

Wolfgang Spickermann

URKNALL QUARKS KERNFUSION



Wolfgang
Spickermann

URKNALL QUARKS KERNFUSION

**Streifzug
durch
Forschungsgebiete
der modernen
Physik**

Urania - Verlag
Leipzig · Jena · Berlin

Fotonachweis:

Archiv Neues Deutschland (1)
Archiv des Autors (14)
CERN (4)
Engelhardt (1)
Fröbus (2)
Kurtschatow-Institut Moskau (2)
Meister (1)
Nowosti/APN (13)
Prawda (2)
Spickermann (8)
TASS (1)
VIK Dubna (5)
ZB/TASS (1)
ZB/Löwe (1)
ZB/Schaar (1)
ZB/Zimmermann (1)

Spickermann, Wolfgang:

Urknall, Quarks, Kernfusion: Streifzug durch d. Forschungs-
gebiete d. modernen Physik / Wolfgang Spickermann.

[Ill. Berthold Daniel]. — 1. Aufl. — Leipzig; Jena; Berlin:

Urania-Verlag, 1986. — 224 S. : 102 Ill.

ISBN 3-332-00016-0

Best.-Nr.: 654-053-9

ISBN 3-332-00016-0

1. Auflage 1986, 1.–7. Tausend

Alle Rechte vorbehalten

© Urania-Verlag Leipzig/Jena/Berlin,

Verlag für populärwissenschaftliche Literatur,

Leipzig 1986

VLN 212-475/24/86 · LSV 117 9

Lektor: Konrad Haase

Illustrator: Berthold Daniel

Typograf: Matthias Dittmann

Printed in the German Democratic Republic

GG INTERDRUCK, BT Chemigrafie

Satz und Druck: Gutenberg Buchdruckerei und Verlagsanstalt Weimar,

Betrieb der VOB Aufwärts

Buchbinderei: VOB Südwest Leipzig

Best.-Nr.: 654 053 9

01000

Inhalt

7

Fragen – von der Natur gestellt

26

Galileis Nachfolger

31

Sternennacht im Kaukasus

40

Die Welt Albert Einsteins

45

Berühmte Experimente

56

Nur ein Kosmos – aber viele Modelle

62

Radiowellen und ihre Botschaft

68

Das Superrohr in den Bergen

73

Neue Projekte

80

Das Geheimnis der Gravitationswellen

83

Sternbeobachtung im Innern der Erde

95

Noch einmal über Neutrinos

102

Auf der Suche nach den kleinsten Teilchen

111

Die Ordnung im Partikelzoo

119

Wie elementar sind Elementarteilchen ?

127

Quarks

143

Die »große Vereinigung« der Naturkräfte

155

Giganten der Technik für die Mikrowelt

167

Wo liegt der praktische Nutzen ?

173

Energie nach Art der Sonne

185

Heizen ohne Öl und Kohle

192

Wie entsteht Mikroelektronik ?

203

Aus der Grundlagenforschung in die Praxis

210

Grenzen der Forschung

215

Sachwortverzeichnis

Fragen – von der Natur gestellt

Bedeutende Entdeckungen sind nicht selten das Ergebnis zufälliger oder glücklicher Umstände. Für die Physik-Nobelpreisträger des Jahres 1978, Arnold Penzias und Robert Wilson, war es nicht viel anders. Als glücklicher Umstand ergab sich im Jahre 1965 für die beiden damaligen Mitarbeiter der Bell Telephone Company in New Jersey (USA), daß sie ein neuartiges, hochempfindliches Antennensystem für die Satellitentechnik zu erproben hatten. Als störend empfanden sie bei ihrem Unternehmen, daß die Empfangsgeräte ständig ein rätselhaftes Signalrauschen wiedergaben. Es trat selbst nach sorgfältigster Durchsicht der Anlagen auf, bei der keine Mühe gescheut und das gesamte Antennensystem in seine Einzelteile zerlegt und gereinigt wurde.

Für die beiden Forscher bestand kein Zweifel: Hier lag keine Störung in der Empfangselektronik vor! Bei den registrierten Signalen konnte es sich nur um eine Strahlung kosmischen Ursprungs handeln, die aus allen Richtungen des Universums gleichermaßen auf die Erde einfällt. Der Energiegehalt dieser Strahlung im Zentimeterbereich, so zeigte eine Vielzahl weiterer Messungen und Untersuchungen, entspricht einer Temperatur von 2,7 K.

Für die Astrophysiker war nach Bekanntgabe dieser Ergebnisse ohne Umschweife klar: Diese Signale sind die theoretisch vorausgesagten Sendboten einer sehr frühen, einige Milliarden Jahre zurückliegenden Entwicklungsphase des Universums. Zu jener Zeit, vor 10 bis 20 Milliarden Jahren, so besagen nämlich Berechnungen, muß der Kosmos mit seiner gewaltigen Vielfalt von Sternen, Galaxien, Galaxienhaufen, von Gasnebeln und Strahlung sowie mit dem von diesen Materieformen aufgespannten Raum einen wesentlich kleineren Rauminhalt gebildet haben. Die damals von diesem notwendigerweise sehr heißen, quasi komprimierten Gebilde ausgegangene Strahlung, so das Rechenergebnis, muß in ihren Resten auch noch heute vorhanden sein und den kosmischen Raum überall gleichmäßig durchdringen. Die registrierten Radiosignale aus dem All bestätigten somit fundamentale theoretische Überlegungen.

Bereits in den 20er Jahren unseres Jahrhunderts hatten die beiden amerikanischen Astronomen Edwin Hubble und Milton

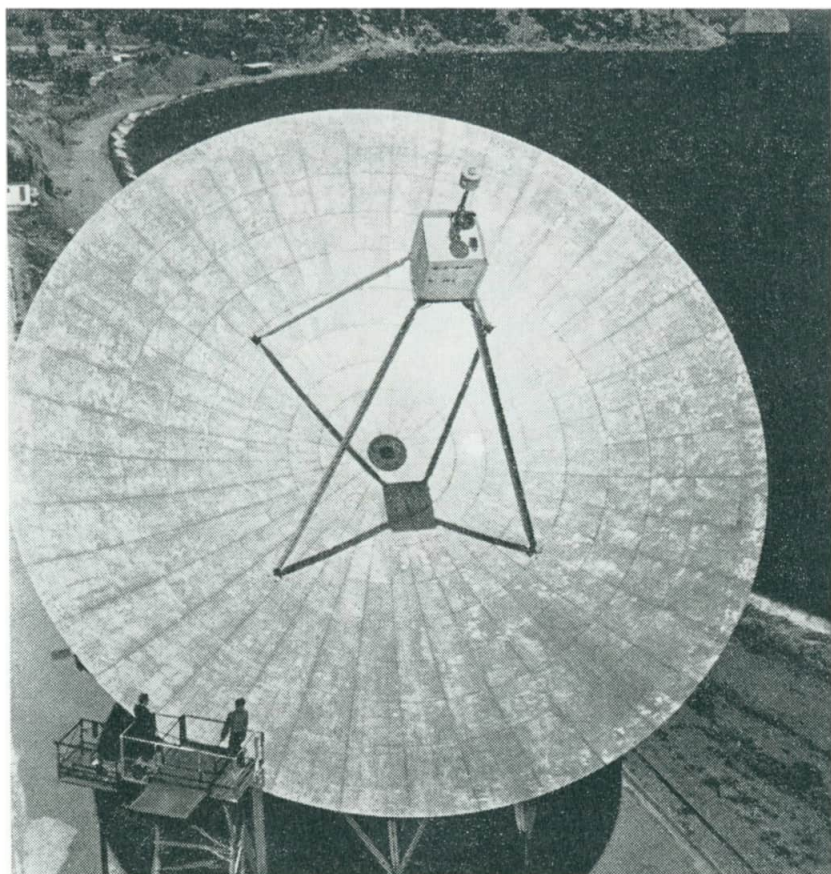
Humason eine Entdeckung von ähnlicher Tragweite gemacht. Sie stellten bei spektralen Untersuchungen des Lichtes ferner Galaxien fest, daß die einzelnen Linien des Spektrums ihren Platz zum roten Ende des sichtbaren Spektralbereiches hin verschoben haben. Dabei fanden die beiden Forscher sogar eine Gesetzmäßigkeit: Je weiter die untersuchten Galaxien von unserer Erde entfernt sind, desto mehr sind auch die einzelnen Linien auf der Fotoplatte verschoben.

Um diesen Befund zu deuten, gingen die Forscher davon aus, daß es sich hierbei um den sogenannten Dopplereffekt handele. Bekanntlich hört ein an der Bahnschranke wartender Passant das Geräusch eines heranrasenden Zuges zunächst in einer hohen Tonlage, die in eine tiefe umschlägt, sobald der Zug den Beobachter erreicht hat und sich nunmehr von diesem entfernt. Diese scheinbare Abhängigkeit der Signalwelle von der Bewegung der Signalquelle tritt nicht nur im akustischen, sondern auch im optischen Bereich auf. Im Falle der Galaxien bedeutete das für Hubble und Humason, daß sich offenbar alle Galaxien von der Erde fortbewegen, und zwar mit einer mit dem Abstand zunehmenden Geschwindigkeit.

Über diese Deutung des heute schon klassischen Experiments besteht in der Fachwelt kein Zweifel mehr. Wenn sich das Universum aber auf diese Weise ausdehnt, so müßten natürlich zu einem früheren Zeitpunkt alle nicht gebundenen kosmischen Körper und Systeme viel enger zusammen gewesen sein. Beide Entdeckungen – die der kosmischen Hintergrundstrahlung wie auch die der spektralen Verschiebung im Galaxienlicht – führen somit zu gleichen Schlußfolgerungen.

Für die Theoretiker waren diese beiden Entdeckungen keine Überraschungen. Denn sie ergaben sich nahezu zwangsläufig aus der von Albert Einstein im Jahre 1916 formulierten Allgemeinen Relativitätstheorie, angewandt für den Kosmos als Ganzes, d. h. für die gesetzlich geordnete Gesamtheit der Materie. Die entsprechenden mathematischen Lösungen der Einsteinschen Gleichungen für diesen Spezialfall hatte in den Jahren 1922 und 1924 der sowjetische Mathematiker A. A. Friedmann vorgelegt. Seine Lösungen sind das mathematische Modell für einen Kosmos, dessen Raumpunkte sich ständig voneinander fortbewegen. Wie rasch diese Expansion beschleunigt wird, ob sie ständig anhält oder eines Tages ihren Höhepunkt erreicht und in eine Kontraktion umschlägt, hängt in diesem Modell allein von der Dichte der insgesamt im Universum verteilten Masse ab.

Wenn sich aber das Universum wieder zu einem »Superball«



Schwenkbares Radioteleskop auf der Krim

zusammenzieht, was ist dann mit dem Rest des Raumes? Wo hatte die kosmische »Feuerkugel« zur Zeit des Urknalls ihre Grenzen, was ist jenseits davon? Diese Fragen liegen gewissermaßen auf der Hand. Die Antwort ist allerdings nur zu verstehen, wenn man sich mit den besonderen geometrischen Verhältnissen des kosmischen Raumes vertraut macht. Der Grund: Diese geometrische Struktur entzieht sich dem menschlichen Vorstellungsvermögen. Sie basiert nämlich nicht auf den Gesetzen der euklidischen Geometrie. Der geometrische Raum, auf den sich das kosmologische Weltmodell von Friedmann und Einstein gründet, ist anders beschaffen.

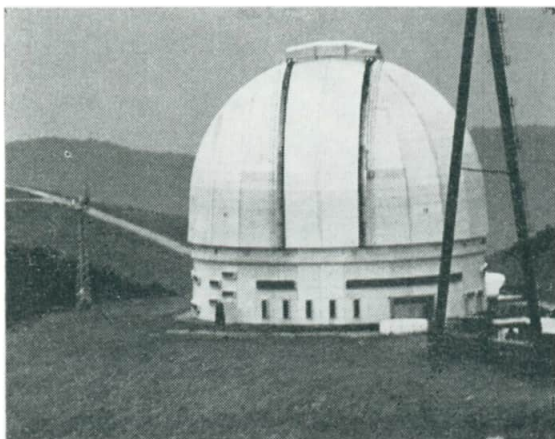
Er ist nicht beliebig weit (»gerade«) ausgestreckt, sondern krümmt sich in sich selbst zurück, wie z. B. eine zweidimensionale Kugel- fläche, die sich im dreidimensionalen Raum anschaulich darstellen

läßt. Diese Kugelfläche ist zwar endlich, d. h., sie hat einen exakt angebbaren Flächeninhalt; es gibt auf dieser Fläche aber keine Grenzen. Analog sind die Eigenschaften des dreidimensionalen Raumes mit gleichen Grundeigenschaften zu verstehen. Das heißt, es ist gleichgültig, ob ein solcher Raum gerade komprimiert oder expandiert, er hat keine Grenzen, es gibt nichts anderes als diesen Raum selbst.

Obgleich dafür die Anschauung versagt, ist eine Vielzahl unterschiedlicher geometrischer Räume möglich. Die Frage ist nur, welche dieser geometrischen Gesetzmäßigkeiten wirklich im Kosmos realisiert sind, welche physikalischen Konsequenzen das andererseits mit sich bringt und ob sich hieraus Widersprüche zu anderen, beispielsweise weltanschaulichen Erkenntnissen ergeben.

Und denkbar ist natürlich auch, daß die Gesamtheit der heute mit irdischen Beobachtungsinstrumenten registrierten materiellen Vielfalt im All längst nicht der »gesamte Kosmos«, das Universum schlechthin, ist. In noch größeren, bisher nicht einsehbaren Entfernungen könnten unbekannte Bereiche liegen, die an der kosmischen Expansion nicht teilnehmen, die anderen Gesetzen unterliegen. »Unser« Kosmos, besser gesagt unsere Metagalaxis, wäre in diesem Falle nur ein raum-zeitlich zusammenhängendes Gebiet, das in eine größere Struktur eingebettet ist.

Spätestens hier wird sichtbar, wie eng die moderne Physik mit der Philosophie, mit weltanschaulichen Problemen, verknüpft ist. Nehmen wir beispielsweise die Frage, wie weit sich die geschilderte Expansion des Weltalls in die Vergangenheit zurückverfolgen läßt. Je weiter man zurückrechnet, desto näher müssen einst alle Punkte des Raumes einander gewesen sein. Bei dieser Verfahrensweise ist es dann nur noch eine Frage der Geduld, daß man auf einen Anfangspunkt stößt, in dem alle Masse, alle Strahlung in einem mathematischen Punkt mit dem Radius Null komprimiert waren, aus dem heraus mit einem gigantischen »Knall« die Expansion unseres Universums begann. Doch welchen physikalischen Sinn hat ein solches Rechenergebnis? An diesem Punkt angelangt, kann Wissenschaft schnell zu einer Art Ersatzreligion werden. So wundert es nicht, daß in den letzten Jahren in Massenmedien westlicher Länder, aber auch in einschlägigen Wissenschaftsmagazinen unter Berufung auf Albert Einstein und die moderne Physik häufig von einer »Entstehung des Universums«, von einem »Anfang der Welt«, einem »Anfang der Zeit« oder von einem »Schöpfungsakt Urknall« zu lesen ist. Das sind Schlagworte, die dort im Sinne idealistischer Phi-



*Auf einem Berggipfel
im Kaukasus wurde
das größte Spiegel-
teleskop der Welt
stationiert.*

losophie als Synonyme für Materieschöpfung benutzt werden. Mit den Begriffen und der Terminologie der relativistischen Physik wird so unter der Hand die weltanschauliche Auseinandersetzung des vorigen Jahrhunderts neu aufgelegt, in der seinerzeit Friedrich Engels lakonisch feststellte, daß »der erste Anstoß aber bekanntlich nur ein anderer Ausdruck für Gott ist«. Die als »Zeugen« in dieser Sache angerufenen Wissenschaftler, voran Albert Einstein, haben eine so weitgehende Interpretation physikalischer Gleichungen freilich nie zugelassen und stets auf die Grenzen eines jeweiligen Erkenntnisstandes verwiesen.

Doch was hat es nun mit dem Urknall wirklich auf sich ? Wie sah die frühe, heiße Phase des Universums aus ? Wie entwickelt sich der Kosmos als Ganzes, welchen Werdegang nahmen und nehmen Sterne und Sternsysteme, welche Rolle spielen Schwarze Löcher oder Neutrinos im All ? Um immer präzisere Antworten auf diese Fragen zu finden, entstanden in den letzten Jahrzehnten vielerorts neue Forschungszentren mit riesigen Teleskopen. Weitere Anlagen sind im Bau, zunehmend werden auch künstliche Erdsatelliten eingesetzt, die mit Spiegelteleskopen oder Radioantennen ausgestattet sind. Ähnlich interessante Fragen rückten in den letzten Jahren mit den großen Entdeckungen und Entwicklungen auf dem Gebiet der Kern- und Hochenergiephysik in den Bereich verstärkten öffentlichen Interesses.

Der Nobelpreis für Physik 1979 beispielsweise wurde, wie schon drei Jahre zuvor, für Forschungsergebnisse auf dem Gebiet der Elementarteilchenphysik vergeben. Sie brachten neue Erkenntnisse über die Grundbausteine der Materie. Wenn es sie überhaupt gibt –



Blick in den Tunnel des Super-Protonen-Synchrotrons des Kernforschungszentrums CERN

so läßt sich der heutige Wissensstand vereinfachend zusammenfassen –, so unterliegen diese Grundbausteine wesentlich komplizierteren Gesetzmäßigkeiten, als bislang vermutet wurde.

Bis in unser Jahrhundert hinein galt das Atom, das chemische Element, als der kleinste Baustein, aus dem alle Körper der Welt zusammengesetzt sind. Diese Vorstellung kleinster Fundamentalbausteine läßt sich bis zu den griechischen Denkern des Altertums zurückverfolgen. Der griechische Begriff »atomos« – das Unteilbare – ist so auch die Quelle für das heute selbstverständlich gebrauchte Wort Atom.

Atome freilich sind teilbar. Sie bestehen bekanntlich aus Protonen, Neutronen und Elektronen. Protonen und Neutronen bestehen wiederum aus anderen Elementarteilchen. Und je besser und leistungsfähiger die Experimentiertechnik der Physiker wurde, desto rascher wuchs die Zahl der entdeckten Elementarteilchen, so daß schließlich die Frage auftauchte, ob bei der heute bekannten Zahl von weit über 200 Teilchen diese auch wirklich elementar, d. h. kleinste Grundbausteine der Natur sind.

Was sind Elementarteilchen, wie kann man sie untersuchen? Vom Prinzip her ist das Vorgehen der Physiker sehr einfach: Sie beschießen Protonen oder andere Atomkerne mit »schwerem Geschütz«. Trifft ein Geschöß auf einen Kern, so zerplatzt dieser unter der elementaren Wucht. Unter den Bruchstücken befinden sich die verschiedensten Elementarteilchen – welche genau, das hängt von der Energie des Geschosses ab.

So einfach das Prinzip ist, so schwer läßt es sich im Experiment realisieren, denn als Geschosse eignen sich nur Protonen oder andere Elementarteilchen. Diese winzigen, noch nicht einmal unter den stärksten Elektronenmikroskopen sichtbaren Teilchen gilt es herzustellen, auf gewaltige Energiebeträge zu beschleunigen und dann noch ganz genau auf das Ziel zu lenken, das in seine elementaren Bestandteile zerlegt werden soll.

Dazu werden heute Anlagen von gewaltigen Dimensionen eingesetzt. Es gibt gegenwärtig drei große »Protonenfabriken« auf der Welt – in Serpuchow bei Moskau, in Batavia, etwa 50 km westlich von Chikago (USA), sowie in der Nähe von Genf (Schweiz).

In Batavia besteht der Hauptteil des Teilchenbeschleunigers aus einem unterirdischen Ringtunnel, dessen Kreisbogen einen Durchmesser von einem Kilometer aufweist. Das Tunnelrohr ist fast 7 m breit und fast $5\frac{1}{2}$ m hoch. Der Tunnel nimmt ein hochevakuiertes Rohr auf, in dem die zu beschleunigenden Teilchen so lange Karussell fahren, bis sie durch immer wieder neue Beschleunigung nahezu Lichtgeschwindigkeit erreicht haben.

Im Ergebnis solcher Experimente stieg in den letzten beiden Jahrzehnten die Zahl der neuentdeckten Elementarteilchen immer weiter an. Sie unterscheiden sich untereinander z. B. durch ihre elektrische Ladung, ihre Masse, ihren »Drehimpuls« oder ihre Lebensdauer, die oft nur Milliardstel einer milliardstel Sekunde oder weniger beträgt. Die lange diskutierte Frage der Theoretiker war die, ob es in diesem Teilchenzoo ein Ordnungsschema gäbe, eine Gesetzmäßigkeit, der alle diese Teilchen gleichermaßen unterliegen. Es war z. B. die Frage zu klären, ob es nicht fundamentale Elementarteilchen gibt, aus denen sich die anderen Partikeln zusammensetzen. Theoretische Überlegungen hatten Anfang der 60er Jahre gezeigt, daß es solche Teilchen geben könnte – Fundamentalbausteine, die auf den Namen Quarks getauft wurden. Die Existenz dieser Teilchen blieb aber nahezu 15 Jahre lang eine im Experiment nicht nachprüfbare Frage.

Hier brachten die neuen Großbeschleuniger eine Wende. Ende

1974 hatten voneinander unabhängig zwei Forschungsgruppen in den USA an den Beschleunigeranlagen in Brookhaven sowie in Stanford ein weiteres Teilchen entdeckt, dessen neuartige Eigenschaften das Quarkmodell eindrucksvoll bestätigten und dieses theoretische Modell zugleich erweiterten. Die Entdecker dieses »J« und »Psi« getauften Teilchens, die Physiker S. S. C. Ting und B. Richter, erhielten für ihre bahnbrechende Leistung den Physik-Nobelpreis des Jahres 1976. Dank intensiver Suche konnten seither viele weitere Teilchen mit den neuartigen Eigenschaften studiert werden.

Mit diesen Ergebnissen scheint nunmehr folgendes klar zu sein: Es gibt wirklich elementare Teilchen, sogenannte Quarks, aus denen sich zumindest die übergroße Mehrzahl der heute bekannten Elementarteilchen zusammensetzen läßt. Die Quarks besitzen dabei besondere Eigenschaften, beispielsweise nur ein Drittel der elektrischen Ladung des Elektrons. Neben ihrer Ladung, ihrer Masse und anderen Größen verfügen sie über weitere grundlegende Merkmale, für die es in der übrigen Physik kein Vergleichsbild gibt und für die erst neue Namen erfunden werden mußten. Entsprechende Eigenschaften, die sich in sogenannten Quantenzahlen ausdrücken, wurden beispielsweise »strangeness« oder »charm« genannt bzw. mit Farbnamen bezeichnet.

Doch hat man damit nun das »atomos«, den kleinsten Grundbaustein der Materie, gefunden, der schon die Denkspiele von Philosophen des alten Griechenlands beherrschte? Die Antwort der Hochenergiephysiker lautet nein. Sie sind sich sicher, daß man mit noch größeren Beschleunigern, mit noch größeren Geschoßenergien weitere Quarks und dann vielleicht auch hier noch grundlegendere Teilchen finden wird. Zum anderen können die Quarks nicht alle bekannten Elementarteilchen ordnen. Gibt es also überhaupt so etwas wie »Urbausteine« der Materie? Oder ist die Vielfalt der materiellen Erscheinungsformen der Welt sowohl in kosmischen als auch in superkleinen Dimensionen unendlich?

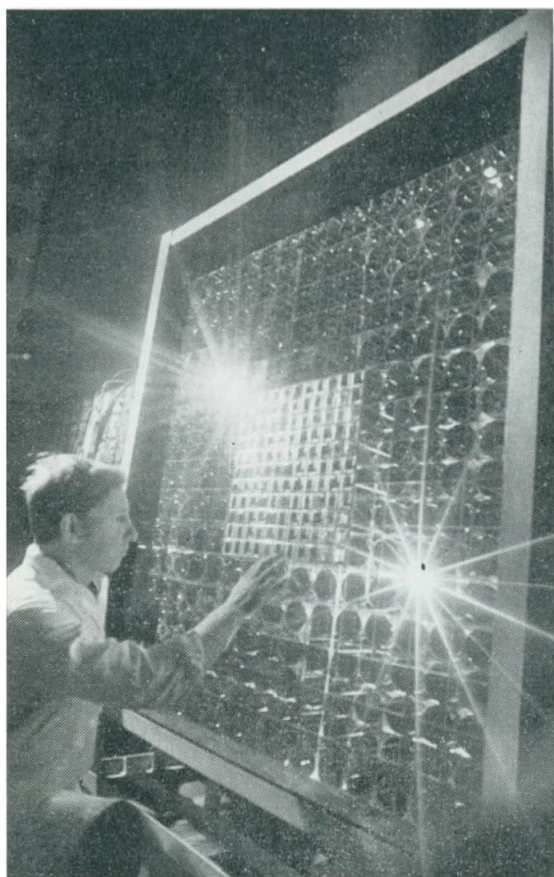
Der Weg zu weiteren Erkenntnissen wird bereits beschritten. In Serpuchow bei Moskau hat man mit der Verwirklichung eines Projektes für einen Superbeschleuniger begonnen, der nahezu das Zehnfache an Beschleunigerenergie, gemessen an den derzeit größten Anlagen, der Forschung zugänglich machen soll. Ähnliche Vorhaben sind auch in Batavia (USA) und beim CERN (Genf, Schweiz) in Angriff genommen worden.

Neben der Frage nach den wohl fundamentalsten Bausteinen der

Natur gibt es ein weiteres physikalisch wie philosophisch gleichermaßen interessantes Problem: Wie viele voneinander unterschiedliche Kräftearten existieren eigentlich? Am längsten bekannt ist die Gravitation, deren Wirkung zuerst Isaac Newton (1600), später Albert Einstein (1915/16) theoretisch beschreiben und erklären konnten. Auch die elektrischen und magnetischen Kräfte sind seit langem bekannt und wurden von James Clerk Maxwell (1861 bis 1864) in einer einheitlichen Theorie erfaßt. Mit der Entwicklung der Atomphysik zu Beginn unseres Jahrhunderts wurden aber zwei weitere charakteristische Kräftearten entdeckt, die nur im Bereich der Atome, ihrer Bausteine sowie zwischen anderen Teilchen wirken. Diese Kräfte wurden von den Physikern als starke bzw. schwache Wechselwirkung bezeichnet.

Wer aber kann sagen, ob jede dieser Kräfte wirklich fundamental ist oder ob nicht vielmehr übergeordnete Gesetzmäßigkeiten bestehen, aus denen sich das Wirken dieser Kräfte vom Standpunkt einer einheitlichen Theorie aus erklären ließe? Eine erste Antwort, nämlich daß zwischen den elektromagnetischen Kräften und der schwachen Wechselwirkung ein tiefer Zusammenhang besteht, konnte in den letzten Jahren aufgrund scharfsinniger theoretischer Überlegungen und experimenteller Hinweise gegeben werden. Die Schöpfer dieser einheitlichen Theorie, S. Glashow, A. Salam und S. Weinberg, erhielten den Physik-Nobelpreis 1979. Unbekannt bleibt vorerst aber weiterhin, ob auch die Gravitation mit den Kernkräften verwandt ist. Die gute Serie der letzten Jahre für die Hochenergiephysik scheint bei der Nobelpreisvergabe nicht abzureißen. Auch im Jahre 1980 entschied sich das Osloer Komitee bei der Wahl für Elementarteilchenphysiker, die mit aufsehenerregenden Experimenten eine weitere der lange Zeit für »heilig gehaltenen Kühe der Theoretiker« geschlachtet hatten. James W. Cronin und Val L. Fitch erhielten den Preis für, wie es in der Fachsprache für Physiker heißt, die »Entdeckung der Verletzung grundlegender Symmetrieprinzipien beim Zerfall neutraler K-Mesonen«.

Die Preise der Jahre 1983 und insbesondere wieder 1984 galten Arbeiten, die grundlegende Gesetze der Geschichte des Universums enthüllen sollen. 1983 wurden der aus Indien stammende und in den USA arbeitende Chandrasekhar Subrahmanyan und William Fowler (USA) geehrt. Während Subrahmanyan sich mit Arbeiten über extreme Eigenschaften sehr alter Sterne (Weißer Zwerge) hervorgetan hatte, entwickelte Fowler in den 50er Jahren eine umfassende



*Bleiglaselment für
einen Teilchen-
detektor des Instituts
für Hochenergiephysik
in Serpuchow bei
Moskau*

Theorie der Entstehung der chemischen Elemente im Weltraum und untersuchte experimentell astrophysikalische Kernreaktionen. Der Physik-Nobelpreis von 1984 hingegen betraf wieder direkt neueste Forschungsergebnisse auf dem Gebiet der Hochenergiephysik und Elementarteilchentheorie. Er wurde den beiden am westeuropäischen Kernforschungszentrum CERN arbeitenden Wissenschaftlern Carlo Rubbia (Italien) und Simon van der Meer (Niederlande) verliehen. Sie hatten entscheidenden Anteil an einem experimentellen Ergebnis, das den praktischen Beweis für die Richtigkeit der theoretisch bereits vollzogenen Vereinheitlichung von elektromagnetischer und schwacher Wechselwirkung erbracht hatte.

Die 1980 mit einem Nobelpreis gewürdigten experimentellen Ergebnisse von Cronin und Fitch, die freilich aus dem Jahre 1964 datieren, hatten wieder einmal gezeigt, »daß selbst die selbstver-

ständigsten Prinzipien der Wissenschaft nicht als vollkommen gültig betrachtet werden können, solange sie nicht durch präzise Experimente untersucht worden sind«, heißt es in der Würdigung des Nobelkomitees zur Verleihung des Preises.

Was eigentlich war geschehen? Jahrzehntelang galt es für die Physiker als unumstößliche Überzeugung – durch viele Experimente nahegelegt –, daß alle physikalischen Prozesse und Gesetze bestimmten Operationen gegenüber symmetrisch sind. So sollte es für den gesetzmäßigen Ablauf eines solchen Ereignisses völlig gleichgültig sein, ob alle Bewegungsabläufe in genau entgegengesetzter Richtung erfolgen. Um beispielsweise einen Kreisel physikalisch zu beschreiben, ist es gleichgültig, ob er sich nach rechts oder aber nach links dreht. Diese Eigenschaft heißt Symmetrie gegenüber Raumspiegelungen, den Vorgang der Spiegelung bezeichnet man als Paritätsoperation, kurz P benannt.

Neben dieser Symmetrie sollten zweitens alle physikalischen Gesetze gleichbleiben, wenn alle an einem Ereignis beteiligten Teilchen durch ihre Antiteilchen ersetzt werden (C-Operation). Und drittens sollten, nach den klassischen Vorstellungen der Physik, physikalische Prozesse symmetrisch bezüglich einer Zeitumkehr sein (T-Operation). Diese schön symmetrische »Spiegelwelt« erhielt ihren ersten Sprung, als in den 50er Jahren T. Lee und C. Yang nachwiesen, daß bei bestimmten Elementarteilchenprozessen zumindest das Symmetrieprinzip der Raumspiegelung P verletzt ist, wofür sie bereits im Jahre 1957 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet wurden.

Seither ist Skepsis angezeigt, hat man in der Elementarteilchenphysik immer wieder neu zu überprüfen, ob und inwieweit die Natur wirklich symmetrisch gegenüber diesen Prinzipien ist. Nicht nur bezüglich der Paritätsoperation P, auch bezüglich der Vertauschung von Teilchen durch ihre Antiteilchen sind seit langem Symmetrieverletzungen bekannt. Fitch und Cronin fanden mit ihrer Forschergruppe nun heraus, daß bestimmte Elementarteilchenprozesse auch bezüglich einer kombinierten CP-Operation unsymmetrisch verlaufen. Viele Jahre gelang es der Forschung aber nicht, dieses experimentelle Ergebnis auch theoretisch befriedigend zu erklären. Erst der Erkenntnisschub Ende der 70er Jahre, der oben dargestellt wurde, d. h. die Favorisierung und Erweiterung des Quarkmodells, öffnete den Blick und das Verständnis für die Dimension des Fitch/Croninschen Ergebnisses. So erklärt sich auch der um 15 Jahre verspätete Zeitpunkt der Preisvergabe.

Im praktischen Alltag freilich haben solche Forschungsergebnisse auch für die absehbare Zeit keinerlei Bedeutung. Für wichtige Bereiche der Grundlagenforschung hingegen, bis hin zur Astronomie, ergeben sich daraus bereits jetzt erheblich Konsequenzen. So ist das Problem der verletzten CP-Symmetrie eng mit den Versuchen verknüpft, die starke mit der elektroschwachen Wechselwirkung in einer geschlossenen Theorie zu vereinen. Zu den Konsequenzen zählt, daß es entgegen früheren Annahmen sehr wohl Kriterien physikalischer Art gibt, um im Kosmos Objekte aus Materie bzw. aus Antimaterie zu unterscheiden. Auch drängt sich nunmehr die Frage auf, ob das Proton wirklich ein absolut stabiles Teilchen ist. Damit sind neue Aspekte für kosmologische Theorien eröffnet, die den Werdegang des Alls im Verlaufe von Milliarden Jahren betreffen.

Eine beeindruckende Bilanz dieser in den letzten Jahren erzielten grandiosen Entdeckungen zog im Sommer 1984 der XXII. Internationale Kongreß für Hochenergiephysik. Etwa 1000 Theoretiker und Experimentalphysiker aus über 30 Ländern waren dazu nach Leipzig gekommen. Als beeindruckend bezeichnete es I. W. Schuwilo, Direktor des Moskauer Instituts für Theoretische und Experimentelle Physik, daß auf dem Kongreß eine Vielzahl neuer Entdeckungen und Theorien bekanntgegeben wurden. Der Generaldirektor des CERN, Herwig Schopper, nannte diese Konferenz aufregend, weil es dort experimentell gewonnene Hinweise auf neue Phänomene gab, die von keiner Theorie vorhergesagt worden waren. Ähnlich äußerten sich nach diesem Wissenschaftlerforum die Nobelpreisträger A. Salam, C. Yang und weitere weltbekannte Forscher. Zu den herausragenden Ergebnissen zählten jene Beiträge, die die enge Verbindung von Kosmologie und Elementarteilchenphysik herstellten. Insbesondere ging es um Fragen nach einer möglichen Ruhmasse von Neutrinos, nach der Instabilität des Protons und nach der Zusammensetzung der kosmischen Materie zur Zeit des Urknalls, zu der eine Energiedichte herrschte, bei der Quarks und vielleicht noch fundamentalere Teilchen das Geschehen diktierten.

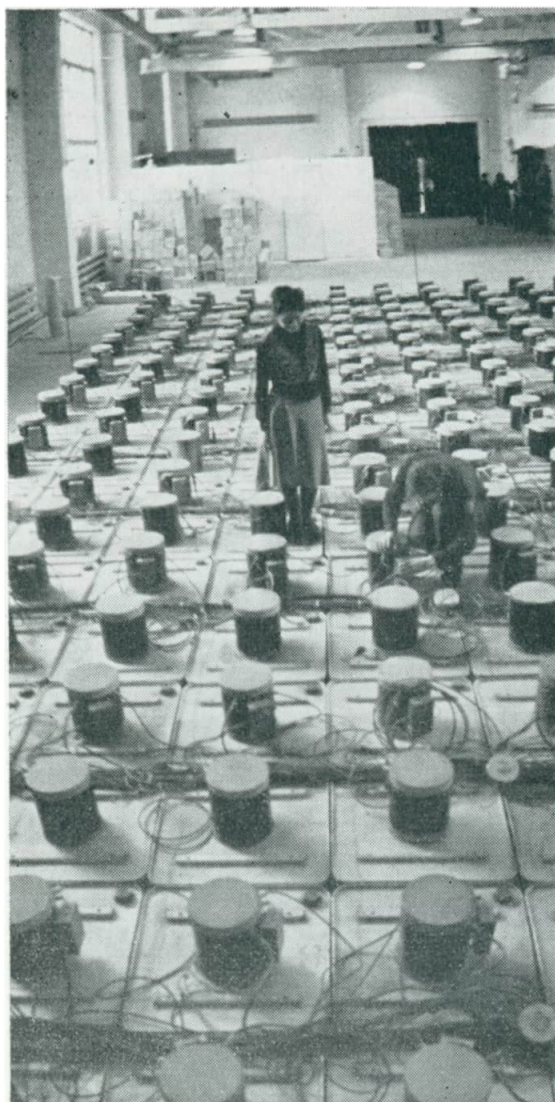
Wie eng Elementarteilchenphysik und Astrophysik verbunden sind, wurde gerade zu Beginn der 80er Jahre auf spektakuläre Weise von Ergebnissen der Neutrinoforschung unterstrichen. 50 Jahre nach der theoretischen Vorhersage der Existenz einer solchen Teilchenart und rund 23 Jahre nach seinem ersten experimentellen Nachweis rückte das Neutrino erneut ins Blickfeld der Physiker und der wissenschaftlich interessierten Öffentlichkeit.

