die Expansion in einem gewöhnlichen dreidimensionalen Raum vor sich geht. Alle Galaxien haben vermöge ihrer Trägheit dieselbe Geschwindigkeit beibehalten, die sie einstmals besaßen. Dann müssen diejenigen Objekte mit der größten Geschwindigkeit auch am weitesten von uns entfernt sein, wenn wir zunächst annehmen, daß der Startpunkt in der Nähe unserer eigenen Galaxis lag. Die Gesamtheit aller Galaxien wird dann einen etwa kugelförmigen Raum einnehmen. Da sie im Höchstfall die Lichtgeschwindigkeit c haben können, ergibt das Produkt mit der insgesamt verstrichenen Zeit T den derzeitigen *Weltradius* $R = c\,T$. Mit dem vorhin berechneten Wert für T erhalten wir

$$R = 3 \cdot 10^5\ \mathrm{km/s} \cdot 4{,}11 \cdot 10^{17}\ \mathrm{s} = 12{,}3 \cdot 10^{22}\ \mathrm{km} = 13\ \text{Milliarden Lichtjahre.}$$

Dieses Modell ist also nach allen Seiten hin *offen*. Es ist unendlich, während das vorhin besprochene endlich und in sich *geschlossen* ist. Unter Anwendung der speziellen Relativitätstheorie läßt sich auch der Beweis führen, daß in diesem offenen Weltmodell jeder beliebige Standort im Weltall als Startpunkt angenommen werden kann; die Verteilung der Materie im Raum ist ebenso homogen wie im ersten Fall.
Anscheinend aber ist die Frage, ob das Weltall endlich oder unendlich sei, nicht ohne weiteres zu entscheiden. Man muß vor allem auch möglichst viele astrophysikalische Einzelfakten berücksichtigen und in derartige allgemeinen Betrachtungen mit einbeziehen. Dann aber ergeben sich heute Weltmodelle, die gleichzeitig geschlossene und auch offene Räume enthalten.

Wie dem auch sein mag, eines haben unsere physikalischen Streifzüge durch das Weltall gelehrt. Es ist nicht mehr das Privileg weltfremder Philosophen und Religionen, über die letzten Zusammenhänge der Natur und des gesamten Kosmos nachzudenken, sondern dies ist eine Angelegenheit unvoreingenommenen wissenschaftlichen Forschens und Denkens. Allein die Physik, im weitesten Sinn der Bedeutung dieses Wortes verstanden, ist zuständig für die großen und noch ungelösten Fragen, die die Menschheit seit je bewegten. Allein sie ist dazu berufen, die noch offenen Probleme Schritt für Schritt zu klären und ihrer Lösung zuzuführen. Immer mehr hat sich dabei herausgestellt: Es gibt kein Problem in der Welt, das sich einer wissenschaftlichen Behandlungsweise von vornherein widersetzt.

Die Welt ist erkennbar! Aber der Erkenntnisprozeß ist längst noch nicht abgeschlossen. Vielleicht stehen wir noch in seinen Anfängen. Denn jetzt erst hat der Mensch begonnen, sich selbst in den Kosmos hinauszubegeben, um die Physik dort zu treiben, wo er diesem großartigsten aller Forschungsobjekte näher sein wird denn je zuvor. Von der Eroberung des Kosmos durch den Menschen dürfen wir noch Großes erhoffen.

Daher wird sich das vom Menschen entworfene Weltbild, bei allen Wandlungen, die es im Laufe der Zeit bereits erfahren hat, auch weiterhin verändern. Diesem so wandlungsfähigen Bewußtsein steht die wirkliche Welt gegenüber. Diese wirkliche Welt, und nicht unsere augenblicklichen Kenntnisse und auch nicht die zur Zeit bestehenden allgemeinen Anschauungen, ist für uns Menschen das einzige real Gegebene.

Wir aber wollen uns daran erfreuen, daß diese äußere Welt so unerhört tiefgründig und interessant ist!

BILDQUELLEN-NACHWEIS

Bilder 27, 41, 82, 96, 103, 104: VEB F. A. Brockhaus Verlag, Leipzig
Bild 52: Physikalische Blätter 1960
Bild 94: B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig
Bild 103: Mount Wilson and Palomar Observatories, Pasadena/California
Bild 113: VEB Verlag Enzyklopädie, Leipzig