Im Jahre 1930 gelang dem Physiker Pauli die theoretische Entdeckung des Neutrinos, einer Art von Elementarteilchen, die 1956 erstmals auch im Experiment nachgewiesen werden konnte. Ein wesentlicher Grund für das nun neuerwachte Interesse ist der experimentelle Befund, der 1980 einer Forschergruppe des Instituts für theoretische und experimentelle Physik in Moskau gelang. Mit hochempfindlichen Messungen, mit denen das Energiespektrum von Elektronen ermittelt wurde, das beim Tritiumzerfall entsteht, erhielten die Forscher Hinweise, daß Neutrinos eine von Null verschiedene Ruhmasse besitzen.

Genau das Gegenteil aber war fünf Jahrzehnte lang, wenn schon nicht letzte Überzeugung, so doch die stillschweigende Annahme der Wissenschaftler. Auf diese Ansicht bauten und bauen eine Reihe physikalischer Vorstellungen und Theorien auf, die bis hin zur Beschaffenheit des Kosmos oder des Innern von Sternen und Sternsystemen reichen. Sollte sich das Ergebnis der Moskauer Physiker in weiteren Experimenten in anderen Laboratorien der Welt bestätigen, so müssen viele dieser Theorien neu durchdacht, auf ihre Ergebnisse hin überprüft oder völlig überarbeitet werden. So beispielsweise in der Astrophysik: Denn da bei Kernumwandlungsprozessen in Sternen unzählige Neutrinos entstehen und von dort aus als Strahlung den Raum durchheilen, müßten die Abschätzungen über die im Universum vorhandene mittlere Massendichte präzisiert werden. Da die Massendichte aber in den von Einstein und Friedmann begründeten kosmologischen Modellen ein wichtiger Parameter ist, reichen die Konsequenzen bis hin zu den theoretischen Vorstellungen über die Entwicklung des Universums in langen Zeiträumen.

Das Interesse der Astrophysiker an Neutrinos freilich ist schon seit einigen Jahren hellwach. Fanden sie doch gerade in diesen Teilchen unersetzbare »Boten«, die Informationen direkt aus dem Innern von Sternen zur Erde bringen. Um dieses Interesse befriedigen zu können, bedarf es allerdings sehr komplizierter, voluminöser und entsprechend teurer Nachweisgeräte, deren Bau bei dem fortgeschrittenen Stand der Technik, insbesondere in der Elektronik, in den letzten Jahren möglich wurde.

Die Neutrinoastronomie ist das jüngste Kind der astronomischen Wissenschaften. Da diese Teilchen, wenn überhaupt eine, dann auf jeden Fall eine unvorstellbar winzige Ruhmasse aufweisen und elektrisch neutral sind, durchheilen sie mühelos, ohne mit anderer Materie nennenswert in Wechselwirkung zu treten, die Weiten des



*Szintillationszähler
für Neutrinos im
Funktionstest vor der
Montage in einem
Bergstollen im
Kaukasus*

kosmischen Raumes. Ebenso leicht passieren sie die Atmosphäre unserer Erde oder kilometerdicke Gesteinsschichten. Da ihre Quelle Kernverschmelzungsprozesse im Innern von Sternen sind, ergibt die gemessene Intensität des Neutrinoeinfalls direkte Aufschlüsse über das Zentrum von Sonnen.

Um diesen Neutrinostrom zu messen, schufen sowjetische Wissenschaftler im Innern des Elbrusmassivs im Kaukasus Ende der 70er Jahre ein Neutrinoteleskop. Das Bergmassiv über der 15 000 m³

großen Experimentierhalle schirmt die dort installierten physikalischen Anlagen gegen alle anderen Teilchen der kosmischen Strahlung ab. Nur Neutrinos gelangen wegen ihrer großen Durchschlagskraft ungehindert bis in diese Tiefe.

Mit ersten Versuchen dieser Art erregten Ende der 60er, Anfang der 70er Jahre amerikanische Wissenschaftler Aufsehen. Im Stollen einer verlassenen Goldmine in Süddakota installierten sie in 1480 m Tiefe einen Tank, der 390 000 l des als Reinigungsmittel bekannten Tetrachloräthylens enthielt.

Im Chlor kommt es bei einem höchst seltenen Neutrinoefang zu einer Kernumwandlung, so daß Argonatome entstehen. Beachtung fand das Experiment nicht nur wegen seiner hochempfindlichen Nachweisttechnik, sondern vor allem wegen seines Ergebnisses. Denn es zeigte sich, daß viel weniger Neutrinos von der Sonne registriert wurden, als die bisherigen Theorien erwarten ließen. Über die Ursache dieser Diskrepanz gibt es auch gegenwärtig noch die unterschiedlichsten Hypothesen, die teils grundsätzlich physikalischer, teils meßtechnisch-methodologischer Natur sind.

Von Bedeutung für diese Untersuchung wird die weitere Erforschung der Neutrinonatur sein, die zu Beginn der 80er Jahre in eine neue Phase getreten ist. Im Mittelpunkt steht nun die Frage nach der Ruhmasse, aber auch die, ob es noch weitere, bisher unbeobachtete Neutrinoarten gibt, die sich ineinander umwandeln können. Die experimentellen Möglichkeiten hierfür werden mit neuen, leistungsfähigeren Neutrinodetektoren sowie den geplanten Superteilchenbeschleunigern in Serpuchow bei Moskau, in den USA und in Westeuropa gegeben sein.

Von nicht geringerem aktuellem Interesse als das Neutrino ist das Proton, das nach den bisherigen Vorstellungen der Physik absolut stabil sein sollte. Theoretische Überlegungen auf dem Wege zur weiteren Vereinheitlichung der Naturkräfte brachten einige Theoretiker aber zu der Vermutung, daß auch das Proton ein instabiles Teilchen ist, wenn auch mit einer unvorstellbar langen Lebensdauer. Auf der bereits erwähnten Leipziger Hochenergiephysik-Konferenz berichteten denn auch japanische Wissenschaftler, daß sie vier Ereignisse registriert haben, die auf einen Protonenzerfall zurückgeführt werden könnten.

Als Mitte der 60er Jahre Penzias und Wilson noch an ihrem kosmischen Antennensystem bastelten, hatten im Jahr zuvor drei Physiker den Nobelpreis für Arbeiten erhalten, deren praktische Konsequenzen heute aus keinem Bereich von Wissenschaft und

Technik mehr wegzudenken sind. Seither gelten die sowjetischen Physiker Nikolai Bassow und Alexander Prochorow sowie der Amerikaner Charles Townes als die Väter der Laserphysik.

Die Entwicklung der Laser macht besonders augenfällig, wie umwälzend und mit welch hohem Tempo heutzutage naturwissenschaftliche Entdeckungen in die industrielle Praxis Einzug halten können. Die besonders energiereichen, gebündelten Lichtstrahlen erwiesen sich als wahre Tausendsassa: Sie werden in der Nachrichtentechnik genutzt, um Tausende Telefongespräche gleichzeitig durch eine einzige Glasfaser mit einem Querschnitt von nur tausendstel Millimetern Durchmesser zu übertragen; der Chirurg setzt Laser als optisches Skalpell ein, um Mikrooperationen im Auge oder an anderen Organen auszuführen; in der Metallurgie schneiden Laserstrahlen Metallteile mit höchster Präzision, und in der Forschung vieler Wissenschaftsgebiete ist der »Zauberstrahl« als Sonde oder Werkzeug unverzichtbar.

Entscheidungen des Nobelkomitees stoßen häufig auch auf Kritik international anerkannter Wissenschaftler. Insofern sind sie auch stets mit einer gewissen fragenden Skepsis anzusehen. Denn die Vergabe eines Preises für eine bestimmte Leistung besagt ja noch nicht, daß nicht zugleich auch andere Forschungsergebnisse von Rang ebenfalls Berechtigung für eine derartige Anerkennung gehabt hätten. Eine solcherart »verspätete Ehrung« erhielt beispielsweise der sowjetische Physiker und Schüler Ernest Rutherfords, Pjotr Kapiza, mit der Zuerkennung des Nobelpreises 1978, obgleich seine wichtigsten und für Forschung und Technik bahnbrechenden Leistungen Jahrzehnte zurücklagen.

Noch schwieriger liegen die Sachverhalte aber dann, wenn an einem großen Forschungsergebnis viele Wissenschaftler beteiligt sind. So hatte es 1964 die Fachwelt verwundert, daß neben Charles Townes nicht auch Arthur Schawlow zu den Nobel-Laureaten der Lasererfindung zählte. Denn beide hatten gemeinsam 1958 eine Arbeit veröffentlicht, die für die Entwicklung des Lasers von grundlegender Bedeutung war. Aber auch für Schawlow kam die Zeit der großen wissenschaftlichen Anerkennung: Zusammen mit Nikolaas Bloembergen von der Harvard Universität (USA) und dem Schweden Kai Siegbahn erhielt er den Physik-Nobelpreis 1981, der bedeutsamen Arbeiten auf dem Gebiet der Laser- und Elektronenspektroskopie zuerkannt wurde. Diese und andere Arbeiten haben es ermöglicht, das physikalische Geschehen in immer kleineren Bereichen der Natur – in einzelnen Molekülverbänden oder Festkörper-

Mikrobereichen – zu erkennen, zu beschreiben und für die Technik auszunutzen.

Noch rascher, als die Lasertechnik einst Furore machte, haben sich im letzten Jahrzehnt die Halbleiterphysik und ihre Anwendungen gemausert. Die Fähigkeit, immer winzigere Bereiche der Materie zu beherrschen, hat die Entwicklung der Mikroelektronik ermöglicht. Die physikalische Forschungstechnik von einst – Teilchenkanonen, Lasergeneratoren und anderes – wurde zu industriellen Werkzeugen, mit denen sich für das bloße Auge unsichtbare Mikro-Festkörperstrukturen herstellen und bearbeiten lassen.

Auf der Halbleiterfläche von der Größe eines Fingernagels, die in den 50er und teilweise auch 60er Jahren für die Produktion eines Transistors erforderlich war, konnten zu Beginn der 80er Jahre von den in der Welt führenden Elektronikherstellern bereits über 150 000 Transistorfunktionen realisiert werden. Das führte zu winzigen Rechenwerken, die in Form von Quarzuhren oder Taschenrechnern zum Massengebrauchsgegenstand wurden. Da mit Hilfe solcher Superchips die Computer von einst auf Schreibmaschinenformat zusammenschrumpften, lassen sie sich in Autos, Lokomotiven, Werkzeugmaschinen und Anlagen für komplizierte Steuerungsprozesse einsetzen. Mikrorechner sind das Gehirn der Industrieroboter, die mehr und mehr in die Produktion Einzug halten. Damit geht eine technologische Revolution in fast allen Industriezweigen einher. Es eröffnet sich die Möglichkeit, massenweise Arbeitskräfte einzusparen und durch lernfähige, variabel reagierende Automaten zu ersetzen.

Wie rasant das Entwicklungstempo hier verläuft, macht die Entwicklung von Computern der fünften Generation deutlich, wozu 1982 in Japan vom Ministerium für Internationalen Handel und Industrie ein auf zehn Jahre bemessenes Programm verabschiedet wurde. Alle großen Elektronikkonzerne des Landes sind daran beteiligt. Computer der fünften Generation sind Maschinen, die über eine künstliche Intelligenz verfügen, die lernen können, die beispielsweise selber und eigenständig Strukturpläne für Rechnerchips oder gar Rechnerprogramme, sogenannte software, entwerfen und entwickeln. Über erste Ergebnisse auf diesem Weg wurde im November 1984 in Tokio auf einer internationalen Konferenz ausführlich berichtet. Die Rechnerchips für diese Computergeneration, die zu Beginn der 90er Jahre in Dienst gehen soll, werden auf einer etwa fingernagelgroßen Fläche 50 Millionen Transistorfunktionen vereinen.

Die Technologie der Zukunft wird in westlichen Ländern von vielen Menschen freilich mit großer Furcht betrachtet. Die Mikroelektronik trägt ihren dort üblichen Beinamen »Jobkiller« aber zu Unrecht. Denn es ist niemals die Technik, der die sozialen Folgen ihrer Anwendung anzulasten sind. Verantwortung tragen immer jene gesellschaftlichen Kräfte, die über die Art des Technologieeinsatzes bestimmen, für die Wissenschaft und Technik Mittel zum Zweck sind.

So faszinierend die technischen Möglichkeiten, so gravierend die gesellschaftlichen Auswirkungen festkörperphysikalischer Forschungsergebnisse heute auch sind – der Mikroelektronik liegt erstaunlicherweise keine besondere »Schlüsselerkenntnis« zugrunde. Sie nutzt jenen grundlegenden Halbleitereffekt, der 1948 von den US-Amerikanern J. Bardeen und W. H. Brattain sowie 1949 von dem Engländer W. Shockley beim Bau der ersten Transistoren gefunden und ausgenutzt wurde. (Sie bekamen dafür den Nobelpreis des Jahres 1955.) Seither ist diese Grunderkenntnis verfeinert worden, wurde insbesondere die Technologie zur Herstellung bestimmter Halbleiterschichten ständig verbessert.

Die Entwicklung der Mikroelektronik ist das Ergebnis einer ganzen Serie von Entdeckungen und Erfindungen auf dem Gebiet der Festkörperphysik, Chemie, Elektronik, des Gerätebaus und anderer Disziplinen von Wissenschaft und Technik.

In der Summe aller dieser Einzelschritte entstand aber eine Technik, die der elektronischen Informationsverarbeitung praktisch unbegrenzte Anwendungsmöglichkeiten in allen Bereichen der Gesellschaft eröffnet, die gerade deshalb eine Schlüsselfunktion bei der Beherrschung der wissenschaftlich-technischen Revolution in den kommenden Jahren und Jahrzehnten gewonnen hat.

Eine wichtige Voraussetzung für diese Entwicklung war und ist die Erforschung von Methoden für immer feinere Mikrostrukturierung von Halbleiteroberflächen und ihre Umsetzung zu rationellen Verfahren und Ausrüstungen für den Produktionseinsatz. In den 70er Jahren war es dadurch möglich, die Strukturabmessungen in integrierten Schaltkreisen alle zwei Jahre zu halbieren, und diese Entwicklung wird sich nach übereinstimmender Expertenmeinung in den nächsten fünf bis zehn Jahren mit unvermindertem Tempo fortsetzen.

Zu den gravierenden Forschungsthemen der 80er Jahre gehören – und auch hier nicht nur in der Physik, sondern in vielen naturwissenschaftlichen und technischen Disziplinen – Grundlagen sowie

neue Technologien für die Energetik. Sparsamster Umgang mit Energie ist heute mehr denn je zu einer erstrebenswerten Tugend geworden. Öl erweist sich in wachsendem Maße als eine Kostbarkeit, das einfach zu verbrennen teuer zu stehen kommt. Chemische Veredlung von Öl und Kohle heißt das volkswirtschaftliche Gebot der Stunde, doch ohne Strom und Heizwärme geht es auch wieder nicht. Diese Erkenntnis gilt heute gleichermaßen in allen industrialisierten Ländern und rückt jene Forschungsarbeiten wieder stärker in das Blickfeld öffentlichen Interesses, die sich mit den energetischen Möglichkeiten und Technologien künftiger Jahrzehnte befassen.

Auch ganz im wörtlichen Sinne heißer Favorit unter allen derartigen Forschungsprojekten ist die Arbeit an der Sonnenformel. Gelingt es, sie im irdischen Labor nachzuvollziehen, stünde praktisch ein nahezu unerschöpfliches Energiereservoir zur Verfügung – das Wasser der Weltozeane. Denn in der Sonne verschmelzen bekanntlich Wasserstoffisotope zu den schweren Kernen des Edelgases Helium unter Freisetzung gewaltiger Energiebeträge. Das Wasserstoffisotop Deuterium kommt in der Natur in großer Menge vor, eben im Meerwasser, wenn auch dort in nur geringer Konzentration.

Anfang dieses Jahrzehntes wurden in den in der Fusionsforschung führenden Ländern Anlagen einer neuen Generation in Bau oder in Betrieb genommen, von der die Wissenschaftler hoffen, daß mit ihnen ein spürbarer Schritt in Richtung Fusionskraftwerk möglich wird.

An volkswirtschaftlich wichtigen und wissenschaftlich anspruchsvollen Themen ist auch in diesem Jahrzehnt kein Mangel. Und es ist keine Prophetie zu sagen, daß in dem Maße, wie Fragen gelöst werden, neue, ebenso anspruchsvolle hervortreten. Man darf auf Überraschungen und auch auf Zufallsentdeckungen weiter gespannt sein.

Galileis Nachfolger

»Vor ungefähr zehn Monaten erfuhr ich, daß in Belgien ein Instrument erfunden sei, durch welches man entfernte Gegenstände deutlich sehen könne, und mancherlei wunderbare Gerüchte wurden über diese Erfindung verbreitet.« Der diese Zeilen im Jahre 1610 schrieb, nahm selbst ein Bleirohr, an dessen Enden er geschliffene Gläser befestigte.

Nach weiteren Verbesserungen an seinem Eigenbauinstrument richtete Galileo Galilei dieses Fernrohr auf die Objekte des Himmels: Auf der Mondoberfläche entdeckte er – gegen alle bisherigen Vorstellungen – Berge und Täler; als einer der ersten beschrieb er die Sonnenflecken. Mit seinem primitiven Fernrohr konnte er schließlich vier Jupitermonde nachweisen.

Obgleich zu dieser Zeit die physikalisch-optischen Gesetzmäßigkeiten von Fernrohren noch gänzlich unbekannt waren, beginnt hier doch die Geschichte der großen astronomischen Entdeckungen, die eng mit der Geschichte der Technik verknüpft ist. Im Vergleich zu den ersten »handbedienten« astronomischen Fernrohren sind heutige Großteleskope technische »Monster«, deren Bedienung einer Vielzahl hochqualifizierter Arbeiter, Ingenieure, Elektroniker und Wissenschaftler bedarf.

Nachdem Mitte des 17. Jahrhunderts die grundlegenden Gesetze der Optik enthüllt waren, wurden immer größere und kompliziertere Systeme von Glaslinsen in entsprechenden Rohrkonstruktionen vereint. Dabei kam es beispielsweise darauf an, nicht nur die Vergrößerung solcher Fernrohre immer weiter zu erhöhen, sondern auch die Öffnung und die Lichtempfindlichkeit der Instrumente zu steigern.

Diese Kriterien erfüllten besonders die sogenannten Spiegelteleskope. Bei ihnen wird das Sternenlicht zunächst von einem Hohlspiegel aufgefangen und von dort im Brennpunkt des Spiegels zusammengeführt. Als ein wahrer Meister beim Bau solcher Teleskope erwies sich der englische Astronom F. W. Herschel. Im Jahre 1789 gelang es ihm, einen Spiegel von 1,22 m Durchmesser herzustellen, der in ein 12 m langes Rohr eingebaut wurde – lange Zeit ein »astronomischer Rekord«.

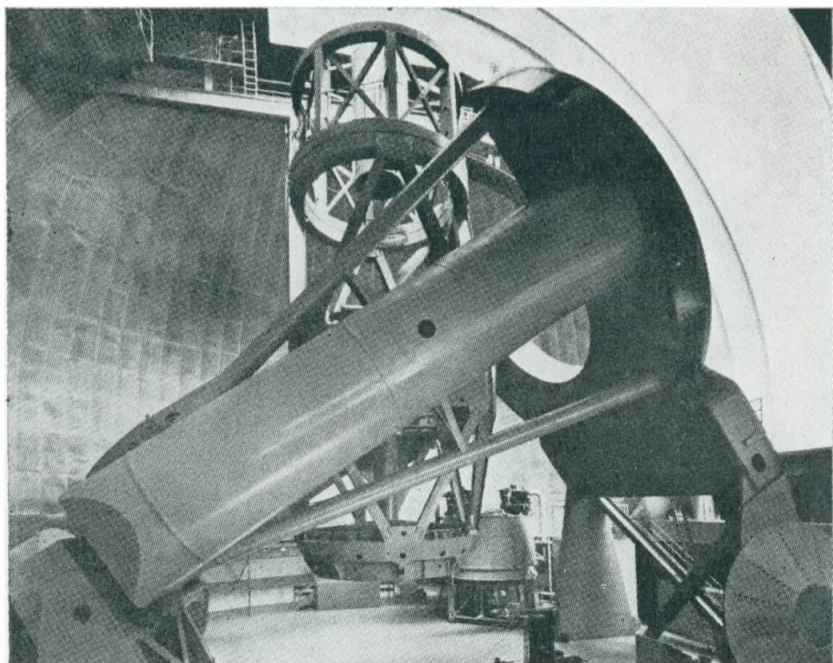
Als besonderes technisches Problem bei der Herstellung solcher riesigen Teleskope erwies sich das Schmelzen und exakte Schleifen des Glaskörpers für den Spiegel. Der Spiegel für das Herschel-Instrument wog immerhin bereits beachtliche 1000 kg. Beim Abkühlen der in die Form gegossenen Glasmasse durfte es keine Wärmespannungen geben, die Rißbildungen oder Deformationen herbeiführen. Ein Lied davon konnte der englische Astronom Lord Oxmantown, Earl of Rosse genannt, singen, der nach 1840 den Bau eines Teleskops mit einem Metallspiegel von 1,8 m Durchmesser und 4 t Masse betrieb. Erst mit dem fünften Guß eines Spiegelrohlings konnte er das gewünschte Ergebnis erzielen.

Wie auf vielen Gebieten von Wissenschaft und Technik führte die Entwicklung in den letzten Jahrzehnten auch bei den optischen Großinstrumenten zu völlig neuen Dimensionen.

Auftakt gab der Bau des 2,5-m-Spiegelteleskops auf dem Mount Wilson (USA). Nach 13 Jahren Bauzeit wurde es 1919 in Betrieb genommen. Allein das Schleifen des aus Frankreich eingeführten Spiegelrohlings aus Glas nahm fünf Jahre in Anspruch. Die wichtigsten Konstruktionsteile für dieses imposante Instrument lieferte eine Schiffswerft. Aber der materielle Aufwand sollte sich lohnen: Viele bedeutende astronomische Entdeckungen gelangen seither auf dem Mount Wilson. Eine der bahnbrechenden datiert aus dem Jahre 1929: Bei der spektralen Analyse des von sehr entfernten Galaxien eingefangenen Lichtes konnten E. P. Hubble und M. L. Humason feststellen, daß sich diese Systeme auf charakteristische Weise von der Erde fortbewegen. Damit war eine der wesentlichen Folgerungen aus Albert Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie experimentell bestätigt.

Von diesen Ergebnissen ermutigt, reiften die Pläne für ein noch größeres Instrument. Im Sommer 1948 – nach fast zwanzigjähriger Entwicklungs- und Bauzeit – wurde der neue Gigant von über 500 t Masse auf dem Mount Palomar (USA) seiner Bestimmung übergeben. Allein der Glasrohling für den 5-m-Teleskopspiegel brachte eine Masse von 20 t auf die Waage, der Spiegel selbst wog nach den umfangreichen Schleifarbeiten noch 9 t.

Das derzeit größte Spiegelteleskop der Welt arbeitet seit 1976 in den Bergen des Nordkavkasus, errichtet von den Leningrader Optomechanischen Werken. Der 6-m-Spiegel dieses Instruments wurde in einem optischen Werk bei Litkarino in der Nähe Moskaus gefertigt. Allein für das Abkühlen der Glasschmelze von 60 t Masse benötigte man zwei Jahre und zwei Monate, um sicherzustellen, daß



Das 5-m-Spiegelteleskop auf dem Mt. Palomar

es nicht zu Rissen und Deformationen im Glaskörper kommt, die ihn für optische Präzisionsuntersuchungen unbrauchbar machen würden.

Um das 650-t-Instrument ohne mechanische Verspannungen bewegen zu können, wurde erstmals in der Welt eine für Großinstrumente völlig neuartige Teleskopaufhängung eingesetzt – die sogenannte azimutale Montierung. Bei ihr steht eine der beiden Teleskopachsen, um die das Instrument geschwenkt werden kann, senkrecht zur Erdoberfläche, wodurch die gewaltige Masse des Instruments einfach und wirkungsvoll aufgenommen wird. Um jedoch die Drehung der Erde während der Beobachtungen zu kompensieren, macht sich bei einer solchen Konstruktion das gleichzeitige Nachführen des Teleskops um seine beiden Bewegungsachsen erforderlich – ein kompliziertes Steuerungsproblem, das im Astrophysikalischen Spezialobservatorium der Akademie der Wissenschaften der UdSSR von einem Prozeßrechner wirksam gelöst wird.

Wie bei dem amerikanischen Großinstrument auf dem Mount Palomar dauerte auch der Bau des kaukasischen 6-m-Teleskops nahezu zwei Jahrzehnte. Entwürfe für ein solches »Sternenauge«

gab es bereits in den 40er Jahren. Diese Arbeiten des Optikers Ponomarjow wurden aber erst fast 40 Jahre später wieder aufgefunden, nachdem sie infolge der Wirren des zweiten Weltkriegs lange Zeit verschollen waren.

Die konkreten Pläne für den Bau des sowjetischen Großinstruments begannen in den 50er Jahren zu reifen. Außer der Frage nach Konstruktion und Technologie stand zunächst die nach dem optimalen Standort im Mittelpunkt. Insgesamt 14 Expeditionen wurden von der Akademie der Wissenschaften der UdSSR unternommen, um eine fundierte Antwort zu finden.

Drei Kriterien galt es dabei in Übereinstimmung zu bringen: An einem möglichen Standort mußte erstens die Zahl der klaren Nächte möglichst hoch sein. Zweitens mußten die Reinheit der Luft sowie die Bedingungen in höheren Atmosphärenschichten solcher Art sein, daß sie auch für hochempfindliche photometrische Messungen eine ausgezeichnete Bildqualität gewährleisten. Und schließlich mußte drittens der potentielle Standort für das künftige Observatorium mit einem vertretbaren Aufwand verkehrsmäßig erschlossen werden können. Das betrifft natürlich auch die Infrastruktur für eine derartige Einrichtung, deren Betrieb insgesamt einige hundert Mitarbeiter erfordert, für die Wohnungen, Krankenhaus, Schulen und alle anderen lebensnotwendigen Einrichtungen geschaffen werden müssen.

Die Wahl fiel auf ein 2075 m hohes Bergplateau in der Nähe der Siedlung Nishni Archys unweit der Hauptgipfelkette des Nordkaukasus. So konnten schließlich 1960 die Bauarbeiten für die Aufstellung des optischen Hauptinstruments im neu geschaffenen Astrophysikalischen Spezialobservatorium der sowjetischen Wissenschaftsakademie aufgenommen werden.

Die Hauptausrüstungen des Teleskops stammen aus Leningrad. In den dortigen Optomechanischen Werken wurde eine spezielle Werkhalle errichtet, in der das Instrument später komplett montiert und erprobt wurde. Dann ging es, wieder in Einzelteile zerlegt, auf seine beschwerliche Reise in die kaukasische Bergwelt, wo teilweise eigens neue Straßen angelegt wurden.

Wie bei allen seinen Vorgängern war der schwierigste Punkt der Bau des großen Spiegels. Um so mehr, als es in der UdSSR zu dieser Zeit keinen Betrieb gab, der Erfahrungen auf diesem Gebiet besaß. Im Werk Litkarino bei Moskau wurden, um keine Zeitverluste zuzulassen, zugleich drei Rohlinge gefertigt. Dazu war jeweils eine Schmelze von 60 t Glasmasse anzufertigen, die aus dem Tiegel durch

Platinrohre in die Formen gelangte. Nach dem über zweijährigen programmierten Abkühlen jedes Rohlings konnten dann die Schleifarbeiten beginnen, um die gewölbte Oberfläche für den das Sternenlicht bündelnden Spiegel zu schaffen. 18 t Glasmasse waren dabei jeweils abzutragen.

Der erste Rohling bekam bei den Schleifarbeiten einen Sprung und wanderte auf die Glasschrotthalde. Die zweite Variante war erfolgreich. Mit diesem Spiegel konnte das Teleskop 1976 in Betrieb genommen werden. Mit ihm gelang es bereits in den ersten beiden Jahren, 30 neue sogenannte Seyfert-Galaxien zu entdecken, die sich durch eine sehr dynamische innere Entwicklung auszeichnen. 1979 schließlich wurde der aus dem dritten Rohling geschliffene Glaskörper, der eine noch bessere Qualität aufwies, in das Instrument eingebaut.

Die von Galileo Galilei begründete Entwicklung optischer astronomischer Beobachtungsgeräte findet aber mit dem 6-m-Riesen im Kaukasus längst nicht ihren Abschluß. Auch dieses Gerät soll noch leistungsfähigere, größere Nachfolger erhalten. So laufen gegenwärtig bereits Projektstudien für 10-m-Spiegelteleskope. Das technische Hauptproblem stellt hierbei nach wie vor die Fertigung entsprechender Spiegel dar. Künftige Teleskopriesen werden deshalb vermutlich keinen aus einem einzigen Rohling geschliffenen Spiegel mehr haben. Ihr Hauptspiegel wird vielmehr aus mehreren, leichteren Segmenten zusammengesetzt sein. Eine dazu erforderliche hochgenaue Justierung ist heute dank der entwickelten Laser- und Rechentechnik bereits möglich.

Neu in den kommenden Jahren wird auch die Verlagerung optischer Großinstrumente in den Weltraum sein. Nachdem bereits bei sowjetischen und amerikanischen Raumflügen gute Erfahrungen mit Teleskopen kleinerer Bauart gewonnen wurden, plant beispielsweise die NASA der USA für die zweite Hälfte der 80er Jahre die Stationierung eines 2,4-m-Spiegelteleskops in der Erdumlaufbahn.

Sternennacht im Kaukasus

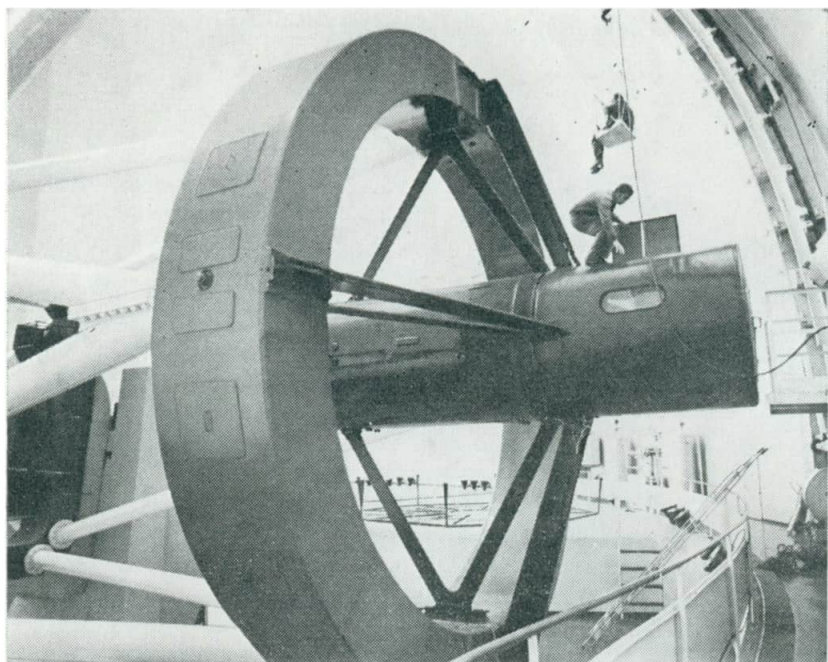
»Mach's gut, Jewgeni, viel Glück!« Diese aufmunternden Worte des Schichtleiters, die aus dem kleinen Lautsprecher des Sprechfunkgerätes kommen, gelten Jewgeni Nasarow, der soeben in seinem engen Metallzylinder, vollgestopft mit hochempfindlichen elektronischen Geräten, Platz genommen hat. Gedämpftes Licht erhellt den gewaltigen Kuppelsaal aus Edelstahl und Aluminium – eine »Kathedrale der Wissenschaft«. Sie beherbergt ein 27 m langes Rohr- ungetüm, an dessen einem Ende der riesige 6-m-Spiegel und an dem anderen jene Beobachterkabine angebracht sind, in der Jewgeni soeben mit einem Vorrat an Trockeneis zur Kühlung elektronischer Geräte verschwunden ist. Noch liegt der Gigant in der Waagerechten, so daß man von einer Balustrade an der Kuppelwand aus die an ein Raumschiff oder Unterseeboot erinnernde Kabine betreten kann.

Wenige Minuten später schwebt die inzwischen geschlossene Kapsel zum etwa 30 m höher liegenden Kuppeldach empor, einem Spalt entgegen, durch den der klare Himmel mit seiner Sternenpracht hindurchschimmert.

In dieser Nacht Ende Mai »gibt es guten Himmel«, wie die Astronomen sagen. Für Jewgeni Nasarow und seine Kollegen beginnt gegen 21.30 Uhr die Beobachtungsarbeit, als nach Warten und Bangen endlich doch die Wolkendecke aufreißt. Die Bedienung der hochempfindlichen Strahlungsempfänger, die in der Kapsel im Brennpunkt des imposanten Spiegels angebracht sind, ist für Jewgeni schon Alltag geworden.

Seit eineinhalb Jahren arbeitet der Absolvent der Physikalischen Fakultät an der Charkower Universität im Astrophysikalischen Spezialobservatorium der AdW der UdSSR in den Bergen des Nordkaukasus. Um 17 Uhr kam er mit dem Bus aus dem 800 m tiefer liegenden Nishni Archys auf das Bergplateau am Rande der schneebedeckten Gipfelkette des Gebirges herauf. Um 19 Uhr begannen die Testarbeiten zur Inbetriebnahme des Riesenteleskops und seiner vielfältigen elektronischen Apparaturen.

Für Jewgeni wird es eine einsame Nacht, wie viele zuvor. Bei elf Stunden liegt sein Rekord – elf Stunden ununterbrochene,



konzentrierte Beobachtungsarbeit in schwindelnder Höhe und bei oft grimmiger Kälte. Denn das Instrument – dafür sorgen notfalls spezielle Kühlanlagen – muß selbst am Tage annähernd nächtliche Umgebungstemperaturen haben, um mechanische »Wärmespannungen« im Interesse hochgenauer astronomischer Beobachtungsergebnisse auszuschließen.

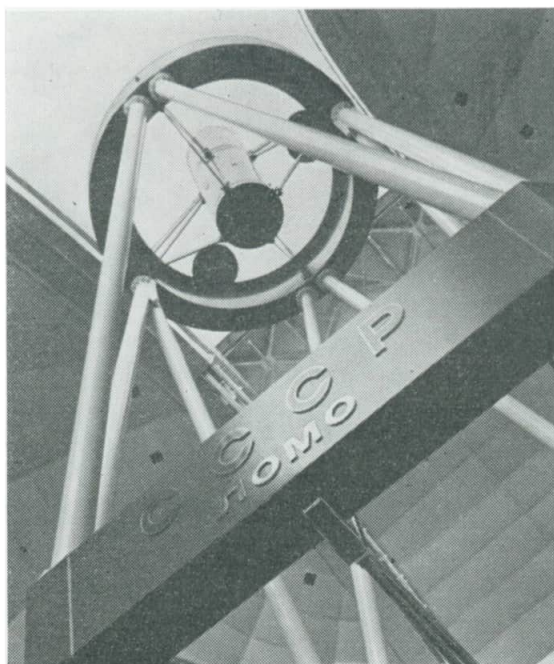
Jede Minute Beobachtungszeit ist kostbar. 2000 Rubel kostet eine Stunde Arbeit mit dem 650-t-Giganten. Grund genug, jede verfügbare Minute für Beobachtungen auszunutzen.

Wissenschaftler vieler Länder kamen seit der Inbetriebnahme der Anlage – aus Bulgarien, der DDR und weiteren sozialistischen Ländern, aus Frankreich, der BRD, Österreich und anderen Staaten.

Während unseres Besuches im Frühjahr 1982 realisierten Lenin-grader Wissenschaftler ihr Forschungsprogramm.

Mit ihnen und der Teleskopmannschaft aus Nishni Archys ist Jewgeni Nasarow in jener Nacht über Sprechfunk verbunden. Ihnen gibt er Informationen zur Steuerung des Teleskops. Den Rechnerdaten entsprechend, erhält er aus den Laborräumen Anweisungen zur Bedienung der wissenschaftlichen Geräte unter dem Kuppeldach.

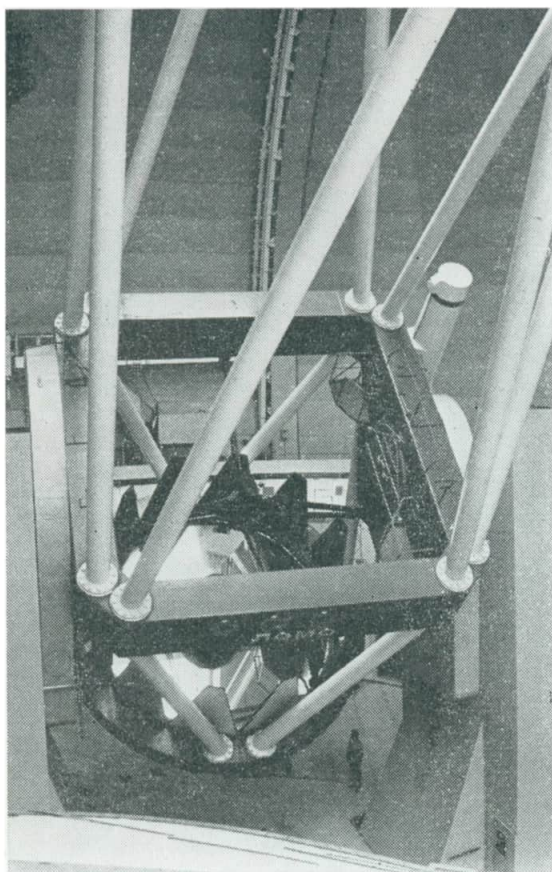
*Beobachterkabine
an der Spitze
des 6-m-Teleskops
(linke Seite)*



*Unter dem Spalt in
der Kuppelhaut
arbeitet der Beobachter
stundenlang in
seiner Kabine.*

Ohne hochempfindliche Elektronik ist heute moderne Astronomie nicht möglich – diese Einsicht drängt sich unvermittelt beim Betreten des Meßlaboratoriums auf. Gespannt verfolgen Dimitry Warschalowitsch, der Professor aus Leningrad, und seine Mitarbeiter den Monitorbildschirm. Ihr Ziel in dieser Nacht ist eines der am weitesten entfernten Objekte, der 1972 entdeckte und 15 bis 18 Milliarden Lichtjahre abliegende Quasar OQ 172. Lange Zeit galt er als das von der Erde entfernteste bekannte kosmische Objekt, das sich mit einer Geschwindigkeit von 275 000 km in der Sekunde, das sind 91% der Lichtgeschwindigkeit, von der Erde fortbewegt. Daß dieses Objekt überhaupt noch zu sehen ist, liegt daran, daß es die Leuchtkraft eines normalen Sterns um das Billionenfache, die einer Galaxie mit 10 bis 100 Milliarden Sternen um das Zehn- bis Hundertfache übertrifft. Erst 1982 fand eine Gruppe australischer und englischer Astronomen nach sechsjähriger Suche ein noch weiter entferntes Objekt, den Quasar PK S 2000 minus 330.

Sorgfältig werden an den Geräten die einzelnen Meßdaten in Frage kommender Lichtquellen, die selbst mit starken Fernrohren nicht auszumachen sind, mit den Katalogdaten verglichen. Dann

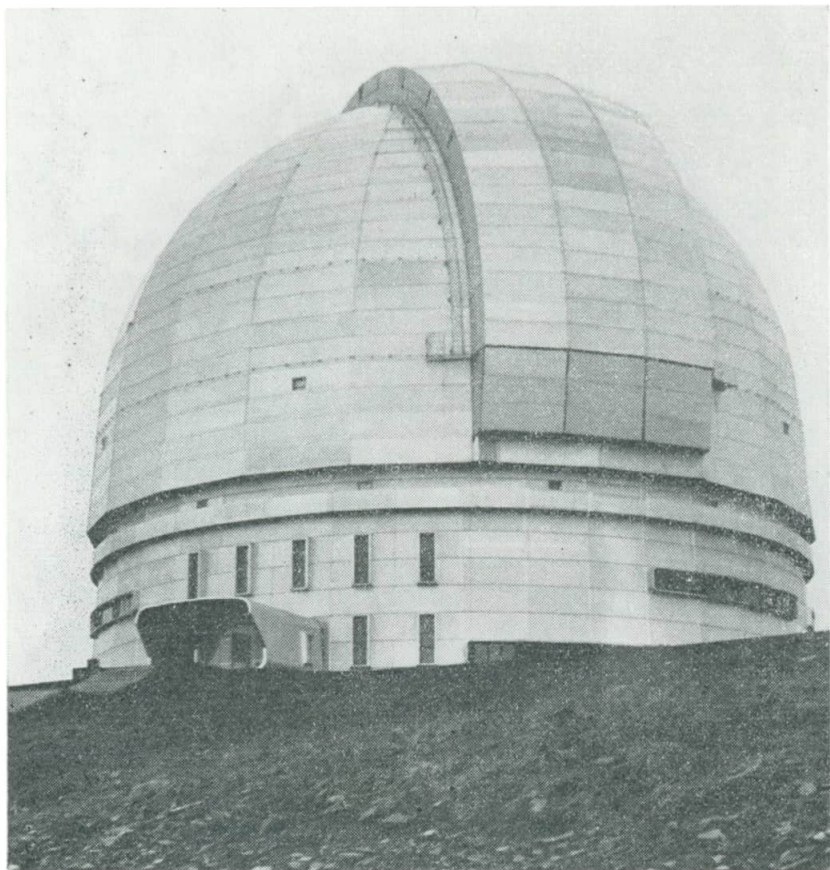


*Der metallverkleidete
Kuppelbau für
das 6-m-Teleskop
im Kaukasus
(Bild rechts)*

*Der 6-m-Spiegel des
Teleskops – rechts
unten ist zum Größen-
vergleich ein Mensch
erkennbar.*

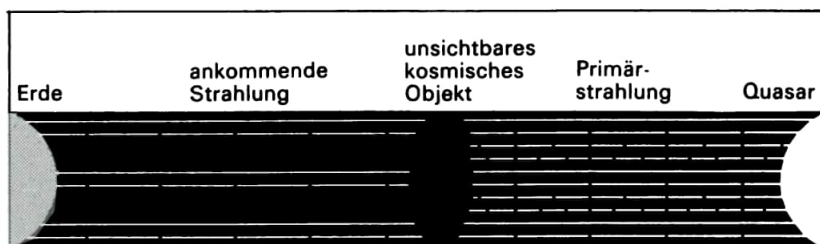
endlich, es ist inzwischen fast 23 Uhr, ist es soweit: Gebannt schauen die Mitarbeiter auf den Bildschirm eines Kennlinienschreibers und diskutieren die Werte. Es bleibt kein Zweifel – sie haben den Quasar OQ 172, das Ziel ihrer nächtlichen Arbeit, im Visier –, jetzt kann das eigentliche Forschungsprogramm der Nacht beginnen.

Für Professor Warschalowitsch ist diese Lichtquelle nur Mittel zum Zweck. Sie dient ihm gewissermaßen als »Röntgenquelle« zur Durchleuchtung des gewaltigen kosmischen Raumes zwischen Erde und Quasar. Durchdringt das Licht dieser einzigartig starken Strahlungsquelle auf seinem Weg zur Erde nämlich andere nicht oder nur schwach leuchtende extragalaktische Objekte, so werden seine spektralen Eigenschaften auf charakteristische Weise verändert. Aus der Analyse lassen sich dann Rückschlüsse auf das Vorhandensein dieser eigentlich unsichtbaren Objekte ziehen.



Aber nicht nur das: Mit Hilfe komplizierter theoretischer Berechnungen läßt sich auch feststellen, wie jene unbekannten Welten chemisch zusammengesetzt sind. Und noch mehr: Da sich die einzelnen unsichtbaren Galaxien in verschiedenen Entfernungen zur Erde befinden, kommt das Licht auch nach unterschiedlich langer Zeit beim irdischen Beobachter an; seine mitgeführten Informationen stammen aus bereits weit zurückliegenden Zeiten der kosmischen Entwicklung. Sie ermöglichen somit blitzlichtartige Einblicke in die Evolution des kosmischen Raumes.

»Etwa 40 Prozent der Absorptionslinien in den Spektren solcher Quasare sind heute in ihren Ursachen noch unbekannt«, erläutert Professor Warschalowitsch diesen Zusammenhang. Er hat neue Theorien entwickelt, daß für diese noch unbekannten Linien auch die Existenz von bestimmten Molekülen in sehr großen Entfernun-



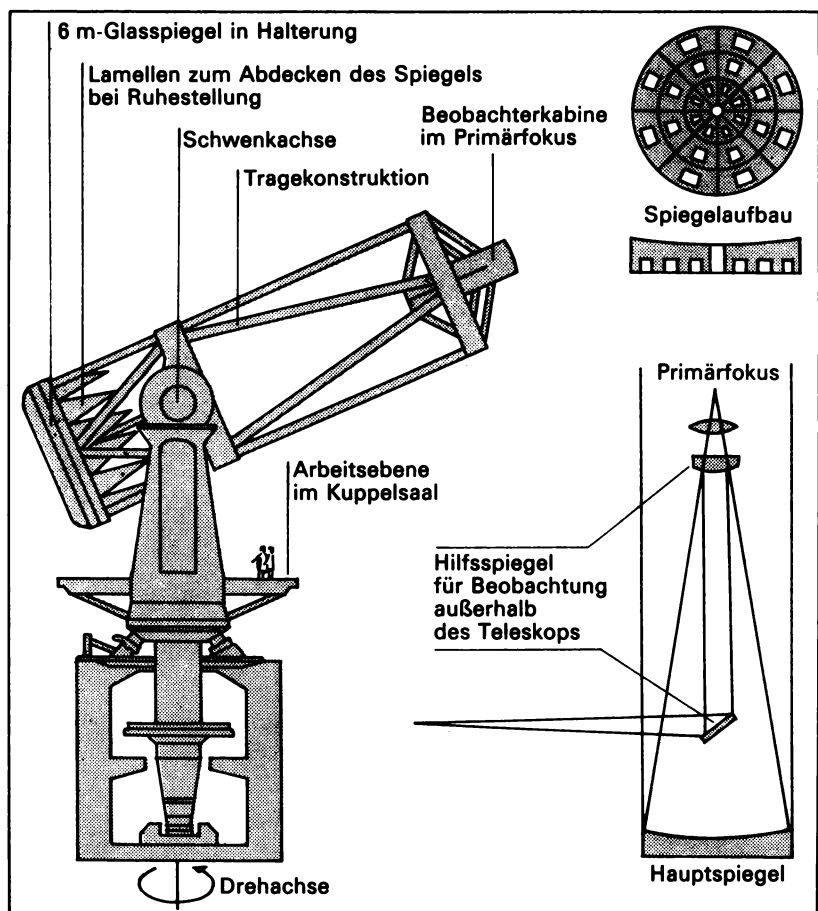
Auf dem Weg vom Quasar zur Erde wird ein Teil des Strahlungsspektrums von unsichtbarer Materie «eleminiert».

gen – und damit zu sehr frühen kosmologischen Zeitpunkten – verantwortlich ist. Der Teleskopriese im Kaukasus ermöglicht es ihm, solche und andere Hypothesen und Berechnungen der Nagelprobe des Experiments zu unterziehen.

Bis 4 Uhr früh dauerten in dem kaukasischen Wissenschaftsdom während unseres Besuches die Quasarlichtmessungen. Dann wurde die Kuppel geschlossen, und Jewgeni Nasarow konnte endlich mit seinen Füßen auf festem Boden stehen. Den Rest der Nacht verbrachten er und seine Kollegen in ihren Schlafkojen, ehe sie dann mit dem 9-Uhr-Bus die 17 km lange Serpentinenfahrt zum abwärts gelegenen Nishni Archys antraten.

Dort wohnen nicht nur die Mitarbeiter des Spezialobservatoriums – jene vom Teleskopriesen und auch jene vom größten Radioteleskop, das, rund 30 km entfernt, auf einer Hochebene seinen Standort hat. In Nishni Archys befindet sich auch die wissenschaftliche und materielle Basis des Observatoriums. Dazu gehören verschiedene wissenschaftliche Laboratorien und ein Rechenzentrum. Astrophysiker, Physiker, Elektroniker sowie Ingenieure der verschiedensten Disziplinen haben hier ihr Zuhause.

Neben der astrophysikalischen Forschung, das erläuterte uns Dr. Alexander Fomenko, stellvertretender Direktor des Spezialobservatoriums und wissenschaftlicher Leiter des 6-m-Teleskops, gehen natürlich die wissenschaftlichen Arbeiten zur weiteren Empfindlichkeitssteigerung des Teleskops planmäßig weiter. Während es beispielsweise andernorts bereits Projektstudien für besagte 10-m-Spiegelteleskope gibt, sieht er einen mehr versprechenderen Weg darin, durch Einsatz neuartiger Elektronik bessere Effekte zu erzielen. Gegenwärtige Teleskope – so sein Argument – nutzen nur etwa 10% des empfangenen Lichtes aus. Ohne die Dimension der Geräte zu vergrößern, könnte man bei auf elektronischem Wege prinzipiell

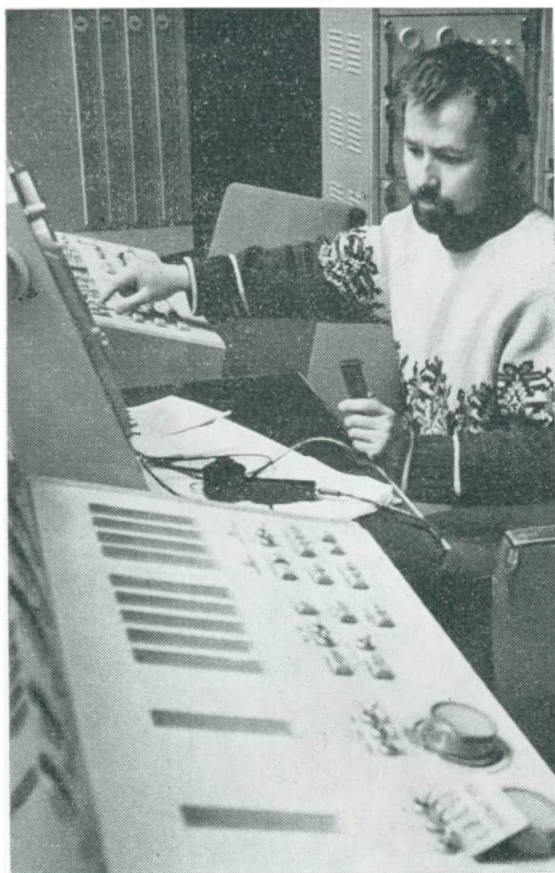


Konstruktionschema des 6-m-Spiegelteleskops im Kaukasus und Lichtweg im Gerät

möglicher besserer Ausnutzung des einfallenden Sternenlichtes einen Effekt erzielen, der bei herkömmlicher Technik von einem Teleskop mit 18 m Spiegeldurchmesser erreicht werden würde.

Doch das ist sicher noch Zukunftsmusik. Aber immerhin: Mit Hilfe elektronischer Bildverstärker lassen sich heute bereits Objekte bis 26. Ordnung erfassen, mit optischen Systemen werden lediglich Objekte bis 24. Ordnung erkannt. Sonne und Sirius haben etwa einen Helligkeitsunterschied von 26. Ordnung.

Der von Dr. Fomenko und seinen Mitarbeitern anvisierte Weg besticht auf jeden Fall durch seine Eleganz. Denn Teleskope dieser Größenordnung, das zeigen alle internationalen Vergleiche, benöti-



*Am Steuerpult
des Teleskops*

gen eben rund 20 Jahre für die Projektierung und den Bau. Beim derzeitigen Entwicklungstempo sind aber gerade auf dem Gebiet der Elektronik in einer solchen Zeitspanne gewaltige Fortschritte zu erwarten.

In dem idyllisch gelegenen Nishni Archys, am Ufer des Gebirgsflusses Große Selentschuk, werden entsprechende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für hochempfindliche Signalempfänger betrieben. Parallel, so erfahren wir weiter, entsteht bereits ein weiterer Hauptspiegel, bei dem die neuesten Erkenntnisse der Glasforschung eingesetzt werden und der ebenfalls die Möglichkeit astronomischer Forschung noch erweitern wird.

Regelmäßig – einmal in drei Jahren – wird der Hauptspiegel mit einer neuen Aluminiumschicht überzogen, um eine gleichbleibende Beobachtungsqualität zu gewährleisten. Das erfolgt mit Hilfe der

Bedampfungstechnik im Hochvakuum. Eine entsprechende Anlage gehört zur Standardausrüstung des Teleskopgebäudes.

Wird eine Neuverspiegelung notwendig, läßt sich der 6-m-Glasgigant auf einen speziellen Transportwagen absenken, der unter das senkrecht stehende Teleskop gefahren wird. Mit dem Wagen gelangt der Spiegel durch eine Schleuse in die Vakuumkammer, die neben dem Kuppelsaal angeordnet ist. Drei Tage dauert es, bis die Oberfläche mit einer neuen, hauchdünnen Spiegelschicht aus Metall versehen ist. Dann gehen die nächtlichen Routinearbeiten weiter, entsprechend den halbjährlich festgelegten Arbeitsplänen des Astrophysikalischen Spezialobservatoriums.

Die Welt Albert Einsteins

Die Suche nach Hinweisen über den Zustand, in dem sich Sterne, Galaxien und Galaxienhaufen, ja das Universum überhaupt, vor vielen Milliarden Jahren befanden, ist für die Astronomen unserer Tage eine Selbstverständlichkeit. Denn sie wissen, alles in der Natur, auch in den kosmischen Weiten, verändert sich, hat eine Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft. Dieses Wissen freilich ist noch recht jung.

Jahrtausende lang geisterte durch die Köpfe der Menschen die Vorstellung von einem ruhenden Element im Kosmos, in der Welt. Eine reiche, in sich widersprüchliche Ideenfülle brachten die großen Denker der Antike hervor. Das Bild einer im Ganzen ruhenden Welt findet sich beispielsweise bei dem griechischen Philosophen Aristoteles. Für ihn war die Welt von endlicher Ausdehnung, zeitlich aber unbegrenzt. Der ruhende Pol im Mittelpunkt dieser Aristotelischen Welt war die Erde, umgeben von den Sphären des Mondes, der Planeten und der Fixsterne. In der Welt unterhalb der Mondsphäre – also auf der Erde und in ihrer Atmosphäre – sollte alles veränderlich und unvollkommen sein, die Welt oberhalb der Mondsphäre indessen vollkommen und unveränderbar.

Im 15. Jahrhundert, um ein weiteres historisches Beispiel herauszugreifen, begann sich mit den Vorstellungen des Gelehrten Cusanus, der einen Mittelpunkt der Welt ablehnte und das Weltall für räumlich unendlich hielt, eine neue Ansicht vom Kosmos herauszubilden. Cusanus argumentierte folgendermaßen:

»Die Welt hat . . . keine Peripherie; hätte sie Zentrum und Peripherie, so hätte sie ihren Anfang und Ende in sich selbst, die Welt wäre in bezug auf ein anderes begrenzt . . . Es kann somit auch die Erde, die das Zentrum nicht sein kann, nicht ohne alle Bewegung sein . . . am Himmel sind keine unbeweglichen und fixen Pole . . .« Das von Copernicus begründete Weltsystem nahm der Erde endgültig ihren Vorzugsplatz als »Weltzentrum«. Für Giordano Bruno existierten im Kosmos bereits unendlich viele »Weltkugeln«, etwa vergleichbar der Erde und praktisch unabhängig voneinander.

Seit Copernicus, vor allem aber seit Galilei, Kepler und Newton, blieben die Erkenntnisse über die Struktur und die Entwicklung des



*Albert Einstein –
auf einer Aufnahme
aus dem Jahre 1920*

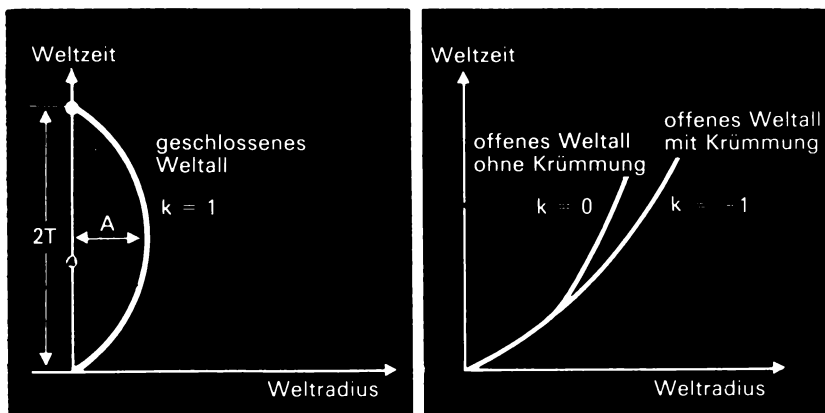
Weltalls nicht mehr vorrangig allgemeinen philosophischen Überlegungen überlassen, sondern wurden mehr und mehr durch fundierte astronomische, physikalische oder chemische Untersuchungsmethoden und Forschungsergebnisse abgesichert. Von der experimentellen Seite her waren es vor allem die Entwicklung neuer Beobachtungsgeräte wie Fernrohre, Spiegelteleskope und noch später Radioantennen sowie die Technik der von R. Bunsen und R. Kirchhoff im vorigen Jahrhundert entwickelten Spektralanalyse, welche die unmittelbare Beobachtung immer weiter von der Erde entfernter kosmischer Objekte und die Analyse des empfangenen Lichtes ermöglichten. Die Entwicklung anderer Gebiete der Physik – z. B. Thermodynamik, Elektrodynamik, später auch die Quantenphysik – schuf ein solides Fundament, die gewonnenen Beobachtungsdaten in ihrer Vielfalt zu deuten und zu theoretisch fundierten Gesamtvorstellungen zu verallgemeinern. In den letzten Jahrzehnten schließ-

lich wurde eine Reihe neuer »Beobachtungsfenster« zum Kosmos aufgestoßen. Heute werden die kosmischen Signale in einem breiten Frequenzbereich empfangen und für die Forschung ausgewertet. Neben der Radioastronomie entstand die Röntgenastronomie, welche die von verschiedenen kosmischen Objekten ausgesandte Röntgenstrahlung registriert und den übrigen astronomischen Beobachtungsdaten hinzufügt. Erdsatelliten und Planetensonden schufen die Möglichkeit, die für spezielle astronomische Beobachtungen störende atmosphärische Hülle der Erde zu umgehen, wenn auch die exakte Lagestabilisierung derartiger Flugkörper im Raum einige technische Schwierigkeiten bereitet und die Auflösengenauigkeit der auf diesem Wege möglichen Beobachtungen zur Zeit noch einschränkt. Die in den Raumsonden eingebauten Instrumente ermöglichten erstmals eine Teilchenastronomie, d. h., aus der Natur der im kosmischen Raum vorhandenen Teilchenströme Rückschlüsse über kosmische Entwicklungsprozesse zu ziehen. Jüngstes Kind dieser Entwicklung ist die Neutrino-Astronomie, für die völlig neuartige Teleskope entwickelt wurden, bei denen Erkenntnisse und Techniken der Atom- und Hochenergiephysik Anwendung finden.

Das theoretische Fundament für das physikalische Weltbild der Kosmologie bildeten lange Zeit Newtons Erkenntnisse über das Wesen der Gravitation der im Kosmos wirkenden universellen Kraft. Auf diesem physikalischen Fundament konnte z. B. die Bewegung der Planeten – bis auf minimale Störungen – erklärt werden. Für eine widerspruchsfreie Theorie über die Entwicklungsprozesse des Kosmos als Ganzes, für die Erklärung vieler astronomischer Beobachtungsergebnisse unseres Jahrhunderts reichte die Newtonsche Mechanik aber nicht aus.

Das theoretische Fundament für die moderne Physik, insbesondere aber auch für die heutige Astronomie und Astrophysik, schuf Albert Einstein (1879–1955) mit seiner 1915 fertiggestellten Allgemeinen Relativitätstheorie. Diese neue Theorie enthielt zugleich gänzlich neue Vorstellungen über das Wesen der Gravitation, jener im Kosmos vorherrschenden universellen Anziehungskraft zwischen Massen.

Einstein fand heraus, daß die geometrische Struktur eines Raumes und die in ihm verteilte Masse auf charakteristische Weise wechselseitig zusammenhängen. Dieser Zusammenhang freilich ist schwer zu beschreiben. Er entzieht sich teilweise der menschlichen Vorstellungskraft, die an den physikalischen Vorgängen auf der Erde, nicht aber in den unendlichen Weiten des Kosmos geschult ist.



Entwicklung des Weltradius im Laufe der Zeit in den drei möglichen Varianten des Einstein-Friedmann-Kosmos

Zu den gravierendsten Schlußfolgerungen aus der neuen Gravitationstheorie zählte die Erkenntnis, daß der reale kosmische Raum eine gesetzmäßige Expansion ausführt. Das heißt, alle kosmischen Objekte – Galaxien und Galaxiengruppen, Quasare oder Nebel – bewegen sich voneinander fort. Milliarden Jahre zuvor waren diese Objekte dichter beieinander als heute, ihr Abstand vergrößerte sich im Laufe der Zeit immer weiter, gleichzeitig nahm ihre »Fluchtgeschwindigkeit« ständig zu. Daß es bei dieser allgemeinen Expansion des kosmischen Raumes kein Zentrum gibt, ist eine Folge der besonderen Krümmung dieses Raumes. Darunter ist zu verstehen, daß sich beispielsweise Licht oder gleichförmig bewegte Massen nicht auf Geraden, sondern entlang gekrümmter Bahnen bewegen, die gewissermaßen als natürliche Koordinatenlinien anzusehen sind.

Diese zunächst hypothetischen Konsequenzen einer Furore machenden physikalischen Theorie riefen unter den zeitgenössischen Theoretikern und auch Philosophen je nach Veranlagung Begeisterung, Ablehnung und Skepsis hervor, lösten aber auch wichtige Impulse zum Weitersuchen in die neugewiesene Richtung aus. In wenigen Jahren legten Mathematiker und Physiker vieler Länder spezielle mathematische Lösungen des von Einstein entwickelten Systems von Gleichungen zur Beschreibung des Zusammenhangs von geometrischem Raum, Masse und Strahlung vor, die nicht zuletzt auch entsprechend unterschiedliche Aussagen über mögliche Entwicklungswege des Kosmos in seiner Gesamtheit beinhalteten.

Eine dieser Lösungen hat den wissenschaftlichen Meinungsstreit der Jahrzehnte als »Sieger« überdauert.

Im Jahre 1922 veröffentlichte der sowjetische Mathematiker A. A. Friedmann (1888–1925) in der Berliner »Zeitschrift für Physik« eine weitere Lösung der Einsteinschen Gravitationsgesetze, in der er auf bestimmte hypothetische Annahmen, die Einstein bei seiner von ihm selbst vorgenommenen Lösung des Gleichungssystems traf, verzichtete. Das Friedmann-Modell beschrieb eine geschlossene Welt mit positiver, zu jedem Zeitpunkt konstanter Raumkrümmung. Der Mittelwert aller in diesem Raum verteilten Sternmassen und Nebel, die sogenannte mittlere Massendichte, nahm dabei einen endlichen Wert an. Im Unterschied zum ursprünglichen Einstein-Modell änderten sich aber Krümmungsradius und Massendichte im Laufe der Zeit. Dieses Modell eines Entwicklungskosmos sagte theoretisch eine Raumexpansion, eine Galaxienflucht, voraus.

In einem weiteren Artikel aus dem Jahre 1924 vervollständigte Friedmann seine Lösungen. Er fand drei Möglichkeiten für die kosmische Expansion: Erstens setzt sich die Expansion im Laufe der Zeit immer weiter fort; auch in der zweiten Variante wäre das der Fall, jedoch mit stärkerer Zunahme der Expansionsgeschwindigkeit. Die dritte Möglichkeit schließlich sagt voraus, daß die allgemeine Raumexpansion einen Maximalwert erreicht und danach in eine allgemeine Kontraktion umschlägt. Welche der drei Möglichkeiten im realen Kosmos gegeben ist, hängt im theoretischen Modell des Einstein-Friedmann-Kosmos lediglich von der tatsächlichen Größe der dort gegebenen mittleren Massendichte zusammen. Sie genau zu bestimmen erweist sich aber auch heute noch als außerordentlich schwierig. Eine sachlich unanfechtbare Entscheidung zwischen diesen drei Möglichkeiten ist derzeit nicht möglich. War bei der ersten Friedmann-Lösung der Raum positiv gekrümmt, so ließen die anderen Lösungen auch eine entgegengesetzte Raumkrümmung zu bzw. auch geradlinige Raumkoordinaten.

An der prinzipiellen Richtigkeit der Einstein-Friedmann-Interpretation der Allgemeinen Relativitätstheorie für die Bedingungen des großräumigen realen Kosmos besteht heute unter Fachleuten kein Zweifel mehr. Nachdem zuvor viele andere physikalische Effekte im Experiment nachgewiesen wurden, die zu den klassischen Vorstellungen der Physik im Widerspruch standen, von der neuen Theorie aber exakt vorhergesagt wurden, gelangen bald auch in der Astronomie berühmt gewordene Experimente, die unmittelbare Aussagen über kosmologische Effekte ermöglichten.

Berühmte Experimente

Die grundsätzliche Schwierigkeit, die Gravitationstheorie mit ihren Aussagen im Experiment zu prüfen, bestand darin, daß die Gravitation die weitaus schwächste der vier bekannten Kräftearten der Natur ist. Gravitation, schwache, elektromagnetische und starke Wechselwirkung stehen im Verhältnis 10^{-39} ; 10^{-5} ; 10^{-2} ; 1 zueinander, d. h., die im Atomkern zwischen zwei Teilchen wirkende Kernkraft ist 10^{39} mal stärker als die gleichzeitig wirkende gegenseitige Massenanziehung. Das macht deutlich, daß in der irdischen Physik Gravitationseffekte durch andere physikalische Effekte wesentlich überlagert werden.

Eine weitere prinzipielle Schwierigkeit besteht darin, daß unsere Erde und auch die Sonne nur sehr schwache Gravitationsfelder erzeugen, für schwache Felder die Relativitätstheorie aber nur eine wenig von Null verschiedene Raumkrümmung voraussagt. Alle physikalischen Vorgänge sind daher in guter Näherung mit der bewährten Newtonschen Mechanik erklärbar. Starke Gravitationsfelder hingegen werden von weit entfernten kosmischen Objekten erzeugt, hier kommen dafür aber Beobachtungsschwierigkeiten ins Spiel und die geringe Kenntnis über den Zustand der Materie unter den in diesen Objekten herrschenden Bedingungen.

Erst die dank großer Fortschritte aller wissenschaftlich-technischen Zweige heute erreichbaren Meßgenauigkeiten haben es ermöglicht, auch die geringen Abweichungen der tatsächlichen relativistischen Raum-Zeit-Struktur von der euklidischen nachzuweisen. Eine Vielzahl von Befunden bestätigen heute die Richtigkeit der Grundaussagen der Einsteinschen Gravitationstheorie.

Die ersten experimentellen Hinweise auf die Richtigkeit des von Einstein eingeschlagenen Weges lagen bereits wenige Jahre nach Veröffentlichung der Theorie vor. In Frage kamen drei relativistische Gravitationseffekte, die ihren Ursprung durch die gravitationsbedingte Raumkrümmung im Schwerfeld der Sonne haben:

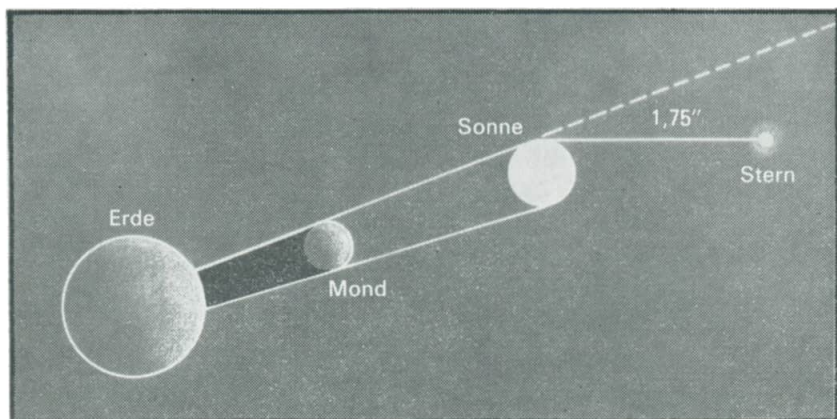
- die Ablenkung des Sternenlichtes im Gravitationsfeld der Sonne,
- die bislang nicht erklärbaren Bahnstörungen einiger Planeten,
- die Rotverschiebung der Spektrallinien der von der Sonne bzw.



Der in den 20er Jahren erbaute Einstein-Turm in Potsdam sollte mit seinem Sonnenteleskop einen experimentellen Beweis für die Relativitätstheorie liefern.

von Weißen Zwergen ausgesandten Strahlung als Folge des dort vorhandenen Gravitationsfeldes.

Die von der Theorie vorhergesagte Ablenkung des Fixsternlichtes in Sonnennähe hatten englische Physiker bereits am 29. Mai 1919 bei der Sonnenfinsternis in Sokral (Brasilien) und auf der Insel Principe (Westafrika) mit guter Näherung bestätigt. Während einer Sonnenfinsternis sind auch Sterne sichtbar, die scheinbar unmittelbar neben der Sonne plaziert sind, deren Licht aber gewöhnlich von der Intensität des Sonnenlichtes überdeckt wird. Das von diesen Sternen ausgehende Licht wird im Gravitationsfeld der Sonne abgelenkt, der Lichtstrahl verändert seine Richtung, d. h., der Stern wird an einer etwas veränderten Position gesichtet als bei



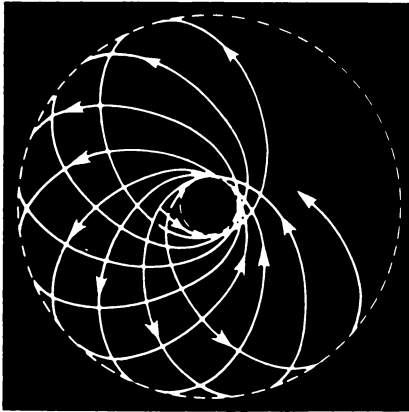
Ablenkung des Sternenlichts im Schwerfeld der Sonne

Aufnahmen am nächtlichen Himmel. Diese Ablenkung sollte nach der theoretischen Vorhersage genau 1,74 Sekunden betragen für einen Lichtstrahl, der im Abstand von einem Sonnenradius an der Sonne vorbeigeht. Diese Standortverschiebung wurde 1919 von den Astronomen an sieben beobachteten Sternen tatsächlich registriert, in guter numerischer Übereinstimmung mit den theoretisch vorhergesagten Werten.

Ähnliche Beobachtungen an Sonnenfinsternissen wurden von anderen Forschern in den Jahren 1922, 1929, 1947 und 1952 erfolgreich wiederholt.

Im Jahre 1967 gelang es der Gruppe um den amerikanischen Wissenschaftler I. Shapiro, mit Hilfe der Radioastronomie die Ablenkung der elektromagnetischen Strahlung der Quasare 3 C 279 und 3 C 273 B im Schwerfeld der Sonne zu messen. Sie ermittelten eine Ablenkung von 1,73 Bogensekunden mit einer Meßgenauigkeit von $\pm 0,05$ Bogensekunden.

Die Aufklärung der Störung im Vorrücken des Merkurperihels zählt ebenfalls zu den von Einstein selbst angeführten Hinweisen auf die Richtigkeit des eingeschlagenen Weges. Bekanntlich bewegt sich der Merkur auf einer elliptischen Bahn um die Sonne. Diese Bahnellipse liegt aber nicht fest im Raum, sondern dreht sich selbst allmählich um die Sonne, d. h., präziser ausgedrückt, der Merkur bewegt sich nicht auf einer geschlossenen Ellipsenbahn, sondern auf einer rosettenähnlichen Flugbahn. Die Rotationsbewegung dieser Ellipse, das Vorrücken des Merkurperihels, erreicht pro Jahrhundert einen Wert von 43 Bogensekunden. Diese Tatsache wurde von dem



Die Periheldrehung der Merkurbahn

Astronomen Leverrier bereits 1859 erstmals ermittelt. Die Newtonsche Mechanik vermochte aber nur einen Teil dieses Wertes mit Hilfe eigens zu diesem Zweck ersonnener, wenig wahrscheinlicher Hypothesen zu erklären.

Die Einsteinsche Gravitationstheorie indessen sagte aus, daß in einem Schwerfeld wie dem der Sonne die Planetenbahnen notwendigerweise rotieren müssen. Bei allen Planeten, bis auf den Merkur, ist dieser Effekt so klein, daß er sich den Beobachtungen im Rahmen der erreichbaren Meßgenauigkeit ganz oder teilweise entzieht. Für den Merkur, so ergab Einsteins Theorie, müßte diese Rotationsbewegung gerade 43,03 Bogensekunden pro Jahrhundert ausmachen.

Experimentell um vieles komplizierter war hingegen ein zufriedenstellender Beweis für die von der Allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagte Rotverschiebung im Lichtspektrum der Sonne und Weißer Zwerge. Einstein hatte gezeigt, daß in einem – gegen ein galileisches Bezugssystem – rotierenden System zwei gleichbeschaffene Uhren in verschiedenem Abstand vom Rotationszentrum verschieden rasch laufen. Dieses Ergebnis gilt auch vom Standpunkt eines mit der Scheibe rotierenden Beobachters, es gilt für Gravitationsfelder überhaupt. Und da ein Spektrallinien emittierendes Atom als Uhr anzusehen ist, folgt nach Einstein daraus die Notwendigkeit, daß die Frequenzen, die ein Atom emittiert bzw. adsorbiert, vom Potential des Gravitationsfeldes abhängt, in dem es sich gerade befindet.

Das von den Atomen an der Oberfläche eines Sternes ausgesandte Licht müßte als Folge des dort vorherrschenden relativ hohen Gravitationsfeldes sein Spektrum zu hohen Wellenlängen, zum

roten Spektralbereich hin verschieben, verglichen mit Lichtspektr $\ddot{u}$ m gleicher Atome, die im »freien« Weltraum oder auf der Erde mit ihrem $\ddot{u}$ beraus schwachen Feld $\ddot{S}$ trahlung emittieren. Bei der Sonne sollte diese Frequenzdifferenz etwa den zweimillionsten Teil der »Grundfrequenz« ausmachen.

Um diesen Effekt experimentell zu bestimmen, entstand Anfang der 20er Jahre auf dem Potsdamer Telegrafenberg der von dem bekannten Architekten Mendelsohn entworfene sogenannte Einstein-Turm, an dessen Konzipierung Albert Einstein ma $\ddot{u}$ geblich mitgewirkt hat. In ihm wurde ein leistungsstarkes Sonnenteleskop von Carl Zeiss, Jena, installiert. Es zeigte sich aber, da $\ddot{u}$ das Gravitationsfeld der Sonne zu schwach und Turbulenzen an ihrer Oberfl $\ddot{a}$ che zu stark sind, um im Rahmen der erzielbaren Genauigkeit diesen Effekt an unserem Zentralgestirn bestimmen zu k $\ddot{o}$ nnen. Der erste experimentelle Beweis f $\ddot{u}$ r diesen Effekt gelang deshalb 1925 anderen Forschern an einem sogenannten Wei $\ddot{s}$ en Zwerg, dem Sirius B. Wei $\ddot{s}$ e Zwerge sind kollabierte Sterne mit kleinem Radius, an deren Oberfl $\ddot{a}$ che deshalb ein sehr starkes Gravitationspotential vorherrscht. Der Nachweis gelang an einer bestimmten Linie im Spektrum des Wasserstoffatoms, die auf den Fotoplatten – gegen $\ddot{u}$ ber Aufnahmen von irdischem Wasserstoff – an einem verschobenen Platz auftauchte.

Im Jahre 1954 konnte die Verschiebung dieser und einer weiteren Wasserstofflinie im Spektrum eines anderen Wei $\ddot{s}$ en Zwerges nachgewiesen werden. Mit einer Genauigkeit von 5% wurde schlie $\ddot{s}$ lich im Jahre 1964 bei Messungen $\ddot{u}$ ber die ganze Sonnenscheibe hinweg die Verschiebung einer Natriumlinie auch im Sonnenspektrum gefunden.

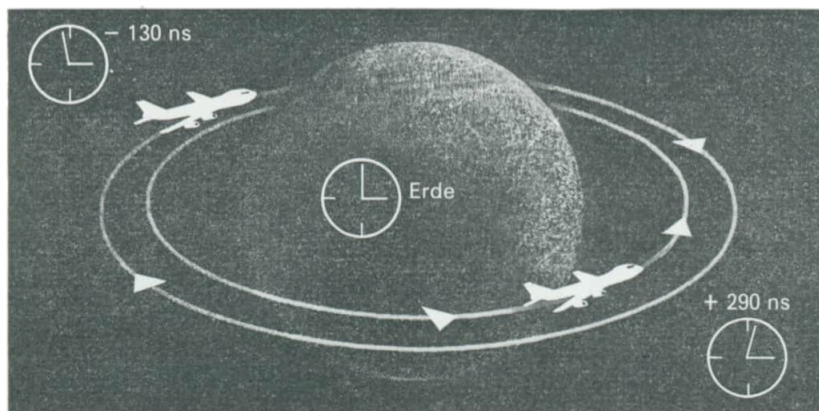
In den folgenden Jahren hat dann die Entwicklung in der Radar- und Satellitentechnik die experimentellen M $\ddot{o}$ glichkeiten f $\ddot{u}$ r den Nachweis der spektralen Verschiebung des in einem starken Gravitationsfeld ausgesandten Lichtes wesentlich erweitert.

Die Lichtablenkung im Gravitationsfeld der Sonne l $\ddot{a}$ st sich mit Hilfe zweier Betrachtungsweisen erkl $\ddot{a}$ ren, die in der vollst $\ddot{a}$ ndigen Einsteintheorie zusammenfallen. Zum einen r $\ddot{u}$ hrt der Ablenkungswert von der Kr $\ddot{u}$ mmung des Raumes her, d. h. von der Tatsache, da $\ddot{u}$ die Flugbahn der Lichtquanten im Raum schwerelos entlang der Geod $\ddot{a}$ ten des Raumes verl $\ddot{a}$ uft, die aber keine Geraden, sondern gekr $\ddot{u}$ mmte Linien sind. Zum anderen lie $\ddot{u}$ e sich die Ablenkung dadurch erkl $\ddot{a}$ ren, da $\ddot{u}$ die Geschwindigkeit der Lichtquanten in der N $\ddot{a}$ he der Sonne langsamer wird, d. h., sie h $\ddot{a}$ ngt vom jeweiligen

Abstand Lichtquant – Sonne ab. Die vom Ort abhängige Lichtgeschwindigkeit der Lichtquanten äußert sich – nach den Gesetzen der Wellenoptik – als Laufzeitverzögerung dieses Signals, gleichbedeutend mit einem geringen Umschwenken der Wellenfront, also einer Strahlablenkung. Ein in Sonnennähe vorbeigehender Lichtstrahl oder eine elektromagnetische Welle anderer Frequenz erleidet somit zugleich eine Richtungsablenkung wie auch eine Laufzeitverzögerung. Es ist nur eine Frage der experimentellen Möglichkeiten, welchen der beiden Effekte man am genauesten messen kann.

In den 70er Jahren wurden nun Laufzeitmessungen von an Erdsatelliten reflektierten Radarsignalen vorgenommen. In einem Bericht aus dem Jahre 1970 gab I. Shapiro seine Ergebnisse der Radar-Echo-Messungen an den Satelliten Mariner 6 und Mariner 7 bekannt, deren Werte von den Aussagen der Einsteinschen Theorie nur um 2% bis höchstens 4% abwichen. Diese Ergebnisse wurden auch von Laufzeitmessungen an Radarsignalen bestätigt, die von den Planeten Merkur und Venus in verschiedenen Positionen reflektiert wurden.

Mit einem Experiment aus dem Jahre 1972 konnten schließlich erstmals sogar die von der Relativitätstheorie vorhergesagten Zeiteffekte im direkten Uhrenvergleich experimentell bestätigt werden. Die beiden amerikanischen Wissenschaftler J. Hafele und R. Keating umflogen mit vier hochgenauen Atomuhren an Bord eines Düsenflugzeuges zweimal die Erde, einmal in westlicher, das andere Mal in östlicher Richtung. Für die auf der Erde verbliebenen Vergleichsuhren gleichen Typs und gleicher Ganggenauigkeit wirkten die Schwerkraft und die Zentrifugalbeschleunigung als Folge der Erdrotation. Auf die Uhren im Flugzeug wirkte wegen der größeren Höhe ein anderes Schwerepotential als auf der Erde. Bei der Bewegung in östlicher bzw. westlicher Richtung ergaben sich zusätzliche unterschiedliche Bedingungen, da sich beim Flug nach Osten die Eigengeschwindigkeit des Flugzeuges zur Rotationsgeschwindigkeit der Erde addierte. Folglich war die Zentrifugalbeschleunigung größer als bei dem Flug nach Westen. Für eine Flughöhe von 10 km und eine Fluggeschwindigkeit von 300 m/s ergab eine Abschätzung – unter Berücksichtigung erforderlicher Zwischenlandungen und anderer Faktoren –, daß beim Flug nach Osten die Uhren im Flugzeug um 130 ns (Nanosekunden) nachgehen, beim Flug nach Westen dagegen um 290 ns vorgehen müßten. Würde die Erde nicht rotieren, müßte die Differenz zu den Uhren am Boden in beiden Fällen denselben Betrag von 75 ns haben.



Uhrenvergleich im Flugzeugexperiment – alle drei Uhren gehen trotz gleicher Konstruktion und Genauigkeit anders.

Die Uhren im Flugzeug und auf der Erde gingen nach Beendigung des Fluges tatsächlich unterschiedlich, ein sehr populärer und überzeugender Beweis für die Richtigkeit einer Theorie. Auf dem Flug nach Osten zeigten die Atomuhren an Bord der Maschine etwa 50 ns zuwenig, bei Beendigung der Erdumkreisung in Richtung Westen dagegen 160 ns zuviel an.

Ein neuerlicher Uhrentest fand 1981 mit der Veröffentlichung seiner positiven Ergebnisse einen guten Abschluß. Ende der 70er Jahre hatte die amerikanische Weltraumbehörde eine hochpräzise Atomuhr – einen sogenannten Wasserstoff-Maser mit einer Ganggenauigkeit von 1 : 100 Billionen – bis in 10 000 km Höhe geschossen. Die Frequenz dieses Masers an Bord wurde über ein kompliziertes Auswertungsverfahren mit einer analogen Atomuhr auf der Erde verglichen. Die tatsächlich gemessene Gangveränderung der im Schwerfeld bewegten Atomuhr entsprach den theoretischen Vorhersagen mit einer bis dahin nie erreichten Genauigkeit von 0,07 %.

Aufsehenerregender aber waren in der Fachwelt jene Experimente, die erstmals auch direkte Indizien brachten.

Betrachtet man den nächtlichen Himmel mit dem Fernrohr, so sieht man neben den zahllosen einzelnen Sternen auch viele fremde Sternensysteme, in denen – ähnlich unserer eigenen Galaxis – viele Milliarden Sterne zu einem räumlich strukturierten Gebilde zusammengeballt sind. Die systematische Erforschung dieser Sternensinseln konnte aber erst in unserem Jahrhundert in Angriff genommen werden, als in den 20er Jahren das große Spiegelteleskop auf dem Mount Wilson in Betrieb genommen wurde.

Mit ihm gelang es nachzuweisen, daß die Galaxien, die bis dahin für extragalaktische Nebel gehalten wurden, in Wirklichkeit Zusammenballungen einzelner Sterne sind – im Unterschied zu den wirklichen Nebelwolken am Firmament, bei denen ionisiertes Gas im Raum diffuses Licht abstrahlt.

Eine zweite bedeutende Entdeckung an dem astronomischen Großgerät gelang bald darauf den beiden Astronomen M. L. Humason und E. P. Hubble. Sie fanden bei der Auswertung ihrer Fotos eine unerwartete Gesetzmäßigkeit: Die spektrale Zerlegung des Lichtes von weit entfernten kosmischen Quellen zeigte, daß die für Sterne typischen Spektrallinien zum roten Ende des sichtbaren Spektralbereichs verschoben sind (gegenüber vergleichbaren Sternaufnahmen aus unserer eigenen Galaxis). Entfernt sich eine Strahlungsquelle von einem Beobachter, so tritt ein Effekt auf, den schon im vorigen Jahrhundert der Physiker Christian Doppler entdeckt hatte: Der Beobachter registriert eine größere Wellenlänge, als tatsächlich ausgestrahlt wird – je größer die Geschwindigkeit, desto größer ist auch die Verschiebung der Wellenlänge bzw. Spektrallinien. Auf den Aufnahmen von Humason und Hubble war die Verschiebung der Spektrallinien um so größer, je weiter die beobachteten Galaxien von der Erde entfernt sind. Sah man diese Verschiebung also als Dopplereffekt an, so mußten sich alle Galaxien mit in der Entfernung wachsender Geschwindigkeit voneinander wegbewegen!

Damit war das erste direkte Nachweisexperiment für die kosmologischen Konsequenzen aus der Allgemeinen Relativitätstheorie – für die Raumexpansion bzw. die Galaxienflucht – gelungen.

Die gemessene Rotverschiebung im Licht ferner Galaxien gilt heute als sicherer Beleg für die Entfernung eines solchen Objektes und damit für sein Alter. Denn es läßt sich leicht ausrechnen, vor wie vielen Milliarden Jahren das heute von den Wissenschaftlern aufgefangene Licht auf die Reise ging, wenn man die zurückgelegte Wegstrecke kennt.

Wenn aber das Universum schon viele Milliarden Jahre lang expandiert, muß es früher kompakter gewesen sein, d. h., alle Objekte müssen viel enger benachbart gewesen sein. Theoretisch läßt es das Einstein-Friedmann-Modell zu, praktisch bis zu einem Zeitpunkt Null zurückzurechnen, bei dem alle heute im kosmischen Raum verteilte Materie bei unendlich hoher Massendichte im Volumen Null vereinigt war. Der Beginn der Expansion aus diesem mathematisch nicht mehr beschreibbaren Gebilde wird von den Wissenschaftlern als »Urknall« bezeichnet.

Eine erste physikalische Interpretation dieser Vorstellung gab 1931 der Physiker Lemaitre. Er extrapolierte die beobachtete Raumexpansion in die Vergangenheit bis zu einem »Uratom« mit einem Durchmesser etwa der Entfernung Erde–Sonne. In diesem Uratom sollte nach Ansicht Lemaitres einmal alle Masse zu einem einzigen Klumpen zusammengepreßt gewesen sein, bis dieses Uratom dann explodierte. Über den Zustand davor machte Lemaitre keine Angaben. Diese Deutung ist insofern inkonsequent, als die Friedmannschen Lösungen mathematisch eine Extrapolation, ein Rückrechnen beliebig nahe an den Zeitpunkt Null mit dem Volumen Null zulassen. Da Lemaitre als geweihter Priester – er wurde später Präsident der Päpstlichen Akademie der Wissenschaften – die Konsequenzen eines dann notwendig zu fordernden Schöpfungsaktes nicht verborgen geblieben sein können, umging er mit seinem Modell eines Uratoms die Vorstellung einer naiven Schöpfung der Welt aus dem Nichts.

Dieses »Explosionsmodell« wurde im Jahre 1948 von dem Physiker G. Gamow (1904–1968) gemeinsam mit zwei anderen Wissenschaftlern weiter präzisiert. Gamow griff die Idee Lemaitres auf, interessierte sich aber für die Expansionszeit vor dem Lemaitreschen »Uratom«. Gamow ging von der Vorstellung eines echten Nullpunktes aus, bei dem aus einem Nullvolumen die kosmische Expansion begann. Er untersuchte, was im folgenden, in den nächsten Sekunden, Minuten und Stunden geschah. Seine Untersuchungen sind später von anderen Forschern präzisiert worden. Gamow, der am Manhattan-Projekt beim Bau der ersten amerikanischen Atom-bombe mitgearbeitet hatte, wurde in seinen Überlegungen entscheidend von den kernphysikalischen Vorstellungen des Bombenbaus inspiriert. So beschäftigte ihn nach seinen eigenen Worten die Vorstellung, daß selbst Jahre nach der ersten Bombenexplosion in Nevada langlebige Explosionsprodukte zu finden waren, obwohl die Explosion selbst nur winzige Bruchteile von Sekunden gedauert hatte. Gamow berechnete analog, daß sich nach einer gewissen Zeit nach Beginn der Raumexpansion Strahlung von der übrigen, immer noch sehr verdichteten Materie losgelöst haben müsse, die als sogenannte Schwarzkörperstrahlung mit der weiteren Ausdehnung des Universums allmählich abkühlte.

Tatsächlich wurde dann im Jahre 1965 von den beiden Radioelektronikern A. A. Penzias und R. W. Wilson bei der Erprobung eines neuartigen Antennensystems eine den ganzen kosmischen Raum erfüllende isotrope Radiostrahlung entdeckt, deren Tempe-

ratur im folgenden mit etwa 2,7 K ermittelt wurde. Sie wird von den Astronomen als Relikt jener frühen, stark komprimierten Phase des Universums gewertet.

Heftig diskutiert war natürlich die Frage, ob die Raumexpansion tatsächlich in dem ominösen Nullvolumen ihren Ursprung hat. Die Einsteinschen Gravitationsgleichungen und die aus ihnen hervorgegangenen Friedmannschen Weltmodelle lassen – wie bereits gesagt – auf Grund der verwendeten mathematischen Hilfsmittel eine derartige Extrapolation zu. Der Ursprungspunkt hat in dieser Theorie die Gestalt einer sogenannten Singularität. Dennoch befriedigt natürlich die Vorstellung nicht, daß die ungeheure Bewegungsvielfalt des realen Weltalls ausgerechnet im Prototyp des Gestalt- und Strukturlosen – einem mathematischen Punkt – ihren Anfang genommen haben soll. Dieser Umstand war und ist dann auch Gegenstand eines intensiven wissenschaftlichen Meinungsstreits unter Astronomen, Physikern oder Philosophen und wurde nicht selten zu pseudowissenschaftlichen Begründungen für die Existenz eines materiellen Schöpfungsaktes – in welcher Gestalt auch immer – mißbraucht.

Für solch weitreichende Schlüsse wie über ein endliches Alter des Universums bzw. der Materie schlechthin oder einem Ende der kosmischen Entwicklung gibt es keinerlei experimentelle Befunde. Um diese Aussagen zu treffen, wird lediglich eine gute Theorie überinterpretiert, werden Folgerungen daraus abgeleitet, die die in die Theorie hineingegebenen hypothetischen Voraussetzungen nicht berücksichtigen. Unbestritten ist heute, daß der Kosmos eine bereits lang andauernde Expansion hinter sich hat. Unbestritten ist auch, daß diese Expansionsphase irgendwann einen Anfang gehabt hat. Wann aber dieser Anfang war, bei welchem physikalischen Zustand der kosmischen Materie sie einsetzte und welche Entwicklungsphasen der Kosmos zuvor durchlief, darüber kann heute noch kein Mensch wissenschaftlich bewiesene Aussagen treffen. Hier liegt gegenwärtig die Grenze zum noch Unbekannten, zum noch Unerforschten.

Je weiter man an Hand des mathematischen Modells in die Vergangenheit »zurückrechnet«, desto unbekannter und rätselhafter werden die dann wirkenden physikalischen Wechselwirkungen. Wie jedes mathematische Modell hat auch der »Einstein-Friedmann-Kosmos« vereinfachende Annahmen über die Struktur des Kosmos zur Voraussetzung, ohne die sich Friedmann nicht in der Lage sah, das vorgegebene komplizierte Gleichungssystem zu lösen. Verfolgt man also die Expansion in dieser Theorie zurück, so stößt nicht die

Welt an ihre Grenzen, sondern der Gültigkeitsbereich des mathematischen Modells. Denn vor der heute zu beobachtenden Phase einer allgemeinen Raumexpansion sind gewiß andere physikalische Prozesse unter Bedingungen abgelaufen, die der gegenwärtigen physikalischen Erkenntnis noch verschlossen sind und in dem Modell natürlich nicht berücksichtigt werden konnten.

Versuche, an der Grenze einer jeweils gegenwärtigen Naturerkenntnis mit mystischen, phantastischen oder religiös begründeten Deutungen aufzuwarten, sind so alt wie die Wissenschaft selbst. Die auch heute von manchen Wissenschaftlern und Philosophen vor allem in westlichen Ländern inszenierte Diskussion über die spektakuläre »Entstehung« des Kosmos, womit fast immer die Gesamtheit der materiellen Welt gemeint wird, ist ebenfalls in ihrem Wesen sehr alt.

»Beiläufig bemerkt«, schrieb beispielsweise Friedrich Engels vor über hundert Jahren, »wenn in der heutigen Naturwissenschaft der Kantsche Nebelball als Urnebel bezeichnet wird, so ist dies selbstredend nur beziehungsweise zu verstehen. Urnebel ist er, einerseits, als Ursprung der bestehenden Weltkörper und, andererseits, als die früheste Form der Materie, auf die wir bis jetzt zurückgehen können. Was durchaus nicht ausschließt, sondern vielmehr bedingt, daß die Materie vor dem Urnebel eine unendliche Reihe anderer Formen durchgemacht habe.«

Ein halbes Jahrhundert später argumentierte Albert Einstein, versierter Kenner der in der Zwischenzeit entstandenen neuen, relativistischen Kosmologie, in gleicher Weise: »Man darf deshalb die Gültigkeit der Gleichungen auf Gebiete sehr hoher Feld- und Materiedichten nicht voraussetzen«, schrieb er hinsichtlich der frühen Entwicklungsphasen des neuen kosmischen Modells, »und man darf nicht schließen, daß der ›Anfang der Expansion‹ in mathematischem Sinne eine Singularität sein müsse. Wir müssen uns nur bewußt sein, daß die Gleichungen über derartige Gebiete nicht fortgesetzt werden dürfen. Diese Erwägung ändert aber nichts an der Tatsache, daß der ›Weltanfang‹ vom Standpunkt der Entwicklung der jetzt vorhandenen Sterne und Sternsysteme wirklich einen Anfang bedeutet, in dem jene Sterne und Sternsysteme als einzelne Gebilde noch nicht existiert haben.«

Nur ein Kosmos – aber viele Modelle

Die heutigen astronomischen Beobachtungsergebnisse zeigen eine äußerst große qualitative Vielfalt der im Kosmos ablaufenden Prozesse, die Existenz vieler unterschiedlicher Objekte, denen die Prädikate »jung« und »alt« zuerkannt werden müssen. Die heutige Astronomie ist beispielsweise Zeuge der »Geburt« kosmischer Objekte und zugleich auch des »Untergangs« anderer Objekte. Quasare, die am weitesten von der Erde entfernten bekannten kosmischen Strukturen, verfügen über ungewöhnliche physikalische Eigenschaften, wie beispielsweise Energievorrat und Energiefreisetzung, die auf einen Materiezustand hinweisen, der möglicherweise nur vor vielen Milliarden Jahren im Kosmos realisiert war.

Astronomen kommen heute zu dem Schluß, daß rund eine Milliarde sichtbare Galaxien existieren. Unsere Sonne mit ihren Planeten befindet sich am Rande einer dieser Galaxien, die sehr verschiedene Gestalt und Größe besitzen können. Die Galaxien sind am Himmel nicht gleichmäßig verteilt. Es ballen sich einige tausend von ihnen zu großen Haufen zusammen.

Noch längst nicht erschlossen sind Formenvielfalt und die Entwicklungsprozesse, die sich mit Hilfe der modernen astronomischen Beobachtungsmittel dem Forscher auftun. So existieren sichtbare Objekte, die sich in der Charakteristik des ausgestrahlten Lichtes wesentlich voneinander unterscheiden. Seit Jahren sind die sogenannten Pulsare bekannt, offensichtlich schnell rotierende Sterne, die aus Neutronen bestehen und über eine unvorstellbar hohe Massendichte verfügen. Sie senden wie ein Blinkfeuer Strahlung im sichtbaren oder unsichtbaren Spektralbereich aus. Es mehren sich die Anzeichen für die Existenz der sogenannten Schwarzen Löcher, deren Massendichte so enorm hoch ist, daß Lichtquanten als Folge der extremen Gravitation die Sternoberfläche nicht mehr verlassen können. Sie sind gewissermaßen das Endstadium, das Sterne einer gewissen Größe nach Abschluß ihrer Evolution einnehmen.

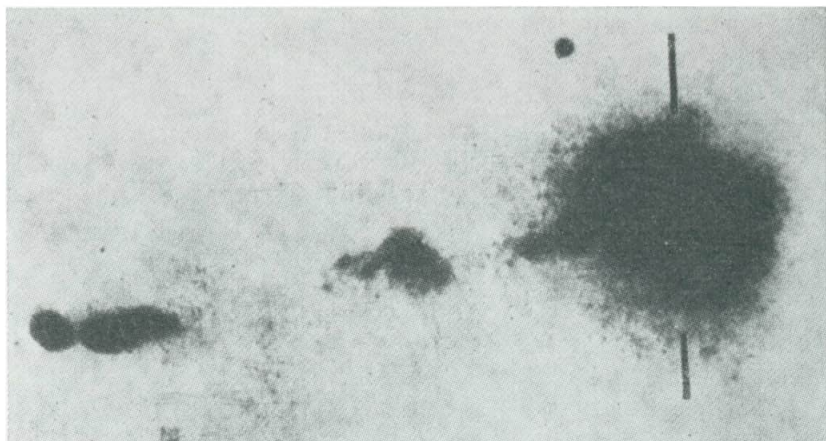
Und schließlich beobachten Astronomen, wie aus den Kernen einiger Galaxien gewaltige Sternmengen als Folge gigantischer energetischer Prozesse herausgeschleudert werden und selbst wieder neue Galaxien bilden. Diese Erscheinungsformen gilt es schrittweise



*Die Spiralgalaxie
M 51 ist über eine
»Brücke« mit ihrem
Begleiter, der Galaxie
NGC 5195, verbunden.*

aufzuklären. Stillstand im Universum gibt es jedenfalls nicht. Die große Vielfalt der Entwicklungsformen ruft von einer ganz praktischen Seite her zwangsläufig die Frage nach den Gesetzmäßigkeiten der Entwicklung der verschiedenen kosmischen Objekte auf den Plan, die Frage eben nach der gesetzmäßigen Entwicklung im Laufe der Zeit. Das trifft sowohl für relativ kleine Körper wie einzelne Sonnen oder gar Planeten zu, aber auch für größere Masse- und Energiemanifestationen, z. B. Galaxien und Galaxienhaufen sowie natürlich auch für die Gesamtheit aller heute bekannten und beobachtbaren Galaxien, die Metagalaxis. Die Frage nach dem zeitlichen Werdegang und ihrer Ausdehnung auf den bekannten Raum als Ganzes hatte ja die bereits erwähnten experimentellen Befunde der spektralen Rotverschiebung, der Strahlung weit entfernter (d. h. sehr alter) Galaxien sowie der kosmischen Hintergrundstrahlung zur Voraussetzung.

Die Einsteinsche Gravitationstheorie ermöglichte es auf besonders elegante Weise, diese zeitliche Entwicklung des Kosmos in seiner Gesamtheit zu modellieren. Diese Theorie läßt sich zugleich auch im wesentlichen mit wichtigen Erkenntnissen über die Etappen der Sternentstehung verbinden.



Die Galaxie IC 1182 mit aus ihrem Kern herausgeschleuderten Materieverdichtungen

Was immer der »Urknall« physikalisch auch gewesen sein mag – experimentelle Daten belegen nun einmal, daß die im Weltall vorhandene Masse, Strahlung usw. vor Milliarden von Jahren auf kleinerem Raum zusammengeballt war. Die Metagalaxis war daher in ferner Vergangenheit wesentlich dichter und viel heißer als heute. Die seit damals bestehende Expansion der Metagalaxis, die Expansion des Raumes, hält auch heute noch an.

Es gibt eine Reihe anderer kosmologischer Weltmodelle als das von Einstein und Friedmann, die ebenfalls diese experimentellen Befunde der Astronomie hinreichend genau beschreiben. Den vielen mathematischen Kosmosmodellen steht aber nur ein Kosmos gegenüber. Die genannten experimentellen Befunde reichen einfach noch nicht aus, um in letzter Konsequenz über die wirklichen physikalischen Prozesse in einer Welt, die vor vielen Milliarden Jahren bestand, zuverlässig Auskunft geben zu können.

Die klassische Vorstellung darüber, wie es zur Entstehung kompakter Himmelskörper kam, geht davon aus, daß seit dem »Urknall« mit zunehmendem Alter des Universums aus der vorhandenen homogenen Masse-Energie-Manifestation zunächst Elementarteilchen, dann Atomkerne, später komplette Atome unterschiedlicher Ordnungszahl entstanden. Noch später kam es in der dann bereits in einem großen kosmischen Volumen verteilten gasförmigen Materie zu Dichtestörungen, die wiederum später zu lokaler Kondensation von Masse, d. h. zur Entstehung von Sternen führten.

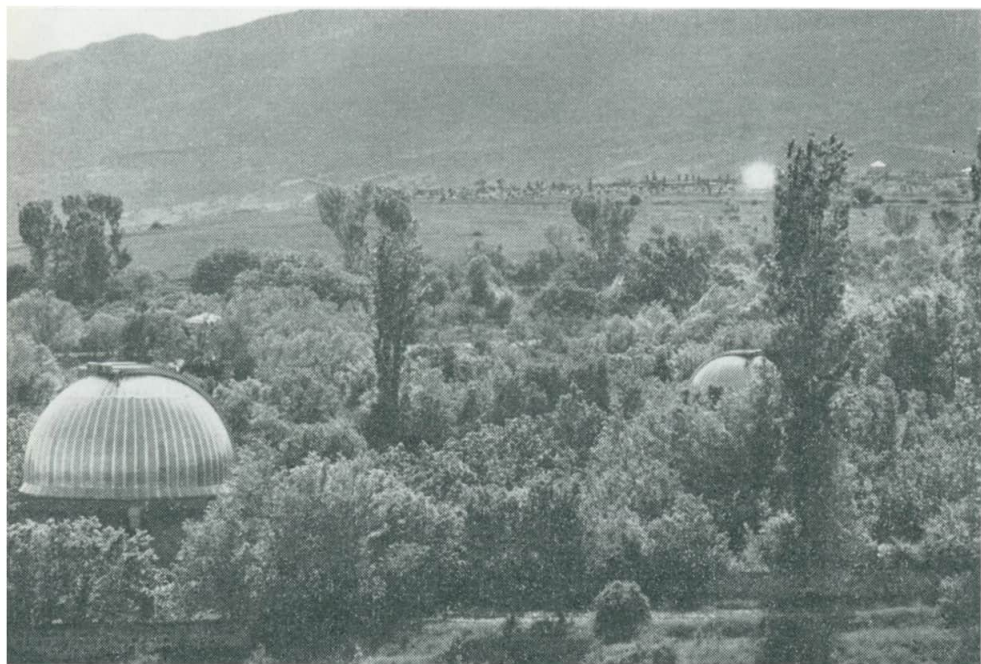
Während der Expansion des »Urgases« und der damit verbundenen Abkühlung gab es beispielsweise nach Ansicht der beiden sowjetischen Astrophysiker Gurewitsch und Tschernin bei einer Temperatur von 10^{10} K eine besondere Phase. Photonen sollten hier so hohe Energien besessen haben, daß sie sich bei Zusammenstößen mit Elektronen oder Protonen in ein Elektron-Positron-Paar verwandeln konnten. Strahlungsenergie und die Energie eines derartigen Teilchenpaares sind bei der genannten Temperatur etwa gleich groß. In dieser Entwicklungsphase konnten auch Paare der anderen heute bekannten Teilchen und Antiteilchen existieren.

Erst bei weiterer Expansion der Metagalaxis erlaubten die energetischen Verhältnisse, daß sich Protonen und Neutronen zu leichten Atomkernen, beispielsweise Wasserstoff, vereinten. Die schweren Kerne indessen entstanden erst später bei Kernreaktionen in den Sternen.

Damit Galaxien und Sterne entstehen konnten, mußte stoffliche Materie aus dem übrigen metagalaktischen Medium zunächst in Form von verdichteten Gaswolken kondensieren. Während dieser Gravitationskondensation komprimierten einzelne, relativ kleine Teile aber wesentlich schneller.

Die sowjetischen Physiker J. Seldowitsch und I. Nowikow untersuchten im Jahre 1967 die Möglichkeit, die Ursachen für die Galaxienbildung in Dichteinhomogenitäten zu finden. Sie nahmen u. a. an, daß in der Metagalaxis früherer Zeit Stoffverdichtungen existierten, aus denen zunächst Objekte mit etwa einer Million Sonnenmassen, sogenannte Vorsterne, kondensierten. In diesen Vorsternen verliefen Kernreaktionen so schnell, daß der gesamte hier vorhandene Wasserstoff in relativ kurzer Zeit nahezu vollständig verbrannte. Danach explodierten die Vorsterne. Nach Ansicht von Seldowitsch und Nowikow heizte die bei der Explosion frei werdende Energie das metagalaktische Gas wieder auf, und neue Vorsterne konnten nicht mehr entstehen. Die Inhomogenitäten, die nach diesen Vorsternkatastrophen zurückgeblieben waren, hätten gewissermaßen die Kondensationskeime für die sich später verdichtenden Galaxien dargestellt.

Eine gänzlich neue Theorie der Sternentstehung entwickelte der sowjetische Astrophysiker Viktor A. Ambarzumjan. Er geht davon aus, daß dafür nicht Kondensations-, sondern Expansionsprozesse verantwortlich sind. Als erster Forscher der Welt hatte er 1947 bei der Auswertung umfangreicher Beobachtungsdaten nachgewiesen, daß auch heute am Himmelszelt die Geburt neuer Sterne und Stern-



systeme zu beobachten ist, und zwar als Folge gigantischer Explosionsprozesse in vorhandenen galaktischen Systemen.

Das von ihm geleitete Observatorium der Akademie der Wissenschaften der Armenischen SSR hat seither mit vielen astronomischen Entdeckungen und theoretischen Arbeiten, beispielsweise über die Dynamik in den Kernen von Galaxien, in der internationalen Fachwelt Anerkennung gefunden.

Ambarzumjans Überlegungen gehen unter anderem davon aus, daß jedes kosmische Teilsystem hinreichender Größe sich genauso verhält, wie es die theoretischen Weltmodelle von Einstein und anderen vorhersagen: es expandiert. Eine Vielzahl solcher Teilbereiche würde in ständiger Wechselwirkung miteinander stehen und ein »Ende« oder einen »Anfang« der Entwicklung nicht zulassen. Das führt letztlich zu der in der Diskussion zwischen namhaften Theoretikern in unserem Jahrhundert bereits aufgeworfenen Frage, ob es denn überhaupt einen Sinn hat, vom »Kosmos als Ganzem« zu sprechen. Vielleicht besteht der Kosmos vielmehr aus einer nach oben nicht abbrechenden Hierarchie von immer größer werdenden Systemen ?

Daß es außer unserer Galaxis in den Weiten des Alls Milliarden

*Das Observatorium in
Bjurakan in der
Armenischen SSR –
Arbeitsstätte des welt-
bekannten Astronomen
V. A. Ambarzumjan
(Bild links)*



*Auch aus dem
Zentrum der Radio-
galaxie Virgo A
(NGC 4486) wird im
Ergebnis gigantischer
energetischer Prozesse
ein Materiestrahl
herausgeschleudert.*

weiterer Galaxien gibt, ist ja schließlich eine noch sehr junge Erkenntnis. In dieser Vielzahl von Sterninseln konnten Astronomen aber bereits Haufen und sogar Superhaufen von Galaxien ausmachen. Kann es dann nicht aber noch größere Strukturen geben, deren Entdeckung nur eine Frage der Zeit ist? Wäre das, was den Astronomen wegen der instrumentell bedingten Beobachtungsgrenze von gegenwärtig etwa 18 Milliarden Lichtjahren Entfernung heute als »Universum« erscheint, in Wirklichkeit nur ein weiteres Obersystem in diesen Hierarchiestufen? Für derartige Spekulationen freilich gibt es derzeit keine Beobachtungsdaten. Eine solch experimentell zwingende Aussage müßte man allerdings dann treffen, wenn es gelänge, bei weiterer Leistungssteigerung der astronomischen Beobachtungsgeräte in noch größeren Entfernungen kosmische Objekte aufzufinden, die an der allgemeinen Expansionsbewegung der fernen Galaxien und Quasare nicht mehr teilnehmen. Sie würden dann mit Sicherheit nicht mehr zu unserer Metagalaxis gehören und diese hypothetische Frage eindeutig entscheiden.

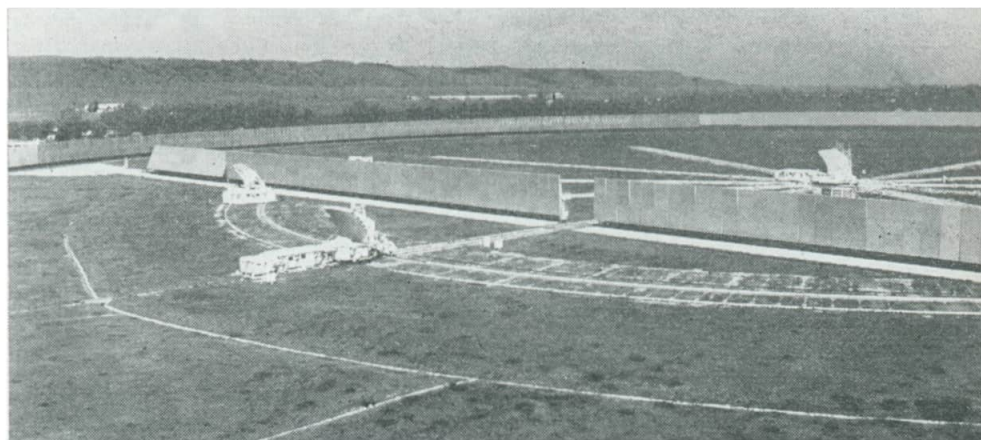
Radiowellen und ihre Botschaft

Das Weltall hat also eine sehr bewegte und auch heute noch in vielen Punkten durchaus rätselvollte Geschichte. Neuen Aspekten für unser kosmisches »Geschichtswissen« waren jene Wissenschaftler auf der Spur, die wir bei ihrer Arbeit am derzeit größten Spiegelteleskop im Nordkaukasus besucht haben.

Tagsüber, wenn die Teleskopkuppel geschlossen ist und die nächtlichen Beobachter ihren Schlaf nachholen, wirft aus dem Tal des Flusses Große Selentschuk ein gewaltiges Spiegelmonster bei klarem Wetter das Sonnenlicht in die Berge. Dieser rund 30 km entfernte spiegelnde Ring – von weitem an ein überdimensionales Fußballstadion erinnernd – ist das Radioteleskop RATAN 600 des Astrophysikalischen Spezialobservatoriums der Akademie der Wissenschaften der UdSSR. Wo das große optische Auge des Observatoriums seine Leistungsgrenzen hat, dort kann RATAN 600 die Beobachtungen fortsetzen.

RATAN 600 steht für Radio-Azimutal-Teleskop der Akademie der Wissenschaften. Die Zahl 600 gibt die Größe an: Der Durchmesser des imposanten Antennenrings aus übermannshohen Aluminiumscheiben mißt 600 m, sein Umfang beträgt fast 2 km. Damit ist es das größte Instrument für Radiobeobachtungen im All, zumindest, was den Antennendurchmesser und damit die erzielbare Genauigkeit bei der Lokalisierung kosmischer Radioquellen angeht.

Die Radioastronomie zählt zu den noch jungen Methoden dieser Wissenschaft. Wie bei der späteren Entdeckung der kosmischen Hintergrundstrahlung waren es Techniker der amerikanischen Firma Bell Telephon Laboratories, die in den 30er Jahren bei technischen Experimenten für die Nachrichtenübertragung per Funk eine Zufallsentdeckung von großer Tragweite machten. Karl Jansky hatte den Auftrag herauszufinden, mit welchem Rauschpegel man bei drahtlosen Telefonverbindungen über den Atlantik hinweg zu rechnen habe. Er baute eine entsprechende Antenne mit für damalige Verhältnisse erstaunlicher Richtwirkung und suchte damit den Himmel nach atmosphärischen Funkstörungen ab. Dabei stellte er sehr bald fest, daß aus bestimmten Richtungen des Alls



Das sowjetische Radioteleskop RATAN 600 im Kaukasus

verhältnismäßig starke Strahlung einfällt. Eine besonders intensive Radioquelle konnte er im Sternbild Schütze ausmachen.

Systematisch hat sich dann später Grote Weber mit diesem Phänomen befaßt, dessen von 1940 bis 1944 durchgeführte Arbeiten als die eigentliche Begründung der Radioastronomie angesehen werden. Im Jahre 1946 schließlich gelang es, im Sternbild Schwan eine Radioquelle so genau zu bestimmen, daß man sie wie einen sichtbaren Stern beschreiben konnte.

Sechs Jahre später konnte diese Cygnus A genannte Radioquelle mit einer bis dahin unbekannten, optisch sichtbaren Galaxis identifiziert werden. Bereits 1949 war es australischen Forschern gelungen, im Krebsnebel eine Radioquelle auch optisch zu identifizieren. Seither sind einige tausend solcher Galaxien bekannt geworden, die gerade im Radiowellenbereich eine besonders intensive Energieabstrahlung aufweisen. Ursache dieser Strahlung sind energetische Prozesse – beispielsweise das Beschleunigen bzw. Abbremsen von Elektronen –, die in den heißen Sternmassen und ihrer Umgebung ablaufen.

War der Empfang kosmischer Radiosignale auch ein wichtiger Fortschritt in der Astronomie, so erregten diese Messungen zunächst dennoch nicht allzu großes Aufsehen, lag es doch nahe, eine Energieabstrahlung nicht nur im sichtbaren Spektralbereich, sondern auch bei längeren Wellenlängen des elektromagnetischen Spektrums zu vermuten. Anders wurde es, als 1963 der amerikanische Astronom M. Schmidt mit dem »altbewährten« Teleskop auf dem Mount

Wilson die im dritten Katalog der Sternwarte von Cambridge unter der Nummer 273 vermerkte Radioquelle eingehend optisch aufs Korn nahm. Dabei konnte er nachweisen, daß diese Radioquelle mit einem Objekt, vergleichbar einem Stern 13. Größenklasse, identisch ist. Aber nicht nur das: Bei der Analyse einer Spektralplatte des Objektes 3 C 273, die versehentlich überbelichtet worden war, entdeckte er Spektrallinien, die offensichtlich an dieser Stelle des Spektrums überhaupt nichts zu suchen hatten.

Schmidt errechnete, daß diese Linien um etwa 16% zum roten Ende des Spektrums verschoben waren, nimmt man zum Vergleich das von einer irdischen Wasserstoffquelle aufgenommene Spektrogramm. Nahm man als Ursache dieses Meßwertes einen Dopplereffekt an, so mußte die Quelle 3 C 273 etwa 2,5 Milliarden Lichtjahre von der Erde entfernt sein und sich mit einer Geschwindigkeit von etwa 45000 km/s von uns fortbewegen. Wenn man aber ein so weit entferntes Objekt noch optisch erfassen konnte, schlußfolgerten die Astrophysiker, hätte es auf keinen Fall ein Stern sein können. Dieser hätte nämlich, um noch sichtbar zu sein, heller leuchten müssen als eine ganze Galaxis.

Das gab den Astronomen ein Rätsel auf – eine wissenschaftliche Sensation war perfekt. In der Tiefe des Kosmos war ein neuer Typ strahlender Objekte gefunden worden: eine starke Radioquelle, auf engem Raum konzentriert wie ein Stern, aber dennoch kein Stern. So wurde denn auch für ihn die Bezeichnung quasistellares Objekt, kurz Quasar, eingeführt. Daß diese Quellen tatsächlich kompakt sind und keine Galaxien, zeigten ebenfalls die Untersuchungen am Objekt 3 C 273. Anhand zahlreicher Archivaufnahmen, auf denen die Quelle bereits in früheren Jahren abgelichtet worden war, die aber keine Beachtung gefunden hatten, wurde festgestellt, daß die Helligkeit dieses Objektes schwankte und sich innerhalb weniger Jahre um etwa 50% verändert hatte. Solch rascher Intensitätswechsel konnte – wegen der Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit – aber nur in einem relativ kompakten Körper erfolgen.

Seither sind viele weitere Quasare entdeckt worden, die einen im einzelnen noch nicht erklärbaren physikalischen Zustand zu sehr frühen Zeitpunkten der kosmischen Geschichte repräsentieren. Das bisher am weitesten entfernte Objekt wurde 1982 in etwa 18 Milliarden Lichtjahren Entfernung ausgemacht.

Heute zählen Radiomessungen zu den Standarduntersuchungen der großen astronomischen Observatorien in der Welt. Die entsprechenden Antennenanlagen haben inzwischen geradezu gigantische

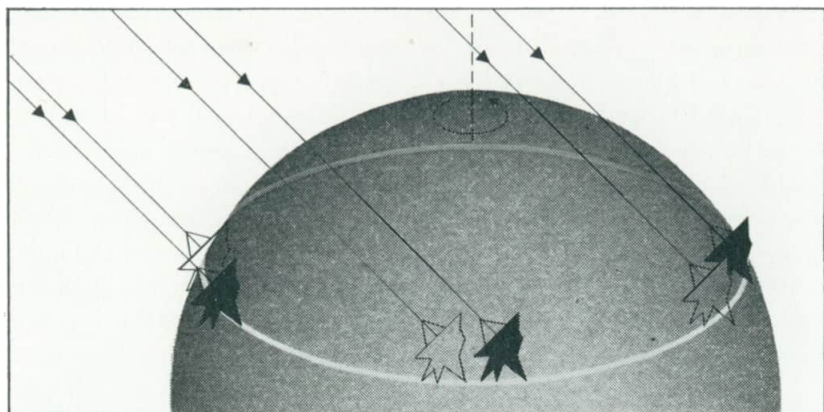
Ausmaße erreicht. Eine kugelförmige Auffangfläche mit einem Durchmesser von 305 m besitzt beispielsweise das Radioteleskop in Arecibo auf Puerto Rico (USA). Diese »Empfangsschüssel« ist allerdings nicht beweglich. Die reflektierende Fläche ist in einem Talkessel angebracht, über dem – im Brennpunkt der Kugelfläche – die Strahlungsempfänger an Seilen hängen. Mit einem derart starren Teleskop sind lediglich eingeschränkte Beobachtungen möglich. Seine Strahlungsdetektoren registrieren nur Signale, die von Quellen in der Nähe des Zenits stammen. Da sich die Erde aber täglich einmal dreht, wird dennoch ein beachtlicher Himmelssektor »abgehört«.

Die größte, frei bewegliche Radioantenne arbeitet in der Eifel bei Bad Münstereifel-Effelsberg (BRD). Es ist ein riesiges Radioteleskop mit 100 m Öffnungsdurchmesser. Ein zylinderförmiges Instrument bauten Techniker im Ootacomaud in Ostindien. Dieser Zylinder von 530 m Länge besitzt eine parabolische Krümmung mit 30 m Öffnung. Seine Auffangfläche entspricht der einer kreisförmigen Parabolantenne von 140 m Durchmesser.

Das Wollen der Astronomen und prinzipielle technische Möglichkeiten stehen einander bei der Konstruktion solcher Anlagen leider grundsätzlich im Wege. Der Durchmesser der Radioteleskope kann den Astronomen eigentlich nicht groß genug sein. Denn er bestimmt die Genauigkeit, das Auflösungsvermögen solcher Instrumente. Je größer der Durchmesser ist, desto kleiner läßt sich der Himmelsbereich abgrenzen, aus dem intergalaktische Radiostrahlung einfällt.

Mit größer werdenden Antennendurchmessern werden solche Instrumente aber nicht nur immer kostspieliger. Man kommt sehr schnell auch an eine Grenze, bei der man diese Kolosse auf Grund ihrer Eigenmasse nicht mehr bewegen kann, ohne daß sie die geometrische Form ihrer Spiegelfläche als Folge von mechanischen Spannungen im Instrument geringfügig verändern. Die Abweichung von der Idealform darf aber nur etwa ein Zehntel der beobachteten Wellenlänge betragen, um verwertbare Meßsignale zu erhalten. Bei dem Empfang einer 3-cm-Radiostrahlung darf die Abweichung in der Oberflächegeometrie beispielsweise gerade maximal 3 mm betragen. Frei bewegliche Teleskope mit 100 m Durchmesser stellen in dieser Hinsicht praktisch die Grenze des ökonomisch gerade noch Vertretbaren und des technisch Machbaren dar.

Die sowjetischen Wissenschaftler beschritten beim Bau ihres Teleskopgiganten RATAN 600 erstmalig einen gänzlich neuen Weg.



Prinzip eines Apertursynthese-Teleskops

Sie verbanden die statischen Vorzüge eines starren Teleskops mit denen einer frei beweglichen Antenne.

Radiomessungen an Quasaren werden dank dieser raschen technischen Entwicklung bereits nicht mehr ausschließlich ihrer selbst willen, etwa zur Erkundung von Naturgesetzen ausgeführt. Sie sind bereits Mittel zum Zweck geworden, Forschungshilfsmittel beispielsweise für die Geographie oder für neue Methoden der Erdbebenvorhersage.

Wissenschaftler vom California Institute of Technology entwickelten zusammen mit der USA-Weltraumbehörde NASA ein entsprechendes Projekt, um Verspannungen der Erdkruste in dem Erdbebengürtel der sogenannten San-Andreas-Verwerfung zu ermitteln. Auf dieser einige hundert Kilometer langen Verwerfungslinie liegt die Großstadt San Francisco, die schon einmal, im Jahre 1906, bei einem Beben schwer zerstört wurde.

Das Meßprinzip der kalifornischen Wissenschaftler ist relativ einfach. Sie empfangen gleichzeitig an zwei Orten die Signale eines kosmischen »Eichsenders«. Diese Messungen werden in bestimmten Abständen wiederholt. Aus der exakten Frequenzanalyse der empfangenen Radiosignale läßt sich nun mit einer Genauigkeit von etwa 10 cm angeben, ob sich die einige hundert Kilometer lange Basislinie zwischen den beiden Empfangsstandorten verändert hat oder nicht. Registrierte Veränderungen deuten unmißverständlich auf geotektonische Prozesse in der Erdkruste und damit auf bevorstehende Beben hin.

Die Ausführung dieses einfachen Prinzips ist in der Praxis freilich

mehr als schwierig. Als kosmische »Eichquelle« eignen sich wegen ihrer großen Entfernung gerade die Quasare. Als festen Meßpunkt nutzen die kalifornischen Wissenschaftler das Radioteleskop von Goldstone – einen schwenkbaren Parabolspiegel von 64 m Durchmesser, der sich bei den amerikanischen Planetensonmissionen bestens bewährt hat. Der zweite Meßpunkt ist ein fahrbarer 9-m-Spiegel, der an entsprechenden geographischen Punkten aufgestellt wird.

Auf beide Antennen fallen die Signale ein und desselben Quasars ein – wegen der endlichen Geschwindigkeit der Radiowelle und der minimal unterschiedlichen Wegstrecke aber zu unterschiedlichen Zeiten. Dieser Unterschied – und hier liegt die besondere Schwierigkeit – ist mehr als winzig, macht vielleicht eine zehnmilliardstel Sekunde aus. Mit Hilfe präziser Atomuhren und von Computern gelingt es heute dennoch, solche Zeitunterschiede zu messen und entsprechend auszuwerten.

Bereits die ersten Kontrollversuche Mitte der 70er Jahre zeigten, daß diese praktische Methode der Radioastronomie erfolgreich ist.

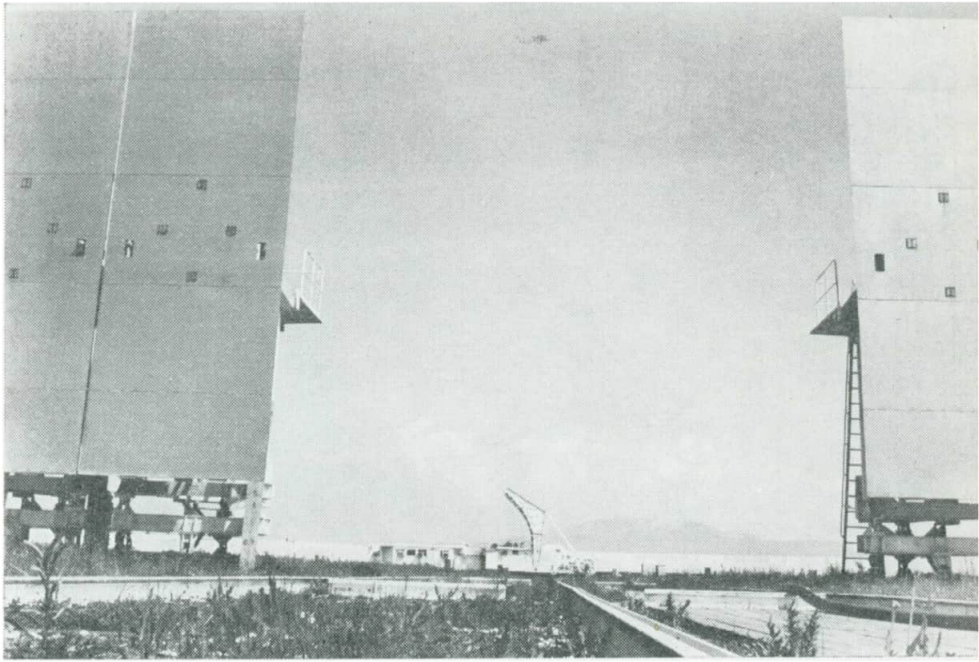
Das Superohr in den Bergen

Schon von weitem erregt die imposante Konstruktion Aufsehen: Zunächst noch an ein überdimensionales Fußballstadion erinnernd, entpuppt sich die eigenwillige Anlage im Nahen als ein technisches Meisterwerk. Es hat die einstige Kosakensiedlung Selentschukskaja, am gleichnamigen Fluß auf einem von Hügeln umschlossenen, 950 m hohen Bergplateau gelegen, in der wissenschaftlichen Fachwelt weltbekannt werden lassen. Auf fast 2 km Länge erstreckt sich ein imposanter, 7,5 m hoher Aluminiumzaun, der zu einem Kreis von 600 m Durchmesser aufgestellt ist. In einem Drittel der eingeschlossenen Kreisfläche befindet sich ein weiterer, etwa 400 m langer, gerader Reflektorzaun. Wir befinden uns auf dem Gelände des Radio-Azimutal-Teleskops der Akademie der Wissenschaften der UdSSR, in russischer Abkürzung kurz und bündig RATAN 600 genannt, das uns bei sonnigem Wetter seine Lichtgrüße in die Berge gesandt hatte.

1977 wurde die Anlage offiziell in Betrieb genommen. Einige tausend bisher unbekannte Radioquellen konnten damit bereits in den ersten Jahren entdeckt werden, darunter sehr schwache Strahler, die optisch nicht auszumachen sind. Und noch ist der endgültige Ausbau des Riesenteleskops nicht abgeschlossen, sind die maximalen Leistungsgrenzen des Instruments nicht erreicht.

Der Aufbau dieses Teleskops stellte eine Filigranarbeit ohnegleichen dar. Der kreisrunde Reflektorzaun besteht aus insgesamt 895 jeweils 2 m breiten und 7,5 m hohen Aluminiumtafeln. Jedes dieser Felder läßt sich um drei Freiheitsgrade bewegen: bei Bedarf kann es um 54° aus der Senkrechten gekippt werden, bis zu einem Winkel von $\pm 5^\circ$ läßt es sich um die Vertikalachse drehen; schließlich kann jede Reflektortafel noch um einen halben Meter vor- oder zurückgefahren werden. So wird es beispielsweise möglich, aus der Kreisform in Abschnitten eine Parabelform zu bilden.

Diese in der Welt einzigartige Spezialkonstruktion wurde von dem Leningrader Professor S. E. Chaikin erdacht. Sie ermöglicht es in gewissen Grenzen, die Vorzüge eines sehr großen, aber starren Teleskops mit denen einer beweglichen Parabolantenne zu verknüpfen. Durch die Beweglichkeit der einzelnen Elemente läßt sich das

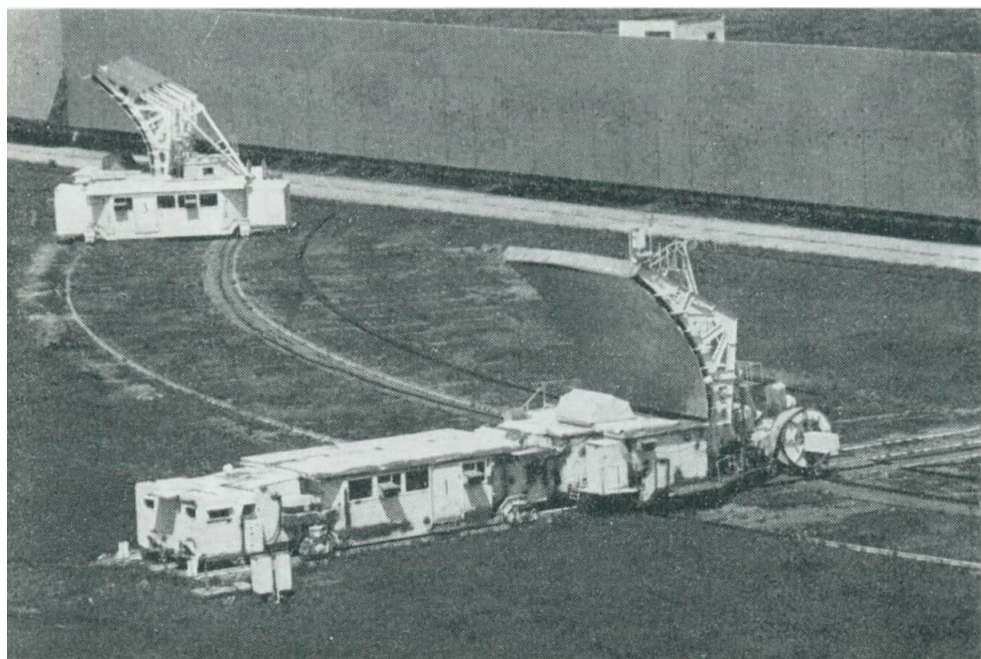


Blick durch die innere Reflektorwand auf einen Meßwagen (im Hintergrund) des Radioteleskops RATAN 600

Richtdiagramm der Gesamtantenne so verändern, als ob eine Antenne starrer Geometrie insgesamt geschwenkt werden würde.

Höchste Ansprüche stellte die Astronomie an die handwerkliche Präzision. Die Oberfläche eines jeden Spiegelsegments muß absolut eben sein. Abweichungen dürfen nur ein Zehntel der kleinsten aus dem kosmischen Wellensalat zu empfangenen Wellenlänge betragen. Waren ursprünglich nur Messungen bis zu 8 mm Wellenlänge vorgesehen, so ist künftig auch der einwandfreie Empfang von 4-mm-Signalen möglich. Um diese hohe Genauigkeit zu erzielen, mußten für die Einstellung des Gerätes insgesamt 240 000 Justierschrauben betätigt werden. Die längste gemessene Wellenlänge der kosmischen Radiostrahlung beträgt derzeit 31 cm.

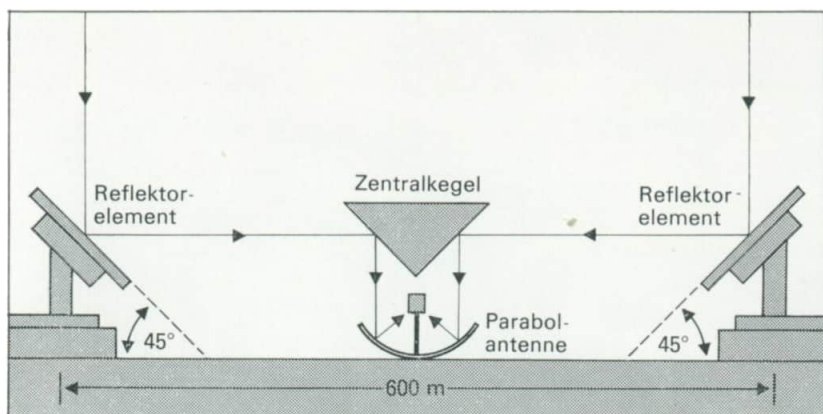
Nicht nur bei der Auswahl der Wellenlänge, auch bei anderen Kriterien ist die Antennenkonstruktion auf größte Vielfalt ausgelegt. So wurde der gewaltige Kreis in vier Antennensektoren aufgeteilt. Der Nord-, Süd- und Ostsektor verfügen jeweils über 225 Antennentafeln, der Westsektor nur über 220. Jeder Sektor kann unabhängig voneinander für astrophysikalische Messungen eingesetzt werden.



Auf Schienen fahren die Meßwagen innerhalb des Reflektorrings.

Die kosmischen Radiosignale werden von dem Reflektorkreis oder aber zunächst von dem ebenen »Zaun« im Innern des Kreises aufgenommen, der aus etwa 120 jeweils 3 m breiten und 8,5 m hohen Feldern besteht und die Strahlung zu den gegenüberliegenden Kreissektoren reflektiert. Vor den Sektoren fahren auf sternförmig verlegten Schienen die etwa 80 t schweren Meßwagen, an deren Ende ein überdimensionaler Parabolschirm installiert ist. Er empfängt die vom Kreissegment reflektierte Strahlung. Auf dem Dach dieser Wagen befinden sich in der Brennpunktlinie der Parabolantenne etwa 6 bis 7 Empfangssensoren für Radiowellen unterschiedlicher Frequenz. Über Hohlleiter gelangen diese kosmischen Signale zu den elektronischen Verstärkern, Umwandlern und Signalspeichern im Innern des Wagens. Die auf Magnetband gespeicherten Daten werden dann später im Prozeßrechner des Observatoriums ausgewertet.

Seit dem Sommer 1982 übernimmt ein Computer auch das Nachführen jedes Antennenfeldes der vier Sektoren bei Langzeitmessungen, was erforderlich ist, um die Drehung der Erde zu kompensieren. Gegenwärtig arbeiten in Selentschukskaja drei Meßwagen. Ihre



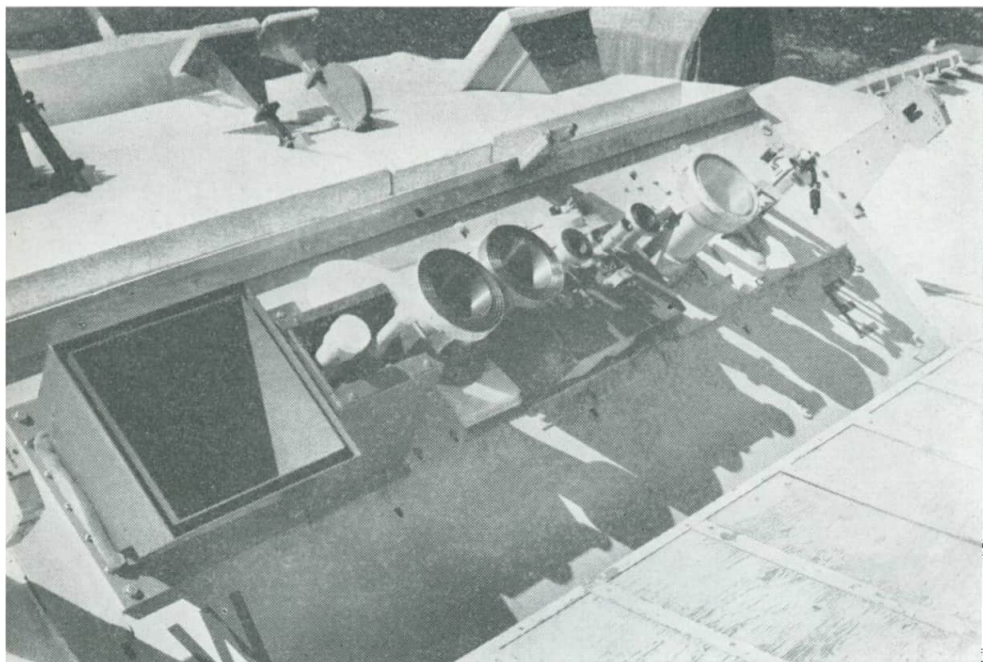
So wird das Radioteleskop RATAN 600 nach dem Endausbau arbeiten können.

elektronische Ausstattung entspricht unterschiedlichen Zwecken. So werden beispielsweise Quellen untersucht, die sich durch ein kontinuierliches Strahlungsspektrum auszeichnen. Ein anderer Wagen wurde so instrumentiert, daß er sich besonders für die Analyse von Spektrallinien, beispielsweise der Moleküle von Wasserstoff, Formaldehyd u. a., eignet. Kühlaggregate, mit flüssigem Stickstoff oder gar Helium arbeitend, sorgen dafür, daß die hochempfindlichen elektronischen Geräte auch die kleinsten Signalstärken noch auswerten können. Der dritte Wagen schließlich eignet sich besonders für Sonnenbeobachtungen sowie für die Suche nach neuen Radioquellen.

Solch ein Bauwerk wie das RATAN 600 läßt sich freilich nicht im Handumdrehen realisieren. 1969 begannen die Bauarbeiten. Für jedes der über 1 100 Antennenfelder mußte ein Betonfundament mit Zehntel-Millimeter-Genauigkeit gegossen werden. 1974 konnten mit dem fertiggestellten Nordsegment erste Messungen vorgenommen werden. Drei Jahre später war der Kreis komplett. Anschließend entstand im Innern der 400-m-Reflektorzaun.

1982 schließlich begannen die Arbeiten für einen Zentralkegel, mit dem es möglich wird, alle vier Kreissektoren gleichzeitig für Messungen einzusetzen. Dann wird das maximale Auflösungsvermögen von nur zehn Bogensekunden in horizontaler und 40 Bogensekunden in vertikaler Richtung erzielbar.

Dazu wird im Zentrum des Antennenrings ein Kegel installiert, der die von den Kreissegmenten übernommene kosmische Radio-



Strahlungsempfänger auf dem Dach eines Meßwagens von RATAN 600

strahlung auf eine unter der Kegelspitze angeordnete Parabolantenne reflektiert. In deren Brennpunkt liegt dann die Empfangsintensität aller 995 Antennenfelder an. Bei diesem Arbeitsregime muß zuvor der innere Reflektorzaun flachgelegt werden. Nach Fertigstellung dieser Ausbaustufe wird es den sowjetischen Astronomen möglich sein, bei höchster Auflösung kosmische Radiostrahler im Umfeld von $\pm 10^\circ$ im Zenit zu untersuchen.

Für die erfolgreiche Arbeit dieses Antennenmonsters waren nicht nur die wissenschaftliche Idee und die technische Ausführung von Bedeutung, sondern in besonderem Maße auch die Wahl des Standorts. Das gewählte Hochplateau im Nordkaukasus erweist sich dabei als »Volltreffer«. Von Bergen umgeben, gibt es hier keine Störungen, die durch Radiointerferenzen und andere Effekte hervorgerufen werden. Der geotektonisch stabile Felsuntergrund gewährleistet zudem auch auf lange Zeit die hochpräzise Lagestabilität der Antennensegmente. Und schließlich erweist sich die unmittelbare Nachbarschaft des größten Spiegelteleskops der Welt, des 6-m-Instruments in Nishni Archys, für parallele und vergleichende Messungen von besonderem Wert.

Neue Projekte

Die Astronomie mit ihren »klassischen« Methoden – der optischen und der Radiobeobachtung – ist gerätetechnisch an gewisse Grenzen gestoßen. Kompakte Spiegel von 6 m Durchmesser oder kompakte schwenkbare Antennen von etwa 100 m Durchmesser markieren diese – vielleicht auch nur vorläufigen – Grenzen. Daß die Leistungsfähigkeit der Beobachtungsinstrumente dennoch weiter erhöht werden kann, zeigt die erfolgreiche Arbeit des sowjetischen Riesen-Radioteleskops RATAN 600.

Einen anderen Weg der Leistungssteigerung beschritten amerikanische Astronomen. Sie begannen Mitte der 70er Jahre in der Ebene von San Augustin im amerikanischen Bundesstaat New Mexico mit dem Bau eines »Waldes« von Radio-Parabolantennen. Die Ebene liegt in einer Höhe weit über 1000 m, wodurch in der Atmosphäre der die Radiomessungen hindernde Wasserdampfgehalt schon deutlich reduziert ist. Das 78-Millionen-Dollar-Projekt wurde Anfang der 80er Jahre fertiggestellt. Es besteht aus insgesamt 27 einzelnen, voll schwenkbaren Parabolantennen von jeweils 25 m Durchmesser, 30 m Höhe und einer Masse von 212 t. Die 27 Einzelantennen können auf Schienen entlang einer Y-förmigen Bahn – zwei der Arme des Y sind 21, der nördliche nur 19 km lang – verschoben werden. Die ersten zehn Antennen wurden bereits Ende der 70er Jahre für die Forschung übergeben. Mit dem Endausbau des »Very Large Array«-Radioteleskops erreichte es ein Auflösungsvermögen, das einer einzelnen Antenne von etwa 25 km Durchmesser entspricht. Damit gelangte die Radioastronomie in Auflösungsbereiche, die bislang nur der optischen Astronomie vorbehalten waren. Denn wie das amerikanische 5-m-Spiegelteleskop auf dem Mount Palomar wird der »Teleskopwald« in New Mexico Radio-bilder liefern, die einzelne Signalquellen im Bereich von nur wenigen Bogensekunden deutlich erkennen lassen.

Das Meßprinzip dieses Teleskops ist allerdings kompliziert. Es beruht auf der sogenannten Apertursynthese, einer Erfindung, für die der englische Astronom M. Ryle im Jahre 1974 den Physik-Nobelpreis erhielt, gemeinsam übrigens mit dem Entdecker der Pulsare, dem englischen Radioastronomen Hewish. Was das sogenannte



Eine Batterie beweglicher Radioteleskope ermöglicht hochgenaue Messungen nach dem Prinzip der Apertursynthese – hier die Anlage des Observatoriums Cambridge.

Michelson-Interferometer für die klassische Optik ist, findet mit der Apertursynthese sein Analogon im Radiowellenbereich.

Der Grundgedanke ist der, daß man mit zwei voneinander weit entfernten Antennen sehr genaue Winkelmessungen vornehmen kann, indem man die von ihnen empfangenen Signale bei extremer Zeitsynchronisation auswertet. Das ermöglicht zunächst einmal sehr exakte Positionsbestimmungen. Variiert man nun den Standort der beiden Antennen, so sind schließlich auch detaillierte Strukturuntersuchungen hinsichtlich der räumlichen Intensitätsverteilung in einer Strahlungsquelle möglich. Diese Messungen sind allerdings jeweils sehr langwierig und erfordern einen hohen Aufwand an elektronischer Rechentechnik.

Die 27 Antennen des VLA lassen sich zu insgesamt 351 solcher Antennenpaare kombinieren. Wegen der Erdumdrehung ändert sich bei diesen Messungen die relative Lage zu den extragalaktischen Radioquellen. Auch das führt zu einer Vielzahl von Daten, aus denen dann Computer die Struktur der Quelle errechnen und das Ergebnis als Karte ausdrucken.

Das VLA ist nicht die erste Anlage dieser Art, aber die bisher leistungsfähigste. Kleinere »Antennenwälder« wurden zuvor schon

in Cambridge (England) und in Westerbork (Holland) errichtet. Messungen nach der Apertursynthese sind im Prinzip mit jedem beliebigen Paar von Radioteleskopen möglich, deren Arbeit mit Atomuhren synchronisiert wurde und deren Auswertungs Elektronik in den Parametern identisch ist. Das ermöglicht praktisch für das Radiointerferometer Basislängen von einigen tausend Kilometern. Dabei müssen verschiedene Länder auf diesem Gebiet zusammenarbeiten. Auf diese Weise lassen sich sogar Bilder von kosmischen Radioquellen mit einer Auflösung von weniger als einer tausendstel Bogensekunde gewinnen. Allerdings sind die bei solchen Experimenten eingesetzten Großteleskope dann über längere Zeit für die Lösung anderer Aufgaben blockiert. Und es können nur Quellen mit relativ hoher Strahlungsintensität erforscht werden.

Auch in der optischen Astronomie suchen Wissenschaftler nach neuen Wegen, um der Technik mit ihren traditionellen Leistungsgrenzen ein Schnippchen zu schlagen. Auch hier heißt der Ausweg Mehrspiegelsysteme.

Um die Auffangfläche für das schwache Sternenlicht weiter zu vergrößern, werden in Großteleskope künftig mehrere Einzelspiegel eingesetzt. Damit umgeht man die technisch schwer oder nicht zu lösenden Probleme beim Guß und bei der Bearbeitung noch größerer Spiegelrohlinge aus Glas oder Glaskeramik.

Das vorerst größte Teleskop dieser Art ist das aus sechs Primärspiegeln von je 1,8 m Durchmesser bestehende Multi Mirror Telescope auf dem Mount Hopkins im USA-Bundesstaat Arizona. In bezug auf sein Lichtsammelvermögen entspricht es einem herkömmlichen Teleskop von 4,47 m Spiegeldurchmesser.

Die technische Schwierigkeit bei derartigen Spiegelkombinationen besteht in der hohen Genauigkeit, mit der die Spiegel zueinander ausgerichtet sein müssen, um ihre Einzelbilder zu einem auch photometrisch verwertbaren Gesamtbild zu mischen. Diese Aufgabe ist mit Hilfe der Laser- und Rechentechnik aber zu lösen. Das MMT in Arizona erzielt auf Grund des Apertursynthese-Prinzips ein Auflösungsvermögen von weniger als einer Bogensekunde, womit die Leistungsfähigkeit des »klassischen« 5-m-Teleskops auf dem Mount Palomar sogar geringfügig übertroffen wird.

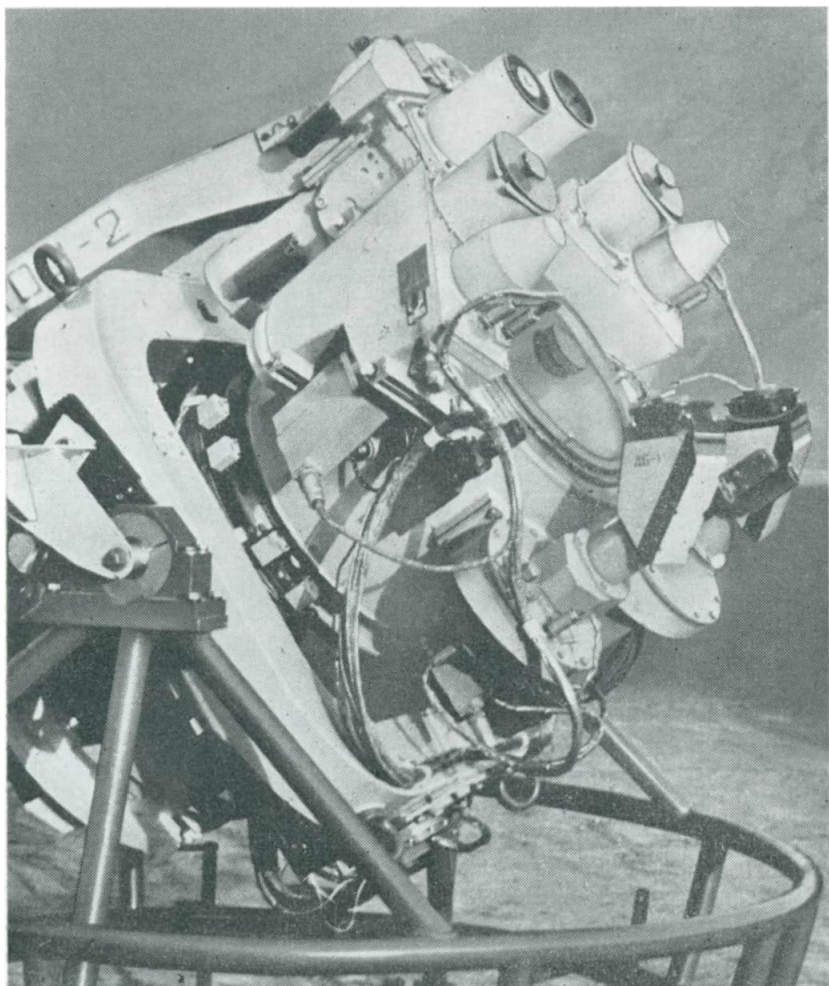
Pläne für ein 10-m-Spiegelteleskop wurden von der Universität Kalifornien (USA) ausgearbeitet. Dabei wurden zunächst beide Varianten – 10-m-Massivspiegel sowie Vielspiegelsystem – in Erwägung gezogen. Die zu erwartenden Baukosten liegen bei den beiden Varianten bei etwa 200 Millionen bzw. zwischen 20 und 50 Mil-

lionen Dollar. Die billigere Vielspiegelvariante sieht vor, insgesamt 54 sechseckige Segmente mit je 70 cm »Durchmesser« in drei Ringen um einen größeren Zentralspiegel zu montieren. Optische Sensoren und mechanische Antriebe sollen die Einzelspiegel bei mechanischen Deformationen der gewaltigen Spiegelaufhängung automatisch neu justieren. Das gesamte Instrument soll – wie das sowjetische 6-m-Teleskop im Kaukasus – eine azimentale Montierung erhalten. Als mögliche Aufstellungsorte wurden vorerst der 4300 m hohe Mauna Kea auf Hawaii, der ebenfalls 4300 m hohe White Mountain in Kalifornien sowie der nur 1800 m hohe kalifornische Junipero Serra Mountain in Erwägung gezogen.

Noch größere Erwartungen setzen Astronomen in die Stationierung von Großteleskopen in der Erdumlaufbahn. Erfolgreiche Experimente mit kleineren optischen Teleskopen hat es in der Vergangenheit bereits gegeben, beispielsweise an Bord sowjetischer Salut-Raumstationen. Erstmals installierten sowjetische Kosmostechniker im Juli 1979 während des Fluges von Salut 6 ein kosmisches Radioteleskop von 10 m Durchmesser. Das Teleskop KRT 10 war mit dem Transportraumschiff Progress 7 in den Orbit geschossen und zur Station gebracht worden. Aufgabe des kosmischen Experiments war es, einen bestimmten Teil der Milchstraße zu durchmustern und am Pulsar PSR 0329 + 54 detaillierte Untersuchungen vorzunehmen. Bei diesen Messungen wurde synchron das große 70-m-Radioteleskop des Astrophysikalischen Observatoriums auf der Krim eingesetzt.

Zwei Hauptvorteile sprechen für die kosmische Stationierung von Beobachtungsinstrumenten. Erstens entfallen die vielfältigen atmosphärischen Störungen, welche die kosmischen Signale auf ihren letzten Kilometern Weg bis zu den irdischen Signalempfängern erleiden. Auch die Schönwetterabhängigkeit irdischer Observatorien, die Astronomen fast zwei Drittel des Jahres zum »Innendienst« verurteilt, hätte damit ein Ende. Zweitens brauchen die Teleskope – wegen der Schwerelosigkeit im All – selbst bei großen Spiegeldurchmessern – keine Schwergewichte mehr zu sein. Das sowjetische Radioteleskop KRT 10 brachte beispielsweise nur eine Masse von rund 200 kg auf die Waage. Eine 10-m-Antenne auf der Erde hätte viele Tonnen gewogen. Hauptschwierigkeit kosmischer Teleskope ist andererseits die genaue Lagestabilisierung, die wesentlich die Bildschärfe und das Auflösungsvermögen mitbestimmt.

Das erste optische Großteleskop für den kosmischen Einsatz plant die amerikanische Weltraumbehörde NASA für die zweite



Ultravioletteleskop Orion 2, das an Bord des sowjetischen Raumschiffes Sojus 13 installiert war

Hälfte der 80er Jahre. Mit dem Bau des 2,4-m-Spiegelteleskops wurde Ende der 70er Jahre begonnen. 1982 fanden die gut zwei Jahre dauernden Form-, Schleif- und Polierarbeiten für den Spiegel des Teleskops ihren Abschluß. Wegen der im Weltraum nicht vorhandenen atmosphärischen Verzerrungen und Störungen erhoffen sich die Wissenschaftler von diesem Beobachtungsinstrument wichtige neue Grundlagen Erkenntnisse in der Astronomie. Damit der Teleskopspiegel die für viele astrophysikalischen Untersuchungen

besonders wichtige Lyman-Alpha-Spektrallinie des Wasserstoffs sowie Licht im roten Spektralbereich reflektieren kann, wurde der fertige Glaskörper zunächst mit einer 65 nm dicken Aluminiumschicht bedampft, über die im Aufdampfverfahren noch eine 27 nm dicke Schutzschicht aus Magnesiumfluorid gelegt wurde.

Der Einsatz der Raumtechnik für astrophysikalische Forschungen ist sicher keine Neuheit. Seit vielen Jahren gibt es die verschiedensten Satelliten, die mit hochempfindlichen Empfängern für Röntgen-, Gamma- oder andere Strahlung ausgerüstet sind. Eine neue Etappe aber stellt ohne Zweifel die Stationierung astronomischer Großgeräte im All dar.

Wenn von neuen Projekten die Rede ist, muß auch die mit Hilfe von Elektronik mögliche Verfeinerung der »klassischen« Methoden erwähnt werden, die ebenfalls zu einer erheblichen Leistungssteigerung in der Astronomie führt. Die bereits erwähnte Apertursynthese ist ein Beispiel dafür. Aber es gibt weitere.

Bei Sternbeobachtungen stören bekanntlich die Luftturbulenzen. Ein möglicher Ausweg ist der Gang ins All. Einen anderen Ausweg schafft beispielsweise die sogenannte adaptive Optik, wie erste Erfahrungen zeigen. Unter idealen Bedingungen fällt das Licht eines fernen Sterns als ebene Wellenfront auf den Teleskopspiegel. Turbulenzen in der Atmosphäre verzerren in der Realität diese Wellenfront. Die Verzerrungen lassen sich prinzipiell kompensieren, wenn man den Teleskopspiegel »paßgerecht« verformt. Dazu könnte ein Spiegel aus mehreren Einzelstücken zusammengesetzt sein, die jeweils so lange minimal bewegt werden, bis ein möglichst scharfes Bild entsteht. Oder aber es wird der Glasspiegel dadurch verformt, daß man von hinten an verschiedenen Punkten bewegliche Stempel gegen ihn preßt. Solche Manipulationen werden freilich nicht am Hauptspiegel vorgenommen, sondern an einem kleinen Fang- oder Umlenkspiegel. Ein Teil des Lichtes wird von ihm zunächst abgezweigt, um Auskunft über die momentane Spiegeleinstellung zu erhalten. Ergibt sich kein optimales Bild, errechnet ein Computer in Windeseile die Werte, um die der Spiegel bewegt bzw. verspannt werden muß. Solche Korrekturen erfolgen entsprechend den Turbulenzen, also innerhalb weniger tausendstel Sekunden. Allerdings können mit dieser Technik nur helle Sterne, vermutlich bis zur 6. oder 8. Größe, unter die Lupe genommen werden.

Weit bedeutsamer noch scheint eine 1970 von dem französischen Astronomen A. Labeyrie vorgeschlagene Methode zu sein, die sogenannte Speckle-Interferometrie. Diese Methode wurde von Physi-

kern der Universität Erlangen (BRD) weiterentwickelt. Ausgangspunkt sind zahlreiche Momentaufnahmen mit Belichtungszeiten von nur einigen hundertstel Sekunden. Auf diesen Bildern wurden die Turbulenzen gewissermaßen »eingefroren«. Sie erscheinen gesprenkelt (»speckle«), weil infolge der Luftturbulenzen die ebene Welle gebeugt und an verschiedenen Punkten fokussiert wird. Dieses Sprengelmuster verändert sich sehr rasch und »zerfließt« bei längerer Belichtungszeit zu einem homogenen Gesamtbild. Durchstrahlt man aber einzelne Sprengelbilder gleichzeitig mit Laserlicht, so erhält man sehr aufschlußreiche Beugungsbilder. Aus dem Streifenmuster können beispielsweise Aufschlüsse über die Entfernung der Einzelobjekte eines Doppelsterns gewonnen werden. Durch weitere laser-optische Verarbeitung lassen sich schließlich hochaufgelöste Positivbilder rekonstruieren. Wie die Erlangerer Physiker 1978 zeigten, erzielt man auf diese Weise optische Bildauflösungen von 0,02 Bogensekunden. Die derzeit größten optischen Teleskope erreichen dagegen auf herkömmlichem Weg nur einen Wert von etwa einer Bogensekunde. Damit zeichnen sich – ohne noch gewaltigere Instrumente einsetzen zu müssen – neue Wege bei der Erforschung der Feinstruktur von Quasaren, von Galaxienkernen und anderen Objekten ab.

Einen ähnlichen, aber einfachen Weg beschritten bereits 1974/75 amerikanische Astronomen. Auch sie gewannen zunächst zahlreiche Einzelbilder mit Belichtungszeiten von weniger als einer hundertstel Sekunde. Diese Bilder wurden in einzelne Bildpunkte zerlegt und dann einem Computer zur Auswertung eingegeben. Der Rechner synthetisierte daraus ein Gesamtbild. Dieses Verfahren wurde erstmals am Stern Beteigeuze im Sternbild Orion erprobt. Bei diesem Stern handelt es sich um einen sogenannten Roten Riesen, der unser Sonnensystem bis über die Bahn des Planeten Jupiter hinaus ausfüllen würde. Die synthetischen Bilder dieses Sterns zeigten auf seiner Oberfläche einige schwache Strukturen, vermutlich besonders heiße Zonen, in denen Eruptionen stattfinden.

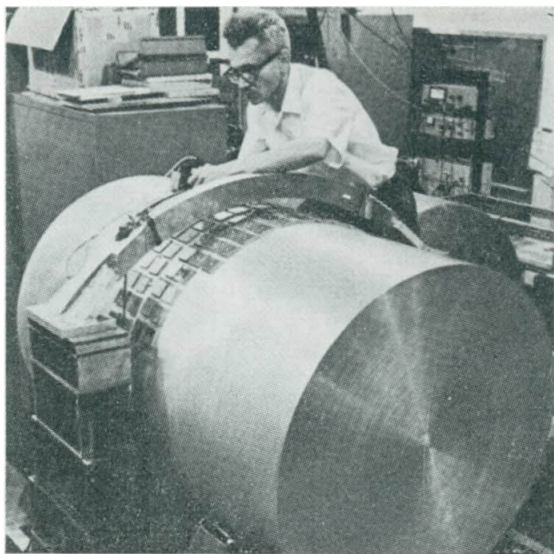
Das Geheimnis der Gravitationswellen

Albert Einstein hat sie bereits im Jahre 1916 vorhergesagt – aber entgegen vielen anderen seiner theoretischen Prophezeiungen entziehen sich die Gravitationswellen auch rund 70 Jahre später noch immer der Klarheit schaffenden Zugriff des Experimentators. Für die meisten Astrophysiker ist das letztlich nur ein Ausdruck der extrem geringen Intensität dieser Wellen, jedenfalls kein Grund zur Beunruhigung. Immerhin ist die Gravitationskraft etwa 10^{-40} mal schwächer als die elektromagnetische. Aber es gibt auch Astronomen und Theoretiker, die die Existenz derartiger Wellen nach wie vor in Frage stellen.

Dabei schien Ende der 60er Jahre die Frage fast entschieden zu sein. Damals erregte der amerikanische Physiker J. Weber Aufsehen, der einen riesigen Aluminiumzylinder erschütterungsfrei und reibungsarm aufgehängt hatte. Dieser Zylinder führte Resonanzschwingungen von 10^{-14} cm, d. h. dem zehnten Teil eines billionstel Millimeters, aus, deren Ursache nach Webers Ansicht die aus dem Kosmos einfallenden Gravitationswellen sein mußten. Die Überprüfung dieser Ergebnisse durch die internationale Fachwelt brachte jedoch rasch eine Abkühlung der Gemüter. Webers Anordnung – so das Fazit – war wesentlich zu unempfindlich, um auf Gravitationswellen anzusprechen. Aber immerhin: Seither sucht man in über 20 Laboratorien der Welt nach diesen immer noch geheimnisvollen Wellen. Elf dieser Laboratorien arbeiten mit den »klassischen« Weberschen Resonanzantennen, deren Empfindlichkeit bereits erheblich gesteigert wurde.

Doch was sind Gravitationswellen eigentlich? Bereits vor rund 7 Jahrzehnten ergab sich als Konsequenz der Einsteinschen Gravitationstheorie (Allgemeinen Relativitätstheorie), daß sich bestimmte Störungen der lokalen Raumgeometrie wellenartig über große Entfernungen ausbreiten können. Diese sogenannten Gravitationswellen wären dann in der Lage, Energie, also auch Informationen über ihre Quelle, fast störungsfrei zu übertragen. Allein aus diesem Grunde käme die experimentelle Entdeckung von Gravitationswellen einer wissenschaftlichen Sensation gleich, würde sie doch eine völlig neuartige Möglichkeit astrophysikalischer Untersuchungen des Weltalls

*Weber mit seiner
Versuchsanordnung
zum Nachweis der
Gravitationswellen*



eröffnen. Ihr Nachweis wäre außerdem Bestätigung für die Richtigkeit unserer Vorstellungen von der Wechselbeziehung zwischen Gravitation, Raum und Zeit. Damit Gravitationswellen entstehen, bedarf es in den Weiten des Universums gigantischer Massenbewegungen. Ihre Intensität ist dennoch gering. Praktisch kommen als Quellen von Gravitationsstrahlung nachweisbarer Intensität zur Zeit nur Katastrophen kosmischen Ausmaßes in Frage, bei denen beispielsweise große Sternmassen schlagartig zerstrahlt werden.

Astrophysikalische Untersuchungen, wie sie insbesondere in den letzten fünf Jahren erfolgreich durchgeführt wurden, lassen drei Gruppen von Gravitationsstrahlung vermuten: Die größte Intensität besitzen voraussichtlich Gravitationswellen, die von explosionsartigen kosmischen Ereignissen ausgehen, wie den Zusammenstößen »Schwarzer Löcher«, dem »Zerplatzen« von Sternen, der Zerstörung von Doppelsternen. Schätzungen ergaben, daß diese Ereignisse Gravitationswellenimpulse aussenden, die in Erdnähe, je nach Intensität, einmal monatlich bis einmal alle 30 Jahre (Supernova-Ausbrüche in unserer Milchstraße) zu erwarten sind.

Weniger intensiv ist wahrscheinlich jene Gravitationsstrahlung, die durch Doppelsternrotation, durch Rotation deformierter Neutronensterne oder Weißer Zwerge sowie während Nova-Ausbrüchen periodisch erzeugt wird. Sie müßte eine Frequenz von 0,0001 Hz bis 10 kHz aufweisen.

Diese reguläre Strahlung wird vermutlich von einer gravitativen kosmischen Hintergrundstrahlung überlagert, die aus Frühphasen der Entwicklung des Weltalls stammt. Eine detaillierte theoretische Vorhersage ist in diesem Falle allerdings erschwert, denn wichtige Kenngrößen kosmischer Vorgänge harren noch ihrer experimentellen Bestimmung.

Aber die stärksten Gravitationswellen, das ergeben die bisherigen Forschungen, können mechanisch Resonatoren bestenfalls mit Amplituden von 10^{-19} bis 10^{-21} cm zum Ausschlagen bringen. Immer noch empfindlichere Experimente und Apparaturen müssen von den Physikern daher erdacht, neue Antennen entwickelt und eingesetzt werden.

Charakteristisch für Antennen der zweiten Generation ist eine erhebliche Empfindlichkeitssteigerung. Dieses Ziel soll durch kombinierten Einsatz neuer Erkenntnisse der Materialwissenschaften, Elektronik, Kältetechnik und Meßtheorie erreicht werden. Der traditionelle Antennenrohstoff Aluminium wird durch reibungsärmere Materialien ersetzt wie Aluminium-Magnesium-Legierungen oder Niob. In jüngster Zeit werden auch superreine künstliche dielektrische Kristalle (Silizium oder Saphire) eingesetzt, beispielsweise von dem sowjetischen Physiker W. B. Braginski an der Moskauer Lomonossow-Universität. Als Massenresonator fungiert ein 8-kg-Saphirkristall, der im Moskauer Akademieinstitut für Kristallographie hergestellt wurde. Eine Steigerung der Empfindlichkeit um zwei Größenordnungen konnte im Jahre 1980 durch den Einsatz supraleitender Quanteninterferometer (SQUID) in der Universität Stanford (USA) erreicht werden.

Andere Forschungsgruppen entwickeln einen völlig anderen Typ von Gravitationswellenantennen. Bei ihm werden die besonderen Eigenschaften des Laserlichts ausgenutzt. Erkauft werden die sich damit ergebenden Vorzüge durch einen höheren technischen Aufwand. So verlangt das Prinzip der Laserinterferometer, die das Herzstück einer solchen Antenne darstellen, daß der Laserstrahl viele Male zwischen den mit höchster Genauigkeit justierten Spiegeln hin- und hergesandt wird, um aus Laufzeitschwankungen auf Schwingungen des mechanischen Systems schließen zu können.

Alle diese Antennen haben aber einen gemeinsamen Nachteil: Sie stehen auf der Erde. Nur bei extrem hohem Aufwand ist es möglich, sie vor den ständigen Erschütterungen der Erdkruste abzuschirmen. Deshalb hat auch auf diesem Spezialgebiet die Raumfahrt größtes Interesse gefunden.

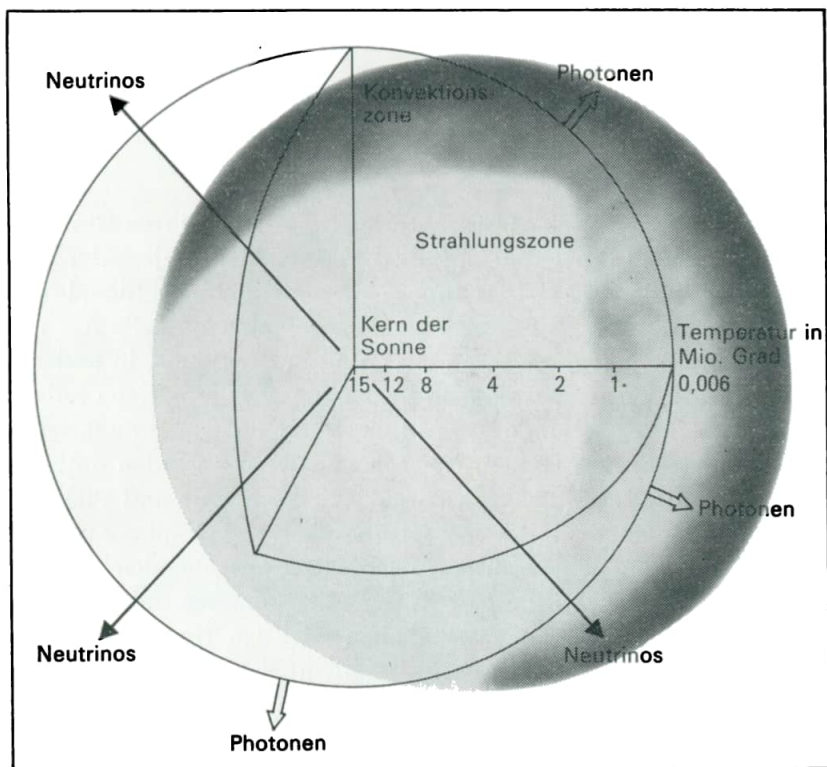
Sternbeobachtung im Innern der Erde

Während astronomische Observatorien gewöhnlich ihren Standort möglichst hoch in den Bergen haben, registrieren sowjetische Wissenschaftler seit 1977 tief im Innern eines Bergmassivs Signale aus den Weiten des Alls. Sie zählen Neutrinos – eine spezielle Art von Elementarteilchen –, die ihren Ursprung in der Sonne, in anderen Sternen des Firmaments oder in kosmologischen Prozessen haben.

Die Neutrinoastronomie ist das jüngste Kind der astronomischen Wissenschaften. Seit Galilei, Newton und Kepler werden optische Systeme genutzt, um das sichtbare Licht der Sterne und Planeten besser zu empfangen. Die Radioastronomie – der Empfang und die Analyse der von den kosmischen Objekten ausgehenden unsichtbaren Strahlung – wurde erst in der Mitte unseres Jahrhunderts möglich. Daß auch Elementarteilchen wichtige Nachrichten von physikalischen Prozessen aus kosmischen Entfernungen bringen können, bestätigten Physiker im Experiment erstmals in den 70er Jahren. Schon erste Messungen brachten überraschende Ergebnisse, die beispielsweise die bisherigen Vorstellungen über die im Innern der Sonne ablaufenden energetischen Prozesse in Frage stellten.

Unsere Sonne ist seit Milliarden von Jahren ein zuverlässiger und zugleich kostenloser Energiespender, ohne dessen Wärme das Leben auf der Erde undenkbar wäre. In jeder Sekunde strahlt von unserem Zentralgestirn eine Energiemenge von $3,9 \cdot 10^{33}$ erg ($3,9 \cdot 10^{23}$ kW) in den Weltraum. Das reicht aus, damit auf der Erde in Äquatornähe bei wolkenfreiem Himmel täglich je m^2 eine Energie von 7 kWh aufprallt. In mitteleuropäischen Breiten beträgt die mittlere solare Energiedichte immerhin noch 1,86 kWh je m^2 und Tag.

Die Quelle dieses scheinbar unversiegbaren Wärmeflusses aus der Sonne sind Kernverschmelzungsreaktionen. Doch wie sie genau ablaufen, darüber liegen der Wissenschaft auch heute noch keine zuverlässigen experimentellen Angaben vor. Denn lange Zeit gelang es nicht, Signale auch aus dem Innern des kosmischen Feuerballs zu empfangen. Zu beobachten sind nur die Erscheinungen auf der Oberfläche der Sonne. In ihrem Innern aber sind unterschiedliche Reaktionstypen mit unterschiedlicher Energiebilanz möglich. Auch

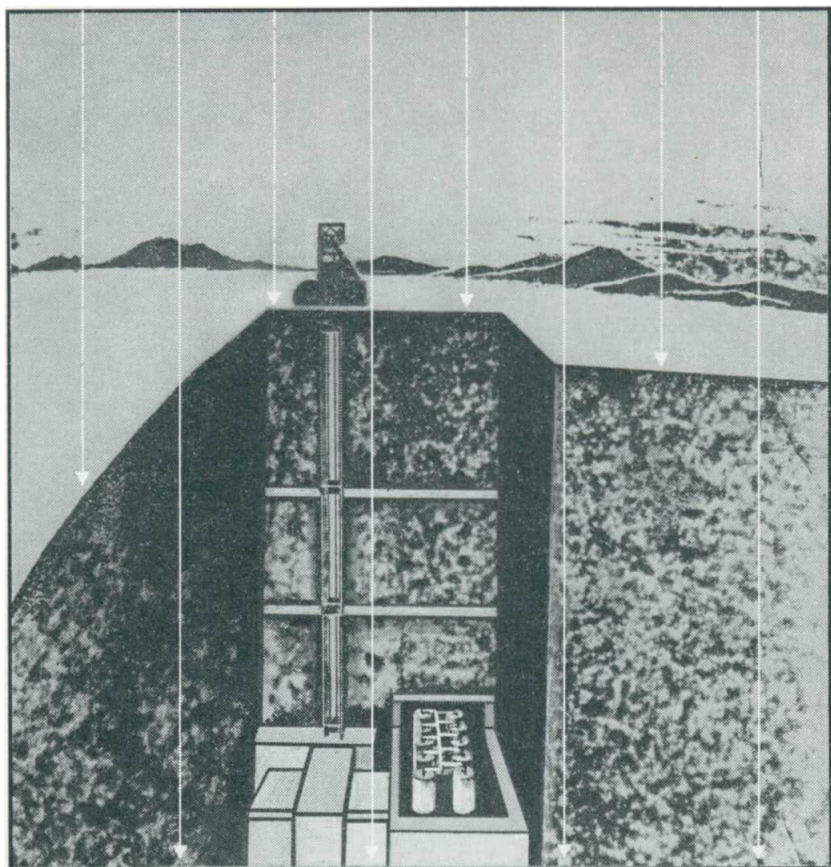


Aufbau und Temperaturverteilung der Sonne

bleibt die Frage zu klären, ob der Brennprozeß im Innern der Sonne kontinuierlich verläuft oder ob er vielleicht zyklischen Schwankungen unterworfen ist.

Von der Erde aus sind mit den traditionellen Mitteln der Astronomie nur die Oberflächeneffekte, wie z. B. Sonnenflecken, Leuchtkraft oder Strahlungsintensität, meßbar. Wenn sich der Mechanismus der Energiefreisetzung im Innern der Sonne ändern würde oder sogar bereits geändert hätte, wäre das aus einer Beobachtung der Leuchtkraft oder der Strahlungsintensität erst nach hunderttausenden von Jahren erkennbar. So lange dauert es nämlich, bis die im Zentrum des Feuerballs freigesetzte Energie nach außen »diffundiert« und als Strahlung wirksam wird.

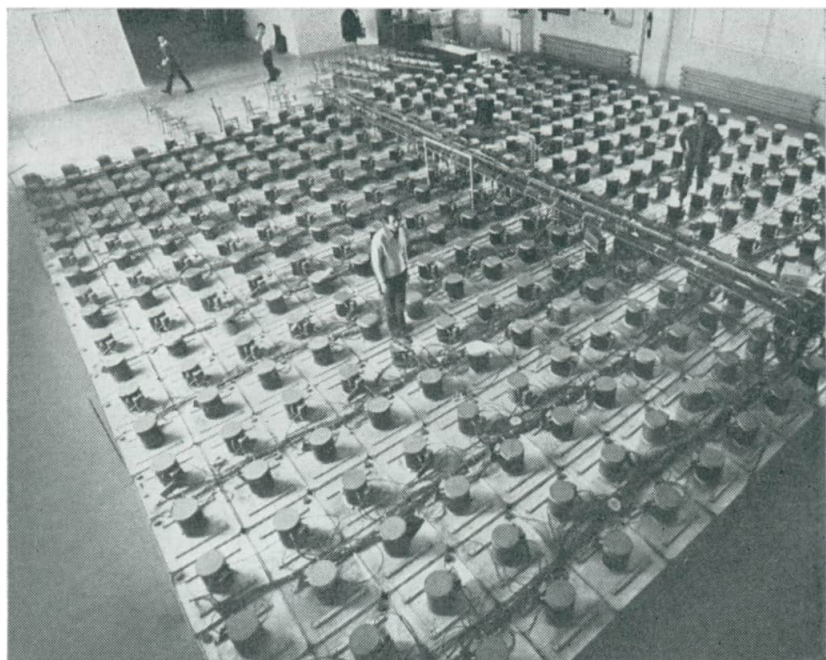
Die Neutrinoastronomie hingegen ermöglicht erstmals direkte »Einblicke« in unsere Sonne und natürlich auch in andere Sterne. Diese besonderen Elementarteilchen, die Neutrinos, entstehen bei den Kernreaktionen im Sternzentrum. Da sie keine Ruhmasse



Neutrinoastronomie wird in stillgelegten Bergwerken oder in speziell geteufte Tunneln tief unter der Erdoberfläche betrieben.

besitzen, stürzen sie unaufhaltsam mit Lichtgeschwindigkeit aus dem Stern in den Weltraum, auf die Erde zu. Mühelos durchdringen sie unsere Atmosphäre oder die Gesteinsschichten der Erdkruste. Von einer Milliarde Neutrinos, die im Sonnenzentrum entstehen, erreicht nur eines den Sonnenrand in 700 000 km Entfernung nicht. Und jeder Quadratzentimeter Erdoberfläche wird – zumindest nach bisherigen theoretischen Vorstellungen – in jeder Sekunde von mehreren Millionen dieser Teilchen durchdrungen.

Erste Messungen dieser »Sonnenteilchen«, die von amerikanischen Forschern bereits Anfang der 70er Jahre abgeschlossen wurden, zeigten erstaunlicherweise, daß die registrierte Neutrinozahl weitaus geringer ist als sie eigentlich sein müßte. Das könnte bei-

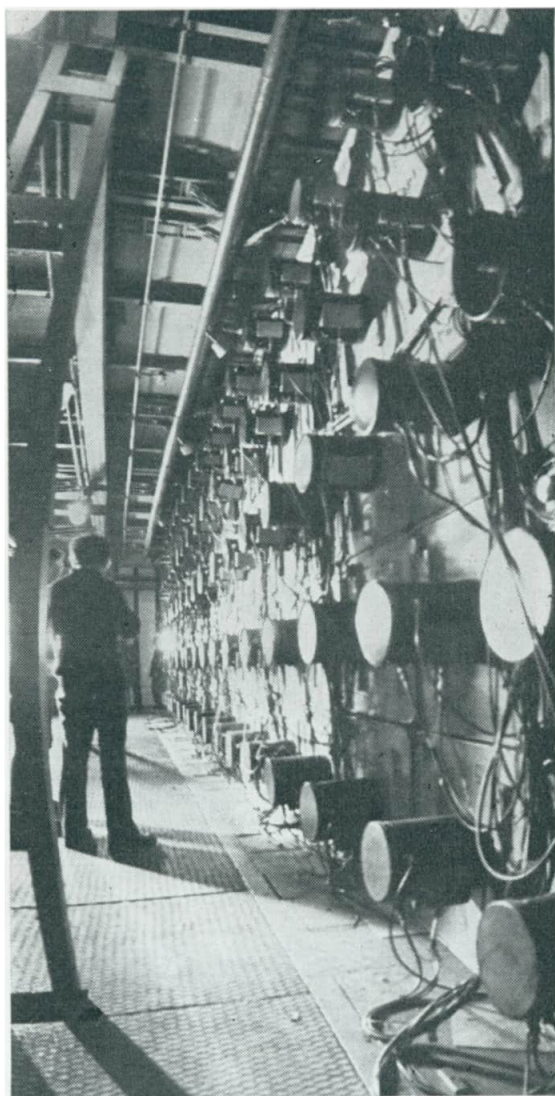


Fläche von Szintillationszählern für das Neutrinoteleskop im Kaukasus

spielsweise – wie erste Erklärungsversuche der Wissenschaftler lauteten – bedeuten, daß die Sonne innen viel kälter ist als man bislang vermutete, oder daß sie eine noch unbekannte chemische Zusammensetzung hat. Es kann natürlich auch davon zeugen, daß diesen ersten Experimenten noch methodische Fehler anhafteten, ihre Ergebnisse noch nicht genau genug die Wirklichkeit widerspiegeln.

Neutrinos zu registrieren ist ein technisch äußerst kompliziertes Unternehmen. Die sowjetischen Wissenschaftler schufen dazu im Innern des Elbrusmassivs – unweit des Hauptgipfels im Berg Andyrtschi – eine 15000 m³ große Halle, die durch einen über 500 m langen Stollen vom Baksantal aus zu erreichen ist. Diese Halle beherbergt einen riesigen Szintillationszähler, ein mehrstöckiges Bauwerk, sowie Labore, Arbeitsräume und sogar einen gemütlichen Konferenzsaal. Das Bergmassiv über der unterirdischen Halle schirmt die dort installierten physikalischen Anlagen relativ gut gegen andere Teilchen der kosmischen Strahlung ab. Nur Neutrinos gelangen wegen ihrer großen Durchschlagskraft ungehindert bis in diese Tiefe. Um Einflüsse der natürlichen Radioaktivität im

In Etagen übereinander werden im Teleskop Lichtblitze registriert, die bei Kernumwandlungsprozessen entstehen, wenn ein Neutrino zufällig wechselwirkt.



Berggestein auf die Messungen zu reduzieren, ist der Hohlraum mit speziellem strahlendämmendem Beton ausgekleidet.

Warum dieser Aufwand, die »Flucht« unter die Erde? Das Neutrino zählt wohl mit zu den eigenartigsten Elementarteilchen. Sein »Erfinder« war 1930 der Schweizer Wolfgang Pauli. Im Ergebnis rein theoretischer Berechnungen postulierte er, um die Symmetrie bestimmter Gleichungen zu sichern, die Existenz eines Teilchens,

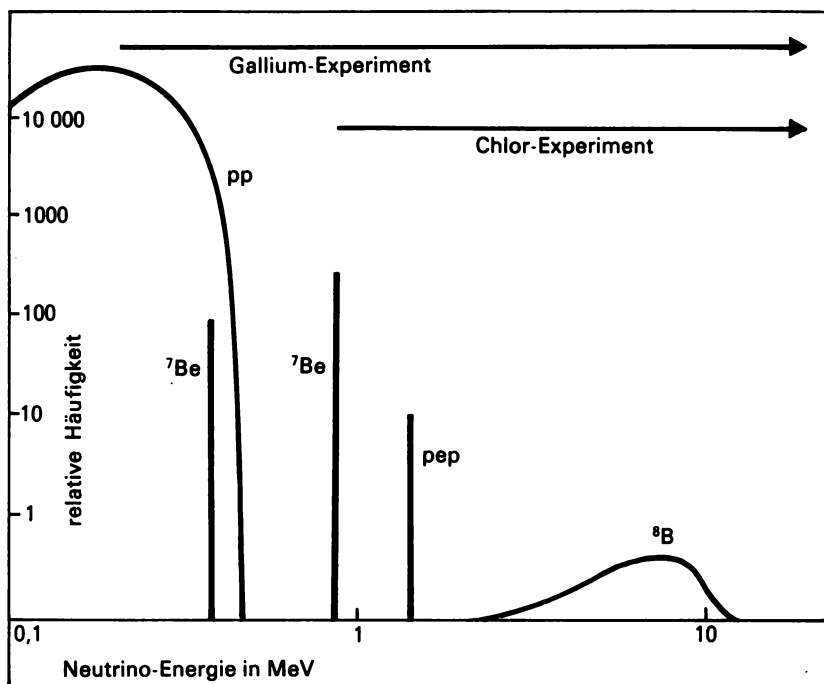
welches keine elektrische Ladung und auch keine Ruhmasse besitzen sollte. Der nicht weniger bekannte italienische Physiker Enrico Fermi gab diesem Teilchen später den Namen – Neutrino. Das Teilchen, so die Vorhersage, beteiligt sich nur an der schwachen bzw. der gravitativen Wechselwirkung. Da die elektromagnetischen und die starken Kernkräfte bei ihm ohne jede Wirkung sind, kann es mühelos die Masse von Sternen oder die unserer Erde durchdringen. Dennoch reagiert gelegentlich dieses oder jenes einzelne Teilchen mit Atomen der irdischen Materie. Diese überaus seltenen Reaktionen nachzuweisen, zu registrieren und auszuwerten – das ist die Sisypusarbeit des Neutrinoastronomen.

Die erste, 1977 in Betrieb genommene Baustufe der unterirdischen Institutsfiliale im Kaukasus besteht aus dem Szintillationszähler. Es handelt sich um einen »Block« mit den Seitenlängen von $17\text{ m} \times 11,5\text{ m}$. Auf den sechs Außenflächen dieses »Quaders« sowie auf zwei zusätzlichen, waagerechten Innenflächen sind insgesamt über 3000 Einzeldetektoren angebracht, in denen beim »Wirkungstreffer« eines Neutrinos ein Lichtblitz erzeugt und photoelektronisch registriert wird. Nur einige wenige solcher Lichtblitze kann man im Jahr zählen – genug, um physikalische Erkenntnisse zu gewinnen und zu überprüfen.

Wenn ein Neutrino nur zwei der Einzeldetektoren durchquert, reicht das bereits aus, um Angaben über Einfallsrichtung und Flugbahn zu gewinnen. So konnte beispielsweise bereits ein Teilchen registriert werden, das zuvor die gesamte Erdkugel durchheilt hatte. Es trat irgendwo in Chile in unseren Planeten ein, bevor einen winzigen Augenblick später die Rechnerdisplays im Andyrtschiberg einen Meßpik anzeigten.

Jedes Signal eines Detektormoduls wird unabhängig von anderen einem Computer zugeführt und gelangt dann zur weiteren Bearbeitung in einen zentralen Rechner. Registriert werden vor allem hochenergetische Neutrinos, wie sie beispielsweise beim Kollaps von Sternen im Kosmos, im Zentrum unserer Galaxis oder bei den Supernovae entstehen.

Das Szintillationsteleskop für Neutrinos – das bisher größte seiner Art in der Welt – stellt nur eine erste Ausbaustufe dar. Der in den Berg getaufte Stollen hat nach den rund 500 m noch kein Ende. Er reicht etwa 3500 m tiefer in den Andyrtschi. Dort entsteht ein neuer Saal mit ebenfalls 15000 m^3 Volumen. Er wird ein weiteres Neutrinoteleskop aufnehmen, dessen Wirkungsweise aber gänzlich anders sein soll. Es basiert auf der durch einen Neutrinotreffer



Kernreaktionen als Quelle für Neutrinoemission und experimentelle Nachweismöglichkeit für die dabei erzeugten Teilchen unterschiedlicher Energie (pp – Zusammenstoß zweier Protonen; pep – Zusammenstoß zweier Protonen und eines Elektrons; ${}^7\text{Be}$ – Einfang eines Elektrons durch Berylliumkern; ${}^8\text{B}$ – Beta-Zerfall von Bor)

induzierten Umwandlung von Gallium in Germanium. Mit diesem Teleskop kann die Frage nach dem Manko der Sonne hinsichtlich der von ihr ausgesandten Neutrinos vielleicht endgültig geklärt werden. Denn Teleskope dieser Art sprechen vor allem auf Neutrinos niedriger Energie an, auf solche, die gerade nach den bisherigen theoretischen Vorstellungen im Innern der Sonne freigesetzt werden sollten.

Als »Auffangmasse« sollen insgesamt 50 t des quecksilberartigen Metalls Gallium dienen. Die sowjetischen Wissenschaftler hoffen, damit in einem Monat 30 Neutrinos einzufangen, d. h., in den 50 t Gallium werden 30 Germaniumisotope entstehen, die in kurzer Zeit wieder radioaktiv zerfallen. Diese Zerfallsreaktion – darin besteht der Witz des Experiments – wird meßtechnisch festgehalten und rechnerisch ausgewertet.



Die Daten der einzelnen Module des kaukasischen Neutrinoobservatoriums werden von einem Computer gesammelt und ausgewertet.

Ein ähnliches Experiment bereiten übrigens die Max-Planck-Gesellschaft in München (BRD) und das Brookhaven National Laboratory im USA-Staat New York für die 80er Jahre vor. Auch sie wollen in der Endphase eine Detektormasse von 50 t Gallium einsetzen. Als Vorstufe entwickelten beide Partner ein Pilotprojekt mit 1,5 t Detektormasse. Welche Kosten ein solches Experiment verschlingt, verdeutlicht der Weltmarktpreis des seltenen Galliums: Er lag Ende der 70er Jahre bei etwa 2,5 Dollar je Gramm.

In das Gallium-Germanium-Experiment setzen auch die amerikanischen Wissenschaftler besondere Erwartungen, soll es doch endgültig Licht in die Ergebnisse der schon erwähnten Sonnenbeobachtungen aus den 60er und 70er Jahren bringen. Dabei wurde damals als Nachweis die neutrinoinduzierte Umwandlung von Chlor in Argon ausgenutzt. Amerikanische Wissenschaftler experimentierten im USA-Staat Süddakota in einem 1480 m tiefen Stollen einer verlassenen Goldmine mit 390 000 l der gewöhnlich industriell genutzten Reinigungsflüssigkeit Perchloräthylen. In dem etwa 15 m langen unterirdischen Flüssigkeitstank führten die nur mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit eintretenden Neutrinoreaktionen dazu, daß während eines Meßzyklus etwa 100 Chloratome der chemischen Lösung in das Isotop Argon 37 umgewandelt wurden. Diese 100 Atome in 390 000 l Flüssigkeit nachzuweisen, kennzeichnete auch hier die Kompliziertheit des Experiments, das nur mit Hilfe aufwendiger Extraktions- und Analyseverfahren möglich ist.

Die Meßtechnik umfaßte mehrere Verfahrensschritte: Zunächst ließen die Forscher durch den Flüssigkeitstank gasförmiges Helium perlen. Dieser Gasstrom führte das entstandene Argon mit. In einem Aktivkohlefilter wurden dann Helium und Argon wieder voneinander getrennt. Da das Argonisotop 37 radioaktiv ist, also Strahlung aussendet, ließ es sich in einem empfindlichen Zählsystem exakt nachweisen. Trotz aller Bemühungen und genauer Prüfung ihres Versuchsaufbaus kamen die amerikanischen Forscher aber zunächst zu einer Zählrate, die nur ein Sechstel bis ein Neuntel jener Teilchenmenge beträgt, die nach allen bisherigen Vorstellungen über die Physik der Sonne zu erwarten wäre. Dieser Wert wurde später zwar verbessert, aber dennoch verblieb eine unerklärte große Differenz. Im Durchschnitt wurde nur ein Drittel des Neutrinowertes erreicht, der von der Theorie her zu erwarten wäre.

Wissenschaftler legten im Laufe der Jahre verschiedene Hypothesen vor, um die zu geringe Neutrinorate physikalisch zu erklären. Alle diese Versuche, die »fehlenden« Neutrinos zu finden, stießen aber immer auf Widersprüche zu anderen, gesicherten Erkenntnissen. So hat z. B. der Astrophysiker Fred Hoyle ein Modell entworfen, nach dem nur 30 bis 50% der Sonnenmasse im Kern konzentriert sein sollen, gegenüber 66% bei den bisherigen Modellen. Außerdem ist der Anteil schwerer Elemente und von Wasserstoff im Kern seines Modells weitaus höher, als bislang vermutet wurde. Die verminderte Kerndichte und die höhere Wasserstoffkonzentration, so rechnete Hoyle aufgrund dieser Annahme vor, beschränken zu-

gleich die Produktion von Neutrinos. Eine andere ernst zu nehmende Hypothese geht davon aus, daß die Fusionsprozesse im Innern der Sonne nicht gleichmäßig ablaufen, sondern in ihrer Intensität pulsieren und gegenwärtig eine »schwache Phase« durchlaufen. Optisch würde sich diese gedrosselte Fusion aufgrund der geschilderten Zusammenhänge ja erst nach rund 100 000 Jahren bemerkbar machen.

Einen völlig anderen, »irdischen« Erklärungsversuch unternahm ein Wissenschaftler der Universität von Virginia. Die zu niedrige Zählrate soll danach ihre Ursache in der Chlorverbindung selbst, in einem anderen, komplizierteren chemischen Reaktionsablauf nach einem »Neutrino-treffer« haben. Die Neutrinos trafen zwar in der richtigen Anzahl ein und führten auch zu der gewünschten Menge von Anregungsreaktionen; anschließende Polymerisationsprozesse, wofür die Argonionen verantwortlich seien, entzogen diese nunmehr gebundenen Teilchen jedoch dem komplizierten Elementennachweis.

Alle diese Hypothesen ließen letztlich die entscheidende Überzeugungskraft vermissen. Die »fehlenden« Sonnenneutrinos gaben und geben ein Rätsel auf. Grund genug also, daß sich Ende der 70er Jahre die Kernphysiker wieder intensiver diesen exotischen Teilchen zuwandten. Anstöße dazu gab es natürlich auch aus der Kernphysik, nicht zuletzt aus ganz grundlegenden theoretischen Überlegungen, über die im einzelnen später noch ausführlicher zu sprechen sein wird.

Eine Sensation für die Wissenschaft war dann 1980 der Bericht von Forschern des Instituts für theoretische und experimentelle Physik der Akademie der Wissenschaften der UdSSR, daß mit einem hohen Grad an Zuverlässigkeit und entgegen allen früheren Überzeugungen der Nachweis gelungen war, daß die Ruhmasse eines Neutrinos nicht Null ist, sondern einen meßbaren Wert besitzt, der zwischen einem Zehntausendstel und einem Dreißigtausendstel der Masse des Elektrons liegt. Dieser Nachweis gelang an einer der bisher bekannten drei Neutrinoarten.

Zu den zahllosen Konsequenzen, die die zweifelsfreie Bestätigung dieser Entdeckung durch weitere Experimente in anderen Forschungszentren haben würde, gehört auch die Möglichkeit, daß sich die verschiedenen Neutrinoarten ineinander umwandeln können. Die Neutrinooszillation, wie die Fachleute diesen Vorgang nennen, würde schließlich eine sehr einfache Erklärung für das Neutrino-rätsel geben: Die bisherige Teilchenzählung mit dem Chlor-Argon-Detektor in dem ehemaligen Goldbergwerk der Homestake Mine

Company im USA-Bundesstaat Süddakota konnte ja nur eine der drei Neutrinoarten, die Elektronenneutrinos erfassen. Wenn nun aber Umwandlungen möglich sind, so kann der Ausgang des Zähl-experiments möglicherweise bedeuten, daß auf dem Weg zur Erde gerichtete Oszillationen zwischen den einzelnen Neutrinoarten stattgefunden haben.

Die Wissenschaftler sehen daher der Inbetriebnahme der Gallium-Germanium-Experimente mit großer Spannung entgegen. Sind dann doch Möglichkeiten vorhanden, Aussagen über die Anzahl der Teilchentreffer in zwei Energiebereichen zu erhalten, wodurch die Frage nach möglichen Umwandlungen beantwortet, das Rätsel der Sonnenneutrinos enthüllt werden sollte. Für die sowjetischen Wissenschaftler im Kaukasus erweist es sich dabei als ein wesentlicher Vorteil, daß sie über zwei voneinander unabhängige Großdetektoren verfügen werden, deren Meßprinzipien sich prinzipiell unterscheiden und die verschiedene Energiebereiche abdecken. Auch die unmittelbare Nähe der klassischen Großgeräte – des optischen 6-m-Teleskops sowie des Radioteleskops RATAN 600 – schafft einzigartige Möglichkeiten für komplexe bzw. vergleichende Untersuchungen.

Der Boom der Neutrinforschung, der durch die Entdeckung von 1980 gekennzeichnet ist, hat aber noch viel weiterreichende Konsequenzen für die Astronomie. Haben nämlich diese Teilchen, die überall im kosmischen Raum vorhanden sind, tatsächlich eine Ruhmasse, so muß natürlich die im Weltall verteilte Gesamtmasse und damit die mittlere Massendichte wesentlich höher sein, als bislang angenommen. Wir erinnern uns: Die mittlere Massendichte im Universum ist jenes Kriterium, das darüber entscheidet, ob nach dem Einstein-Friedmann-Modell die geometrische Struktur des kosmischen Raumes offen oder geschlossen, d. h. in topologischem Sinne unendlich oder endlich ist. Sie entscheidet darüber, ob die kosmische Expansion ewig andauert oder irgendwann wieder in eine allgemeine Kontraktion umschlägt.

Nach dem heißen Gamowmodell für die Frühphase existierte die Materie damals, vor vielleicht 18 bis 20 Milliarden Jahren, als ein Gemisch aus Elektronen, Positronen, Neutrinos, Antineutrinos sowie einem kleinen Anteil von Protonen und Neutronen. Die in Form von Photonen und Neutrinos vorhandene Strahlung verschwand im Laufe der Jahr-milliarden nicht, sondern blieb – unter energetischer Veränderung – bis in unsere Zeit erhalten. Ein Zeugnis hierfür ist ja die bereits ausführlich behandelte 3-K-Hintergrundstrahlung. Analog müssen aber auch Restneutrinos vorhanden sein.

Auf jeden Kubikzentimeter des Weltalls, so zeigen Messungen bzw. rechnerische Abschätzungen, entfallen 500 (masselose) Photonen und etwa 450 Neutrinos. Selbst bei dem geringen Wert für die von den sowjetischen Wissenschaftlern ermittelte Neutrinomasse wäre die Gesamtmasse der kosmologischen Restneutrinos größer als die in Sternen oder Galaxien angehäuften Masse. Demnach sollte – nach der Einstein-Friedmann-Theorie – unser Weltall möglicherweise geschlossen sein. Solche Schlüsse sind aber so lange nicht zwingend, bis nicht nur eine, sondern alle drei Neutrinoarten zweifelsfrei in ihrer Ruhmasse bestimmt sind.

Das Forscherinteresse an Neutrinos ist jedenfalls hellwach. Nach den Arbeiten in den USA und der UdSSR begann man auch in einigen westeuropäischen Ländern, große unterirdische Neutrinoteleskope zu errichten. Dazu werden beispielsweise vorhandene Straßentunnel in den Alpen genutzt, von denen aus Seitenstollen zu riesigen, in den Berg gehauenen Experimentierhallen führen.

Diese Untersuchungen sowie Experimente an den großen Beschleunigeranlagen der Hochenergiephysiker werden Antwort auf die Fragen bringen, ob es vielleicht nicht noch weitere, bisher unbekannte Neutrinoarten gibt, ob Neutrinos tatsächlich über eine Ruhmasse verfügen und ob sie wirklich ineinander umwandelbar sind.

Noch einmal über Neutrinos

Die Neutrinoastronomie ist ein besonders plastisches Beispiel dafür, wie in der modernen Wissenschaft unserer Tage die Grenzen der klassischen Fachdisziplinen mehr und mehr verschwinden. Die Sternforschung mit Hilfe dieser noch immer rätselhaften Teilchen nutzt die Kenntnisse, Methoden und experimentellen Apparaturen der Kernphysik. Das sowjetische Neutrinoobservatorium Baksan in den Bergen des Kaukasus ist kein Teil einer astronomischen Forschungsstätte, sondern gehört zum Institut für Kernforschung der Akademie der Wissenschaften der UdSSR.

Ein ähnliches Beispiel läßt sich aus den USA anführen, wo 1982 beschlossen wurde, daß künftig an dem großen Protonenbeschleuniger des Nationalen Fermilaboratoriums in Batavia (USA-Staat Illinois) eine Gruppe theoretischer Astrophysiker arbeiten soll. Die Raumfahrtbehörde NASA bewilligte für ein Forschungsprogramm von drei Jahren eine Summe von 500000 Dollar. Geplant sind zunächst Experimente mit hochenergetischen Elementarteilchen, die Aufschlüsse darüber bringen sollen, welche physikalischen Zustände entsprechend dem »heißen« Weltmodell in der Zeit unmittelbar nach dem Urknall geherrscht haben könnten.

Wenden wir uns dem Jahr 1930 zu: Die Physiker standen in jener Zeit wieder einmal vor einem Rätsel. Experimente schienen anzuzeigen, daß der Energieerhaltungssatz – eine eherne Festung der modernen Naturwissenschaft und materialistischen Philosophie – von der Natur umgestoßen wird. Solche Indizien lieferten Experimente des radioaktiven Zerfalls, bei dem Elektronen als sogenannte Betastrahlung freigesetzt werden. Beim Zerfall bestimmter Atomkerne registrierten die Physiker die Abstrahlung von Elektronen mit einem kontinuierlichen Energiespektrum. Das aber stand eindeutig im Widerspruch zum Energie- und Impulserhaltungssatz, der ausschließlich ein diskretes, d. h. portionsweises Energiespektrum verlangt. Namhafte Physiker meldeten Zweifel an der allgemeinen Gültigkeit dieser Erhaltungssätze an. So schlug Niels Bohr vor, davon auszugehen, daß Energie- und Impulserhaltungssatz nur im Durchschnitt für eine sehr große Zahl von Zerfallsakten ihre Richtigkeit haben, nicht aber für jedes Einzelereignis.

Für den jungen Schweizer Physiker Wolfgang Pauli war das keine zufriedenstellende Erklärung. »Liebe radioaktive Damen und Herren!« – so begann Pauli einen historisch gewordenen Brief an eine 1930 in Tübingen stattfindende Physikertagung. »Angesichts des kontinuierlichen Beta-Spektrums bin ich auf einen verzweifelten Ausweg verfallen, um den Energiesatz zu retten.« Pauli verwies zunächst auf die Tatsachen des Experiments: Beim Beta-Zerfall eines Atomkerns wird ein Elektron ausgestoßen. Der Kern muß dadurch einen Rückstoß erhalten. Kern und Elektron müßten folglich – nach dem Impulserhaltungssatz – in entgegengesetzte Richtungen auseinanderfliegen, und zwar mit diskreten Energiewerten. Etwas völlig anderes aber war der Fall, wie Nebelkammeraufnahmen von solchen Zerfallsereignissen zeigten: Kern und Elektron eilen nach dem Zerfall in einem schiefen Winkel auseinander. Paulis Erklärung in dem Brief: »Es könnte mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert werden.«

Dieses »Neutron« aus Paulis Gedankenwelt – nicht identisch mit dem gleichnamigen, aber erst zwei Jahre später von Chadwick entdeckten, elektrisch neutralen Baustein der Atomkerne – war für das physikalische Verständnis jener Zeit aber geradezu abenteuerlich. Es durfte keine elektrische Ladung besitzen, seine Ruhmasse mußte Null oder wenigstens verschwindend gering sein, und sein Spin – eine für Elementarteilchen charakteristische, eine drehimpulsähnliche physikalische Eigenschaft kennzeichnende Größe – sollte $\frac{1}{2}$ betragen. Was die Physiker aber besonders irritierte, war die Tatsache, daß ein solches Teilchen aufgrund seiner bizarren Eigenschaften mit anderer Materie kaum in Kontakt treten kann und folglich im Experiment nicht nachweisbar ist.

So dauerte es drei Jahre, bis sich die »verzweifelte« Idee der Existenz eines solchen Teilchens durchgesetzt hatte, bis vor allem Pauli selbst an dessen wirkliche Existenz zu glauben begann und bis Enrico Fermi 1933 dem Teilchen seinen heutigen Namen gab – Neutrino. Unklar blieb dennoch, ob man es je im Experiment nachweisen könne. Wolfgang Pauli verwettete eine Kiste Champagner, daß dieses nicht möglich sei. Immerhin dauerte es ein Vierteljahrhundert, bis er diese Wette einlösen mußte. Nachdem bereits 1946 in der Sowjetunion der aus Italien emigrierte Physiker Bruno Pontecorvo theoretisch eine kernchemische Nachweismethode vorgeschlagen hatte, wiesen die amerikanischen Physiker F. Reines und C. L. Cowan 1956 an einem Kernreaktor zweifelsfrei die reale Existenz dieses Sonderlings in der Teilchenwelt nach.

Heute steht für die Physik zweifelsfrei fest, daß ein Neutron unter Aussendung eines Elektrons und eines Anti-Neutrinos in ein Proton zerfällt und daß andererseits – in Umkehrung dieses Zerfalls – aus einem Proton bei Einfang eines Neutrinos ein Neutron entsteht. Dabei wird ein Positron abgestrahlt, das Antiteilchen des Elektrons. Während dieses Neutrino stets beim Beta-Zerfall auftritt, also immer an die Existenz von Elektronen gekoppelt ist, entdeckten Wissenschaftler 1962/63 bei Zerfallsprozessen von sogenannten Myonen eine weitere Neutrinoart.

Das Myon war 1937 ebenfalls in der kosmischen Strahlung entdeckt worden. Es besitzt – außer einer um vieles größeren Ruhmasse – die Eigenschaften des Elektrons. Daß dieses Myon-Neutrino nicht mit dem Elektronen-Neutrino identisch ist, konnte erstmals 1962 mit einem Experiment an einem Teilchenbeschleuniger nachgewiesen werden. Ende der 70er Jahre schließlich gelang es zu zeigen, daß eine 1975 entdeckte weitere neue Teilchenart, die sogenannten Tau-Leptonen – nach dem entsprechenden Buchstaben des griechischen Alphabets benannt –, bei ihren Zerfallsprozessen von einer dritten, ebenfalls eigenständigen Neutrinoart begleitet werden soll.

Und obgleich diese Teilchen kaum mit anderer Materie wechselwirken und deshalb auch so schwer nachzuweisen sind, wurden sie vor allem seit den 70er Jahren ein unersetzlicher Helfer, um in die Geheimnisse der Struktur der Materie einzudringen und den inneren Aufbau anderer Elementarteilchen zu erkunden. Die Voraussetzung hierfür ist die Tatsache, daß sich vor allem die Myon-Neutrinos an den großen Protonenbeschleunigern in der UdSSR, den USA und Westeuropa in großer Zahl und zu jeder beliebigen Zeit herstellen lassen. Diesen Nachweis hatten bereits 1959 in der Sowjetunion Bruno Pontecorvo und in den USA Melvin Schwartz geführt. Am Super-Protonensynchrotron des westeuropäischen Kernforschungszentrums CERN beispielsweise liefert das Auftreffen eines Protonenimpulses mit einer Energie von 400 GeV (Giga-Elektronenvolt) auf das sogenannte Target etwa eine Billion Neutrinos, das sind rund 100 Millionen Teilchen je cm^2 .

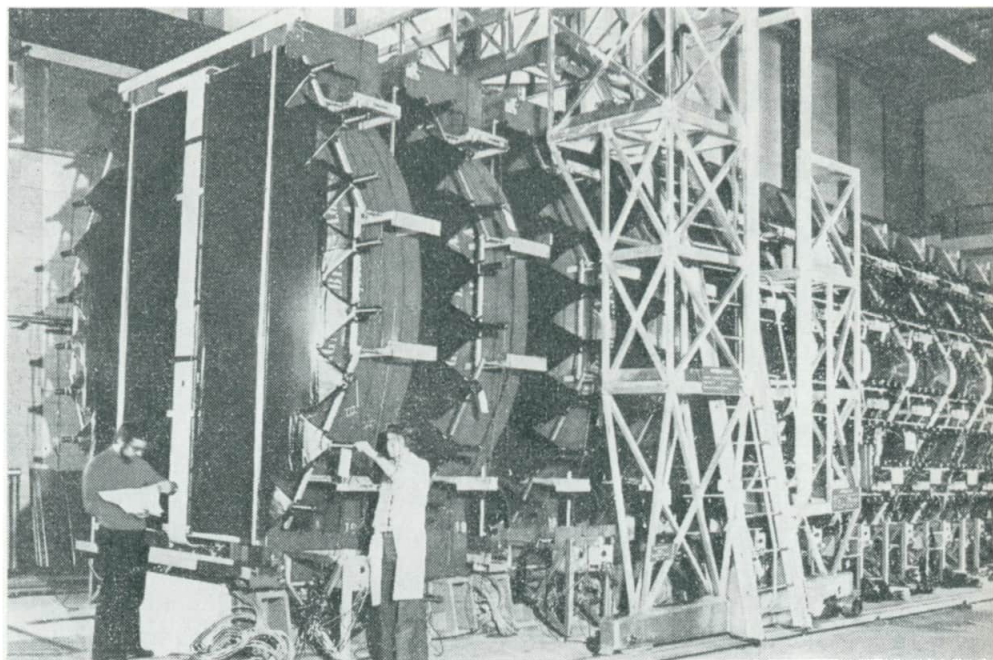
Um diese Neutrinos nachzuweisen, schuf man entsprechende Nachweisapparaturen von riesigen Ausmaßen. Die grundlegenden Meßprinzipien wurden am Beispiel der Neutrinooteleskope für die Astronomie bereits erläutert. Als besonders vorteilhaft erwiesen sich bisher elektronische Detektoren nach dem Prinzip des Szintillationsteleskops, aber auch spezielle Blaskammern. Eine ent-

sprechende Anordnung beim CERN hat beispielsweise ein Füllungsvolumen von 32 m^3 und ist mit einem System von sogenannten Proportionalkammern zum Myonnnachweis kombiniert. Im Innern dieser »Big European Bubble Chamber« befindet sich flüssiger Wasserstoff oder Neon, so daß die Treffermasse für den aus dem Beschleuniger eintreffenden Protonenstrahl etwa 1 bzw. 10 t beträgt. Die Kammer ist rund 8 m hoch und mißt 12 m im Durchmesser.

Als besonders interessant erwies sich nun, daß diese Neutrinos in den Targetkammern nicht nur die Atomkerne der dort angeordneten Substanzen – z. B. Wasserstoff bzw. Neon in der Blaskammer oder Eisen in einem Szintillationszähler – durchdringen. Auch die Nukleonen – d. h. Protonen und Neutronen – werden auf diese Weise durchstrahlt. Sollten also die Kernbausteine wiederum selbst aus anderen – bislang noch nicht direkt nachgewiesenen – Struktureinheiten bestehen, so müßte es zu gelegentlichen Reaktionen der Neutrinos mit diesen Bausteinen kommen. Neutrinos sind somit nicht nur kosmische Boten aus dem Innern ferner Sterne, sondern zugleich »Arbeitsstrahl« eines Supermikroskops für die Durchleuchtung winziger, unsichtbarer Teilchen des Mikrokosmos. Und tatsächlich haben solche Neutrinoexperimente Ende der 70er Jahre, Anfang der 80er Jahre erste deutliche Ergebnisse gebracht, die an einer räumlichen Strukturierung innerhalb der Bausteine eines jeden Atoms keine Zweifel mehr lassen. Diese experimentellen Ergebnisse haben mit dazu beigetragen, daß Ende der 70er Jahre die theoretischen Vorstellungen über die Struktur der Materie wesentlich erweitert wurden, insbesondere was die Existenz der sogenannten Quarks – über die noch ausführlich gesprochen wird – anbelangt.

Für eine weitere Sensation sorgten schließlich die schon erwähnten Experimente der Moskauer Physiker zum Nachweis einer vorhandenen Ruhmasse des Elektronenneutrinos. Ihre Ergebnisse gewannen sie beim akribischen Studium des radioaktiven Zerfalls des Wasserstoffisotops Tritium. Insbesondere ermittelten sie mit hoher Genauigkeit die Energieverteilung der bei diesen Zerfallsprozessen ausgesendeten Elektronen. Ihr Ergebnis: Das Elektronenneutrino besitzt eine Ruhmasse – in Energieeinheiten ausgedrückt – zwischen 14 und 40 eV (Elektronenvolt). Die Ruhmasse des Elektrons beträgt vergleichsweise 511 000 eV.

Mit der Frage einer möglichen Ruhmasse für Neutrinos ist die im vorangegangenen Kapitel erwähnte Möglichkeit der Neutrinooszillation verbunden, d. h. der wechselseitigen Verwandlung von



Neutrino teleskop für Experimente an Teilchenbeschleunigern des CERN

einer zur anderen der drei bisher bekannten Spezies dieses Teilchens. Aufgrund seiner Berechnungen hatte Bruno Pontecorvo bereits 1967 die Möglichkeit dieser Neutrino-Verwandlung ins Auge gefaßt.

Über erste experimentelle Daten eines direkten Nachweises solcher Oszillationen berichtete 1980 F. Reines, dem 1956 ja bereits der erste Nachweis eines solchen Teilchens überhaupt gelungen war. Inzwischen wurden an anderen Forschungszentren weitere Experimente vorbereitet, um endgültige Klarheit zu schaffen. Dazu zählt ein Spezialdetektor, der gemeinsam von amerikanischen, schweizerischen und westdeutschen Physikern unter Leitung von R. L. Mößbauer entwickelt und am Forschungsreaktor des Instituts Laue-Langevin Grenoble getestet wurde. Er soll am Reaktor des Kernkraftwerkes Gösgen in der Schweiz, wo ein hoher Neutrino-Fluß vorhanden ist, auf Schienen montiert werden.

Die 80er Jahre, so urteilen viele Experten, werden in der Neutrino-Forschung wichtige neue Erkenntnisse bringen. Ein Grund für diesen Optimismus sind neuartige Riesenbeschleuniger und Superdetektoren, die in verschiedenen Forschungszentren der Welt bereits fertiggestellt wurden oder sich in Bau befinden. Die Schwie-

rigkeiten von Neutrinoexperimenten freilich bleiben. Das macht allein schon die speziell für die Neutrinoastronomie eingeführte Einheit SNU (Solar Neutrino Unit) deutlich. Ein SNU entspricht einem Einfang in der Sekunde, wenn man 10^{36} Kerne als Zielscheibe benützt. Solch eine Anzahl von Kernen eines mittelschweren Elements führt aber zu der beachtlichen Masse von 100 Mill. t. Nähme man eine Zielscheibe aus 1 cm dickem Eisen, so hätte diese einen Durchmesser von 40 km.

Fazit: Das im vorangegangenen Kapitel angesprochene Problem der Sonnenneutrinos stellt sich aus dieser Sicht gegenwärtig so dar: Nach den vorherrschenden Theorien über die Sonnendynamik entstehen im Innern des Sterns bei insgesamt sechs Arten des Beta-Zerfalls Neutrinos. Die weitaus meisten, aber auch energieärmsten Neutrinos liefert die Verschmelzung von Wasserstoffkernen zu Helium. Diese Neutrinos können von dem Chlornachweisexperiment, wie es seinerzeit von den amerikanischen Wissenschaftlern im Goldbergwerk von Süddakota ausgeführt wurde, nicht nachgewiesen werden. Eine weitere, ebenfalls häufige Neutrinoquelle ist der Elektroneneinfang eines Beryllium-7-Isotops, das sich anschließend – unter Aussendung eines Neutrinos – in ein Lithiumisotop verwandelt. Auch diese Neutrinos sind niederenergetisch und können mit der bisherigen Experimentiertechnik prinzipiell nicht nachgewiesen werden. Nur wenige neutrinoreiche Prozesse wurden bisher erfaßt; so das Aufeinandertreffen zweier Protonen mit einem Elektron oder der Beta-Zerfall der Isotope Bor-8, Stickstoff-13 oder Sauerstoff-15.

Die vorbereiteten Galliumexperimente erfassen alle diese Energiebereiche. Sollte sich dann immer noch ein zu geringer Fluß dieser Sonnenpartikeln ergeben, wäre das nach Ansicht vieler Experten ein ernst zu nehmender, indirekter Beweis für Neutrinooszillationen, d. h. für die Verwandlung eines Teils dieser Elektroneneutrinos in Myon- oder Tauon-Neutrinos während des rund achtminütigen Weges von der Sonne zur Erde.

Aber nicht nur Neutrinos, auch das »altewürdige« Proton brachte im Jahre 1980 Bewegung in die Physik. Aufgrund theoretischer Überlegungen sowie verschiedener Experimente, die Auskunft über die reale Existenz und die Eigenschaften der seit 1964 in der Physik umhergeisternden Quarks bringen sollten, wurde eine weitere »Festung« der Physik angegriffen. Denn, so zeigte sich, es wäre durchaus vernünftig, davon auszugehen, daß das Proton bzw. der Kern des Wasserstoffatoms nicht stabil ist, sondern entgegen

aller bisherigen Überzeugung ebenfalls zerfallen kann, und zwar in ein Positron und in ein neutrales Pi-Meson. Die Häufigkeit eines solchen Zerfalls ist allerdings extrem gering, für die irdische Physik überhaupt nicht der Rede wert. Denn – statistisch gesehen – erst alle 10^{30} Jahre zerfällt nach diesen ersten theoretischen Überlegungen ein Wasserstoffkern.

Was für die irdische Physik völlig belanglos ist, besitzt aber – in kosmischen Maßstäben gesehen – durchaus praktische Bedeutung. Denn für kosmologische Prozesse muß – falls die Theoretiker recht behalten – diese besondere Möglichkeit der Umwandlung von Masse in Energie sehr wohl zu Buche schlagen und zur Überprüfung bestehender Theorien und Erkenntnisse führen. Allein die im Kosmos winzige Erde sollte aufgrund des Protonenzerfalls jährlich einige Kilogramm Masse verlieren. Im Laufe ihrer Geschichte wären das aber immerhin 10 bis 20 Mill. t gewesen.

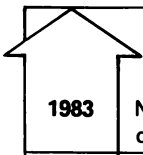
Doch alles Spekulieren hilft nichts – wie immer in der Wissenschaft müssen experimentelle Tatsachen her. Erste Experimente haben bereits ihren Anfang genommen. Wie schon in der Neutrino-astronomie zwingen die Begleitumstände die Forscher, mit ihren Geräten zu Höhlenbewohnern zu werden. So sollen beispielsweise in einem ehemaligen Salzbergwerk bei Cleveland (USA-Staat Ohio) 10000 t Wasser deponiert werden, in denen entsprechende Strahlungsdetektoren die spärlichen Folgen möglicher Protonenzerfallsprozesse registrieren werden. Westeuropäische Wissenschaftler führen ein ähnliches Experiment in einer Bergkammer durch, die vom Montblanc-Straßentunnel aus zu erreichen ist.

Auf der Suche nach den kleinsten Teilchen

Elektronen, Neutronen, Protonen, Neutrinos, Pi-Mesonen, Quarks und viele andere Teilchennamen beherrschen heute die Atomphysik. Weit über 200 Partikeln sind den Kernphysikern bekannt. Um diese Fülle überblicken zu können, um Ordnung in das scheinbare Wirrwarr zu bringen, ist es zweckmäßig, einen kleinen Ausflug in die Geschichte der Atom- und der Elementarteilchenphysik zu unternehmen.

Am Anfang des 19. Jahrhunderts begründete der englische Physiker und Chemiker John Dalton im Ergebnis exakter Messungen von Stoffmengen den von alten griechischen Philosophen her bekannten Atombegriff. Er fand bei chemischen Experimenten heraus, daß es unter den vorhandenen Stoffen elementarste Partikeln geben müsse, die sich auf chemischem Wege nicht weiter zerteilen lassen. Der russische Chemiker Dmitri Mendelejew schuf im selben Jahrhundert das bekannte Periodensystem der Elemente, gestützt auf nichts anderes als auf die Kenntnis der Atommasse (Atomgewichte) der zu jener Zeit bereits bekannten Elemente. Es waren dann Physiker, die nur wenige Jahrzehnte später im Experiment herausfanden, daß auch diese kleinsten Bausteine aus noch kleineren Partikeln bestehen müssen.

Den Ausgangspunkt bildeten Experimente an Gasentladungsröhren. Solche Versuche stellte zum Anfang des vorigen Jahrhunderts auch Joseph J. Thomson, Professor am britischen Cavendish-Laboratorium, an. Er fand im Jahre 1897 heraus, daß die damals bekannten Katodenstrahlen einen Strom von Elektronen darstellen, Partikeln, die negativ geladen sind. Die Existenz solcher Teilchen, für deren Entdeckung Thomson den Physik-Nobelpreis erhielt, deutete aber bereits darauf hin, daß es neben den Atomen auch andere, noch kleinere Bausteine als Bestandteil der Materie geben muß. Nur ein Jahr zuvor hatte der französische Physiker Henry Becquerel den radioaktiven Zerfall entdeckt, d. h. die Tatsache, daß eine nur aus Atomen bestehende Substanz andere Materie als eben jene Atome abstrahlt. Auch diese Meßdaten mußten zwangsläufig den Glauben daran untergraben, daß die Atome die wirklich kleinsten Teilchen der bekannten stofflichen Substanz sind.

	1983	Nachweis der W- und Z-Bosonen als Vermittler der schwachen Kernkraft
	1974	Sam Ting und Burton Richter entdecken das erste Charmteilchen (Bestätigung des Quarkmodells)
	1964	Murray Gell-Mann entwickelt das Quarkmodell
	1960	Eine Flut von immer neuen Teilchenentdeckungen setzt ein
	1947	Das Pi-Meson stößt zur Teilchenfamilie
	1937	Das Myon wird entdeckt
	1932	James Chadwick erkennt die Natur der von Bothe und Becker entdeckten Neutronenstrahlung Das Positron wird in der Höhenstrahlung nachgewiesen
	1931	Paul Dirac postuliert Existenz des Positrons (Antielektron)
	1930	Wolfgang Pauli sagt Existenz des Neutrinos voraus
	1916	Rutherford berichtet über die künstlich erzeugte Spaltung von Stickstoffatomen (Entdeckung des Protons als Grundeinheit der positiven Kernladung)
	1911	Ernest Rutherford entwirft sein Atommodell
	1909	Geiger und Marsden zeigen das Vorhandensein eines positiv geladenen Atomkerns
	1906	Albert Einstein findet das Photon
	1903	Ernest Rutherford entdeckt die Alphastrahlung
	um 1900	Joseph Thompson registriert als erster die Kathodenstrahlung (Elektronen)
		Henri Becquerel entdeckt den radioaktiven Zerfall
	1800	John Dalton formuliert den Atombegriff neu
		In der Antike begründen griechische Denker den Gedanken kleinster Bausteine (atomos) der Welt

Entdeckungsgeschichte der kleinsten Bausteine der Materie

Die nächste Station der Entdeckungsgeschichte ist mit dem Namen Ernest Rutherford verbunden. Der in Neuseeland geborene Wissenschaftler kam im Jahre 1894 als Praktikant in das Cavendish-

Laboratorium zu Thomson. Gemeinsam untersuchten sie die gerade entdeckte radioaktive Strahlung, die beim natürlichen Zerfall von Atomen frei wird. Es gelang Rutherford nachzuweisen, daß diese radioaktive Strahlung aus mindestens zwei Komponenten besteht: aus Teilchen, die mit den zuvor von Thomson entdeckten Elektronen identisch sind, sowie aus viel schwereren, aber positiv geladenen Zerfallsstücken, die heute als Alphastrahlung bekannt sind.

Um hinter die Natur dieser Teilchen zu kommen, beschloß Rutherford später dünne Folien aus verschiedenen Stoffen mit den neuentdeckten Strahlen. Vor bzw. hinter den Folien ordnete er fotografische Platten an, die an jenen Stellen, wo Alphateilchen auftrafen, nach der Entwicklung Schwärzungen aufwiesen. Rutherford – inzwischen in Manchester tätig – entdeckte, daß die Atome des Folienmaterials offensichtlich die Alphateilchen ein wenig aus ihrer Flugbahn ablenkten.

Diese Entdeckung schien zunächst mit dem von Thomson entwickelten Atommodell in Übereinstimmung zu stehen, wonach man sich ein Atom als eine positiv geladene Kugel vorzustellen habe, die mit Elektronen vollgestopft sei. Aber diese Vorstellung befriedigte den an der Universität Manchester arbeitenden Wissenschaftler nicht. Er beauftragte zwei seiner besten Schüler, Hans Geiger und Ernest Marsden, der Sache weiter und tiefergründiger nachzugehen. »Ich erwarte zwar nicht, daß aus Ihrem Experiment etwas Vernünftiges herauskommt, aber passen Sie trotzdem auf, vielleicht finden Sie etwas Neues«, gab er seinen Schülern auf den Weg.

Beide fanden sie etwas Neues. Mit einer fünfseitigen, kurzen Veröffentlichung leiteten sie 1909 eine der großen Umwälzungen in der Naturwissenschaft unseres Jahrhunderts ein. Ihr Lehrer, im Jahr zuvor mit dem Nobelpreis für Chemie geehrt, hatte die in seinem Laboratorium entstandene Arbeit der Royal-Society vorgelegt. Geiger und Marsden berichteten darin über Strahlungsexperimente an Gold- und Platinfolien. Dabei konnten die beiden Forscher aus der Ablenkung der Flugbahnen der Teilchengeschosse auf das Vorhandensein positiv geladener Kerne im Innern eines jeden Atoms schließen.

In einer kurzen Veröffentlichung des Physikalischen Instituts der Universität Manchester vom Juli 1912 gaben Geiger und Marsden weitere Messungen an Reflexionsschichten bekannt, bei denen die reflektierten Alphastrahlen von einem Zinksulfidschirm aufgefangen wurden. Bei jedem Auftreffen eines Strahlenpartikels wird auf einem solchen Schirm ein kurzer Lichtblitz, eine sogenannte Szintillation

erzeugt. Bei dem in dieser Veröffentlichung beschriebenen Versuch wurden über 100000 Szintillationen gezählt. »Im voraus möge erwähnt werden«, schreiben die Autoren, »daß die Resultate der vorliegenden Versuche in guter Übereinstimmung stehen mit den theoretischen Betrachtungen von Rutherford. Diese Übereinstimmung gewährt eine starke Stütze für die Richtigkeit der Anschauungen, welche der Theorie zugrunde liegen, nämlich, daß ein Atom eine intensive Ladung enthält, deren Dimensionen sehr klein sind im Vergleich mit den Dimensionen des Atoms selbst.«

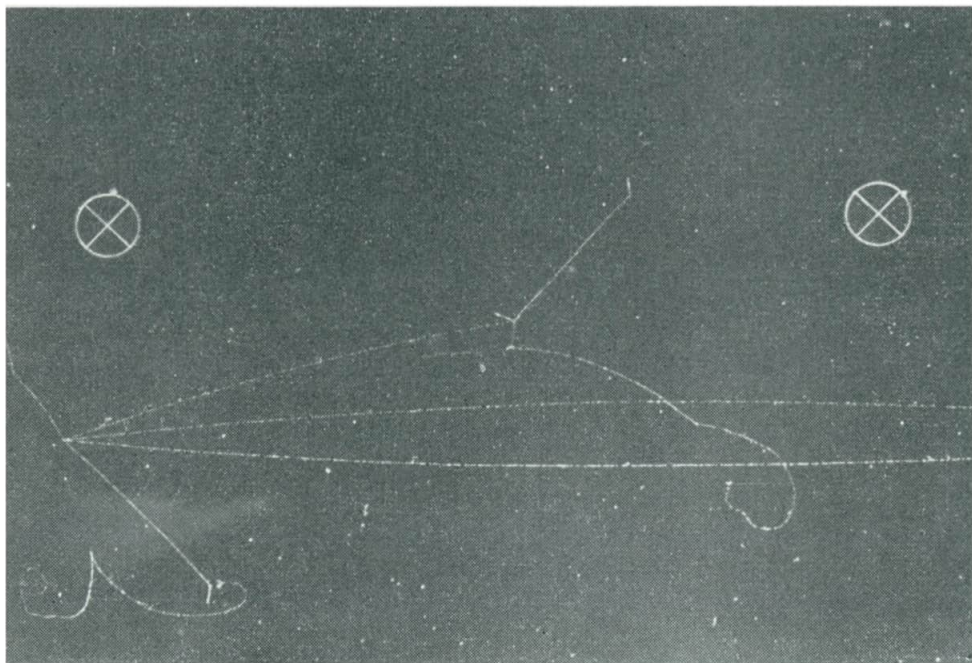
Damit war endgültig klar, daß das Atom kein kompaktes Teilchen ist. Es mußte über eine räumliche Struktur verfügen, in deren Zentrum ein positiv geladener Kern und an deren Peripherie die negativ geladenen Elektronen ihren Platz hatten.

Im Jahre 1916 berichtete Rutherford in einem Brief an den dänischen Physiker Niels Bohr über eine weitere Entdeckung. Es handelte sich um eine künstlich erzeugte Spaltung von Stickstoffkernen als Ergebnis eines Beschusses mit Alphateilchen, bei dem ein leichtes Wasserstoffatom freigesetzt wurde. Weitere Untersuchungen führten zu dem Schluß, daß dieses Teilchen die Grundeinheit der in einem Atomkern vorhandenen, elektrisch geladenen Bausteine ist. Damit war neben dem Elektron das zweite Elementarteilchen geboren, das Proton, das mit dem Kern eines Wasserstoffatoms identisch und etwa 2000mal schwerer als ein Elektron ist.

Doch die Welt war dennoch nicht in Ordnung. Denn, so lautete die berechtigte Frage, was hält die allesamt positiv geladenen Protonen im Kern eines Atomes eigentlich zusammen? Ihre gegenseitig abstoßende elektrische Kraft sollte sie doch mit elementarer Wucht auseinandertreiben.

Der Antwort auf diese Frage kamen als erste die deutschen Physiker Walter Bothe und sein Mitarbeiter Becker zu Beginn der 30er Jahre unseres Jahrhunderts nahe. Bei Experimenten mit Beryllium entdeckten sie eine Strahlung von bisher unbekannter Durchdringungskraft. Die beiden Experimentatoren charakterisierten sie – fälschlicherweise, wie sich später herausstellte – als gewöhnliche Gammaquanten mit hoher Energie, d. h. als eine besondere Form elektromagnetischer Strahlung. Sofort begannen sich in Frankreich Irène und Frédéric Joliot-Curie für diese »Beryllium«-Strahlung zu interessieren. Die Curies kamen ebenfalls zu der falschen Schlußfolgerung, es handele sich um eine Gammastrahlung von ungewöhnlicher Durchdringungskraft.

Doch der dritte Anlauf glückte. Im Februar 1932, einen Monat



In speziellen Nachweiskammern hinterlassen die unsichtbaren Elementarteilchen entlang ihrer Flugbahn Spuren.

nach der zitierten Mitteilung des Ehepaares Joliot-Curie, veröffentlichte die englische Wissenschaftszeitschrift »Nature« einen kurzen Brief an die Redaktion, der von dem späteren Nobelpreisträger James Chadwick abgesandt war. »Diese experimentellen Ergebnisse lassen sich aufgrund der Hypothese, daß die Berylliumstrahlung ihrer Natur nach eine elektromagnetische Strahlung darstellt, nur sehr schwer erklären, folgen jedoch unmittelbar aus der Annahme, daß die Strahlung aus Partikeln besteht, die eine der Protonenmasse entsprechenden Masse, jedoch keine Ladung besitzen«, schrieb Chadwick, ebenfalls ein Schüler Rutherfords.

Damit war ein weiteres Elementarteilchen entdeckt, das Neutron, das ebenso wie das Proton Kernbaustein der Atome ist. Diese Teilchen, die keine elektrische Ladung besitzen, hatten die Physiker im Verdacht, auf eine noch nicht näher bekannte Weise den »Kitt« für das Zusammenhalten der positiv geladenen Protonen im Atomkern darzustellen.

Doch von welcher Art war dieser »Kitt«? Welche Kräfte wirkten hier? Rechnungen zeigten, daß die aus der Newtonschen Physik

bekannten Gravitationskräfte, wie auch die bereits gut erforschten elektromagnetischen Kräfte, nicht in Frage kommen konnten. Rutherford schlußfolgerte daraus, daß hier eine bis dahin unbekannte Kräfteart wirken mußte, deren Vorhandensein nur innerhalb sehr geringer Entfernungen zu verzeichnen ist.

Die anfänglichen Rätsel des Aufbaus der stofflichen Materie schienen somit gelöst, hätte nicht zwei Jahre zuvor Wolfgang Pauli das in jeder Weise exotische Neutrino »erfunden«. Und bereits ein Jahr später, 1931, war ein weiterer Paukenschlag erfolgt. An der Universität Cambridge hatte Paul Dirac theoretische Modelle für das Verhalten des Elektrons entworfen und durchgerechnet. Bei seinen Gleichungen zur Beschreibung von Elektronenbewegungen entdeckte er, daß diese zwei mögliche Lösungen besitzen. Aber nur eine davon war mit den physikalischen Eigenschaften des Elektrons vereinbar. Die andere, mathematisch mögliche Lösung setzte ein Teilchen voraus, das in allen Eigenschaften mit dem Elektron übereinstimmte, bis auf die positive elektrische Ladung. Viele Physiker glaubten zunächst, Dirac habe lediglich eine mathematische Kuriosität entdeckt, ohne jede Realität in der wirklichen Welt.

Doch der Gedanke, in der Natur könne auch ein positiv geladenes Elektron, gewissermaßen ein »Antielektron«, existieren, war nicht mehr zu unterdrücken. Bereits ein Jahr später, 1932, wurde dieses Teilchen, das Positron, tatsächlich in der kosmischen Strahlung entdeckt. Eine sensationelle Theorie, die Theorie der Antiteilchen, war im Experiment bestätigt. Dreißigjährig, erhielt Paul Dirac für diese Leistung den Nobelpreis. Das Antiproton entdeckten amerikanische Wissenschaftler im Jahre 1955. Sowjetische Wissenschaftler synthetisierten zu Beginn der 70er Jahre an dem großen Protonenbeschleuniger von Serpuchow erstmals in der Welt Isotope des Elements Antihelium.

Die Konjunktur für Teilchenentdecker schien nicht abzureißen. 1937 fanden Wissenschaftler in der kosmischen Strahlung ein weiteres Teilchen, das Myon. Auch dieses Teilchen sollte jahrzehntelang wegen rätselhafter Eigenschaften den Wissensdrang der Forscher unbefriedigt lassen. Es verfügte über alle Merkmale eines Elektrons, besaß aber dessen zweihundertfache Masse. 1947 kam ein weiteres Teilchen zu der wachsenden Partikelfamilie, das sogenannte Pi-Meson.

1950 bestand die Welt in den Gleichungen und Experimenten der Physiker, zählt man die entsprechenden Antiteilchen nicht mit, aus noch nicht einmal zehn Elementarteilchen. Dazu gehörten die

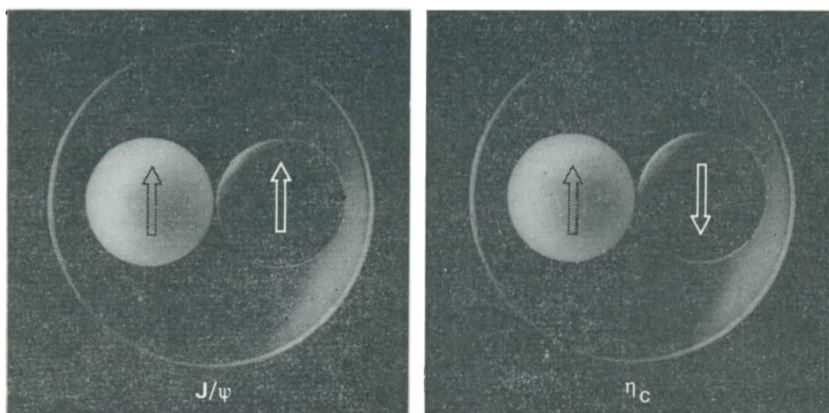


*Auswerteplatz für
Filmaufnahmen von
Ereignissen in
Blaskammern des
Instituts für
Hochenergiephysik der
Akademie der
Wissenschaften der
DDR in Zeuthen
bei Berlin*

Protonen, Neutronen, Elektronen, Myonen, Pi-Mesonen und Photonen. Letztere sind die Partikeln der elektromagnetischen Strahlung. Sie wurden 1906 von Albert Einstein entdeckt.

In den kommenden Jahren vergrößerte sich die Teilchenfamilie um weitere Partikeln, mehr als 20 an der Zahl. War die Situation bis dahin für die Physiker noch einigermaßen überschaubar, folgte nach 1960 aber geradezu eine Teilcheninflation. Mit den fertiggestellten neuen Großbeschleunigern in den Forschungszentren der Welt wurde ein neues Teilchen nach dem anderen »geboren«. Aus der einstigen Elementarteilchenfamilie wurde über Nacht ein ganzer Partikelzoo. Weit über 200 Elementarteilchen mußten in die Listen der Physiker aufgenommen werden. Und das innerhalb von nur fünf Jahren.

Es war nicht nur die Gewöhnung an Neues, daß Ende der 60er



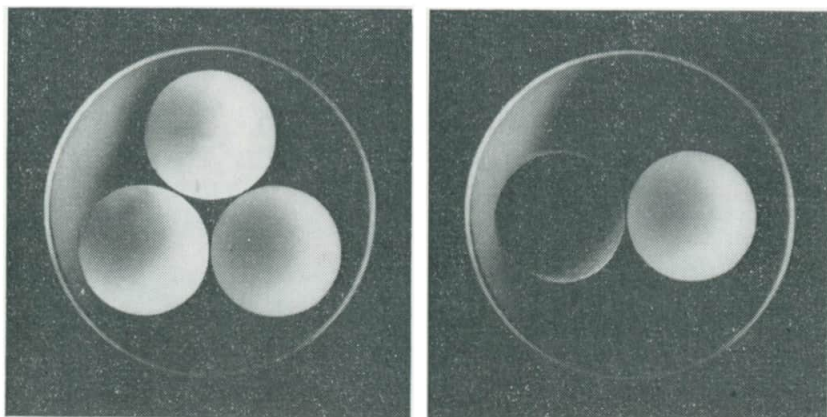
Zwei Teilchen, die jeweils aus Charmquark und Charmantiquark bestehen – mit gleichgerichtetem Spin (J/Psi-Teilchen) und entgegengesetztem Spin als Bausteine

und Anfang der 70er Jahre Nachrichten von neuentdeckten Elementarteilchen die Fachwelt nicht mehr sonderlich aufregten. Die Lage war nur unübersichtlich geworden. Und weitere neue Partikeln vergrößerten eher die Unklarheit, als daß sie zu theoretischen Hinweisen für ein tieferes Verständnis der Gesetzmäßigkeiten der Teilchenwelt verhalfen.

Doch im Herbst 1974 wurde es schlagartig anders. Eine Forschergruppe unter Leitung von Sam Ting begann an dem Protonenbeschleuniger von Brookhaven (USA) Experimente, bei denen nach dem Zusammenstoß von hochbeschleunigten Protonen mit Atomkernen Paare von Elektronen und Positronen erzeugt wurden. Im Energiebereich von etwa 3100 MeV entdeckten sie ein bis dahin unbekanntes Teilchen, das relativ häufig in Elektron-Positron-Paare zerfällt.

Fast gleichzeitig kam eine andere Forschergruppe unter Leitung von Burton Richter am großen Linearbeschleuniger von Stanford (USA-Bundesstaat Kalifornien) zu analogen Ergebnissen. Ihr Experiment stellte praktisch die Umkehrung des Versuches im Fermi-Laboratorium dar. Sie ließen aus Speicherringen Elektronen und Positronen hoher Energie aufeinanderstoßen und entdeckten dabei ebenfalls im Energiebereich von 3100 MeV das neue Teilchen.

Da sich beide Forschergruppen nicht auf einen gemeinsamen Teilchennamen einigen konnten, erhielt es schließlich einen Doppelnamen: J/Psi. Die Bezeichnung J wurde von Ting vorgeschlagen,



Die Struktur von Mesonen und Baryonen: Mesonen bestehen stets aus einem Quark und einem Antiquark, Baryonen hingegen aus drei Quarks.

da das Symbol J im Chinesischen den Namen Ting kennzeichnet. Die von Richter geleitete Forschergruppe beschloß, das Teilchen mit dem griechischen Buchstaben Psi zu kennzeichnen. Ting und Richter erhielten für ihre Entdeckung den Nobelpreis für Physik 1976.

Was war geschehen, was kennzeichnete dieses Teilchen auf so besondere Weise? Mit diesem im Experiment nachgewiesenen neuen Teilchen war indirekt eine Theorie bestätigt worden, die bereits 1964 von dem amerikanischen Physiker Murray Gell-Mann und – unabhängig und gleichzeitig im gleichen Jahr – von George Zweig aufgestellt worden war. Es gäbe in der Natur, so vermuteten die beiden Physiker, drei besondere Elementarteilchen, aus denen die Mehrzahl aller anderen Partikeln zusammengesetzt sein sollte. Gell-Mann taufte diese Partikeln – in Anlehnung an eine Schöpfung des Schriftstellers James Joyce – auf den Namen »Quarks«.

Später wurde diese Theorie erweitert, wurde die Existenz von mehr als nur drei Quarks gefordert. Das 1974 gefundene neue Teilchen setzte nun die Existenz eines vierten Quarks voraus. Das Auffinden des J/Psi-Teilchens hat somit, parallel zu wichtigen theoretischen Ergebnissen jener Jahre, das Verständnis über den inneren Aufbau der Materie wesentlich vertieft und Klarheit darüber geschaffen, was es mit dem scheinbaren Wirrwarr im Zoo der Partikeln auf sich hat.

Die Ordnung im Partikelzoo

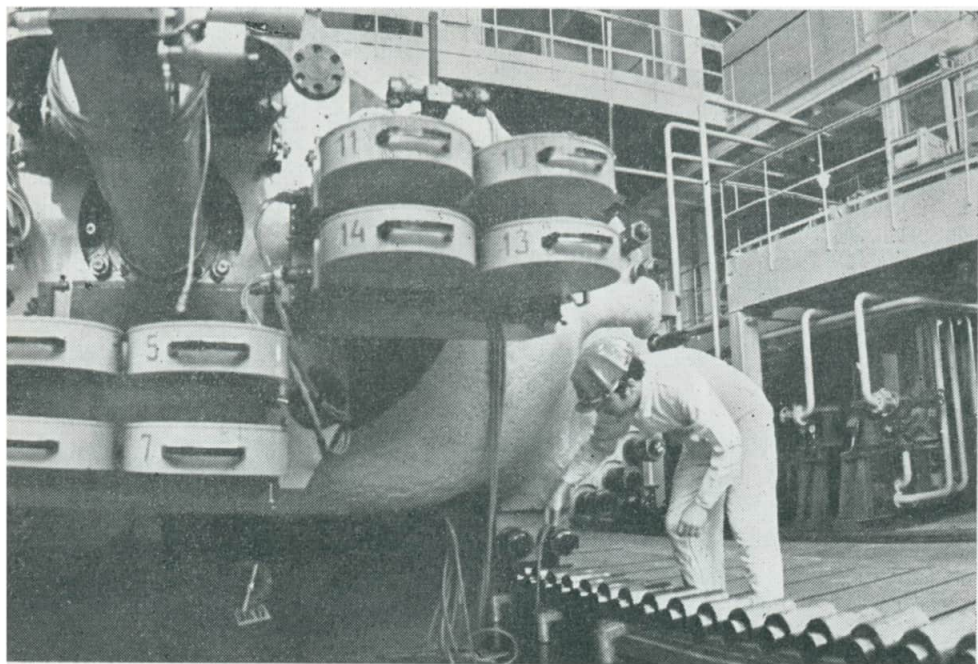
Es bedurfte mehr als zweier Jahrzehnte, bis die moderne Physik Klarheit in den scheinbaren Wirrwarr des übergroß gewordenen Teilchenzoos brachte. Sicher, jedes entdeckte Teilchen hatte gewissermaßen einen Personalausweis erhalten. So besaß es seinen Namen und zur besonderen Kennzeichnung eine Reihe spezieller Merkmale. Dazu zählten die elektrische Ladung, die Ruhmasse des Teilchens oder seine mittlere Lebensdauer. Für jedes dieser Teilchen war außerdem eine Reihe sogenannter Quantenzahlen bestimmend: der Spin, einem mechanischen Drehimpuls vergleichbar; die sogenannte Parität, der Isospin sowie die Hyperladung.

Nahm man die Ruhmassen jedes der Teilchen her, so zeigte sich, daß es offensichtlich zwei Familien von Partikeln gibt: solche mit geringer und andere mit großer Masse. Die Teilchen der ersten Gruppe, zu der heute das Elektron, das Myon, das Tau-Teilchen sowie die drei zugehörigen Neutrinos zählen, erhielten damals den Familiennamen Leptonen. Die Mehrheit aller anderen bekannten Elementarteilchen, weit über 200 an der Zahl, erhielt den Familiennamen Hadronen.

Die Hadronen, auch das konnte frühzeitig herausgefunden werden, gliedern sich wiederum in zwei Unterfamilien: solche mit ganz-

Tabelle: Beispiele für Hadronen

Hadron	Quarks	Spin	Ladung	Masse in GeV/c ²
π^+	$u\bar{d}$	0	+1	0,14
ρ^+	$u\bar{d}$	1	+1	0,76
π^-	$d\bar{u}$	0	-1	0,14
Φ	$s\bar{s}$	1	0	1,04
J/ψ	$c\bar{c}$	1	0	3,1
Y	$b\bar{b}$	1	0	9,46
p	uud	1/2	+1	0,938
n	udd	1/2	0	0,94



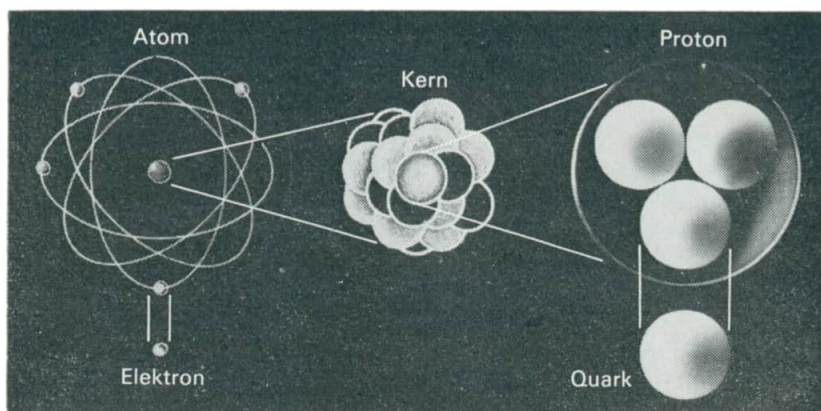
Anordnung der Filmkameras an der Blasenkammer SKAT des Instituts für Hochenergiephysik in Serpuchow bei Moskau

zahliger Spinzahl, Mesonen genannt, und solche mit halbzahligem Spin, Baryonen genannt. Die Mesonen erwiesen sich als durchweg instabil, während sich unter den Baryonen auch relativ stabile Teilchen befinden. Zu ihnen zählen beispielsweise die Kernbausteine Proton und Neutron.

Völlig aus dem Rahmen dieses Schemas fiel allerdings ein schon länger bekanntes Teilchen, das Photon, das mit einer Ruhmasse gleich Null in jeder elektromagnetischen Strahlung vorhanden ist.

Diese scheinbare Ordnung in der Welt der Partikeln erwies sich bei näherer Betrachtung aber als sehr unbefriedigend. Damit konnte das Wesen der Teilchen nicht geklärt werden, ebensowenig auch die vielfältigen Reaktionen und Umwandlungen, die zwischen den verschiedensten Teilchen im Experiment nachzuweisen waren. Allein anhand der äußeren Eigenschaften der Partikeln, wie beispielsweise der Masse oder dem Spin, war das Durcheinander nicht zu ordnen.

Eine wichtige Ergänzung in diesem Familienschema brachte die Berücksichtigung der Kräfte, die im Bereich der Elementarteilchen

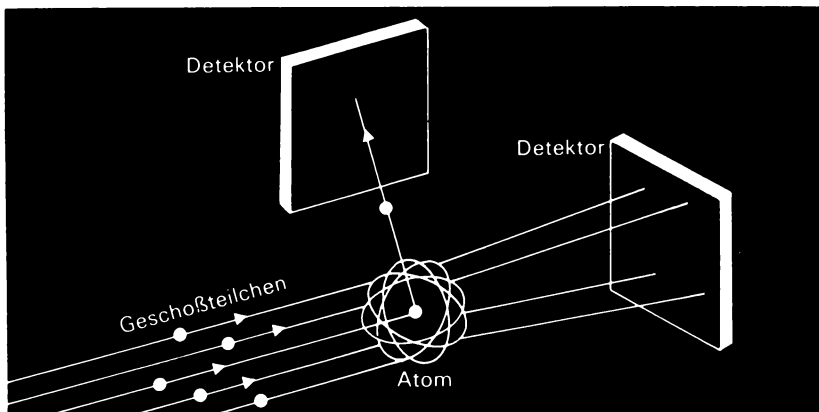


Strukturierungsstufen der Materie

bei ihrer Entstehung und bei Zerfallsprozessen wirksam sind. Diese Kräfte – davon wurde gelegentlich schon gesprochen – werden von den Fachleuten häufig auch kurz als Wechselwirkungen bezeichnet.

Schon bei der Entdeckung des Atomkerns war ja – wie bereits geschildert – die Frage aufgetaucht, was eigentlich die positiv geladenen Kernbausteine zusammenhält. Weder die bis dahin bekannte Gravitation noch die elektromagnetische Kraft konnten hierbei als »Kitt« wirken. Deshalb nahmen die Physiker für den Bereich der Atomkerne, oder anders ausgedrückt, für sehr kleine Entfernungsbereiche das Wirken einer bis dahin unbekannten Kraft an.

Erinnern wir uns: Diese starke Kernkraft wird häufig auch als starke Wechselwirkung bezeichnet. Wie der Name bereits andeutet, zählt zu ihren Besonderheiten die enorme Stärke und eine äußerst kurze Reichweite, die kaum über eine Strecke vom Durchmesser eines Atomkerns, d. h. von etwa 10^{-13} cm hinausreicht. Diese starken Kernkräfte, so konnte errechnet werden, mußten etwa hundertmal stärker sein als die elektromagnetische Wechselwirkung. Als im ersten Viertel unseres Jahrhunderts der radioaktive Zerfall entdeckt wurde, standen die Physiker vor einer weiteren Naturerscheinung, zu deren Erklärung weder die Gravitation, noch der Elektromagnetismus, noch die starken Kernkräfte herangezogen werden konnten. Hier wirkte offensichtlich eine vierte, fundamentale Naturkraft, die den Namen schwache Wechselwirkung erhielt. Sie erwies sich als im Vergleich zu den starken Kernkräften um etwa eine Milliarde Mal schwächer.



Prinzipischeschema für Streuexperimente an Atomen – Geschossteilchen sind Elektronen, aber auch andere Teilchen

Im Licht dieser Erkenntnisse zeigte sich nun, daß sich sowohl Mesonen sowie Baryonen von ihren leichten Verwandten, den Leptonen, dadurch wesentlich unterscheiden, daß nur sie bei Prozessen der starken Wechselwirkung anzutreffen sind, während die Leptonen auf schwache Wechselwirkung, aber auch auf andere Kräfte ansprechen (siehe Tabelle). Aus dieser Tatsache resultiert auch der Familienname Hadronen, der sich aus dem griechischen Wort für stark ableitet.

Während die Familie der Leptonen für den Forscher überschaubar ist und auch zum Wesen des Photons keine ungelösten Fragen zu verzeichnen waren, bereitete die Großfamilie der Hadronen der

Tabelle: Die Leptonen und einige ihrer Eigenschaften

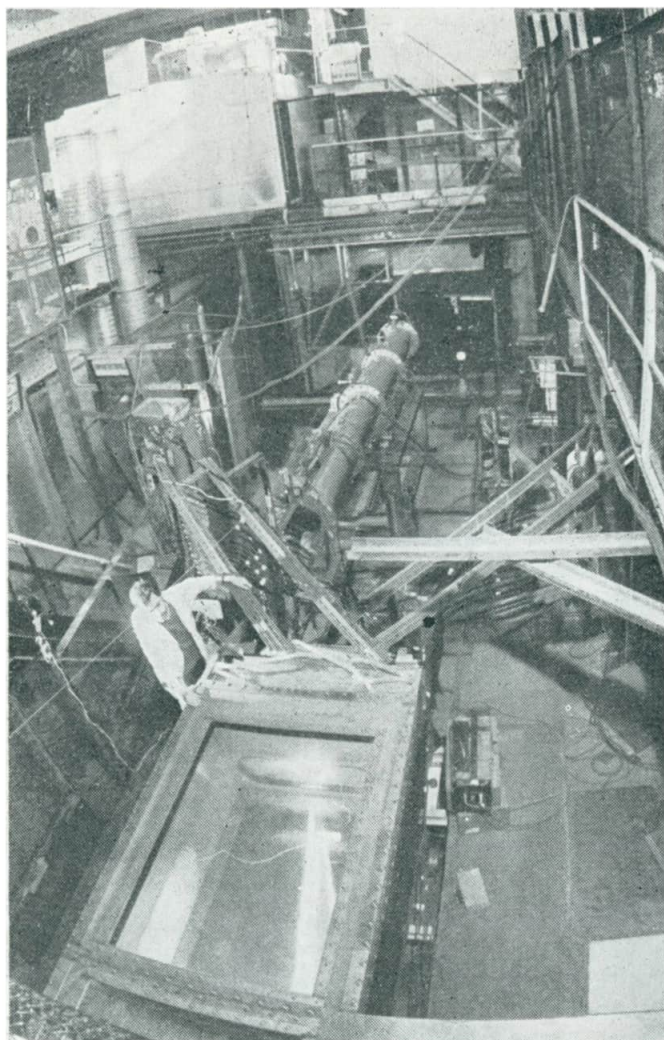
Lepton	Ladung in Einheiten der Elektronenladung	Masse in MeV/c^2	Lebensdauer in s
Elektron e	1	0,511	∞
Elektronen-Neutrino ν_e	1	0	∞
Müon μ^-	1	106,66	$2,197 \cdot 10^{-6}$
Müon-Neutrino ν_μ	0	0	∞
τ -Lepton	1	1807	instabil
τ -Lepton-Neutrino ν_τ	0		

Wissenschaft jahrzehntelang Kummer. Aus dem Studium der elektromagnetischen Strahlung und ihrer Wechselwirkung mit Materie war bekannt, daß zwischen elektrischen Ladungen ständig Photonen ausgetauscht werden. Das Photon, das keine Masse besitzt, vermittelt auf diese Weise die Anziehungs- bzw. Abstoßungskräfte elektrischer Ladungen. Frühzeitig nahm man deshalb auch für die Familie der Hadronen solch einen Funktionsmechanismus an. Lange Zeit vermuteten die Physiker beispielsweise, daß die instabilen Mesonen – gewissermaßen als Quanten der zwischen den Partikeln der starken Wechselwirkung wirkenden Kraftfelder – bei Übergängen von einer Teilchenart zur anderen ausgetauscht werden. Diese Ansicht erwies sich aber als eine Sackgasse.

Seit Mitte der 60er Jahre, als aufgrund theoretischer Berechnungen, gewissermaßen mit Papier und Bleistift, die Existenz der noch fundamentaleren Quarkteilchen vorhergesagt wurde, und als aufgrund von Beugungsexperimenten mit Elektronenstrahlen erste Hinweise auf eine innere Struktur der Protonen und Neutronen gewonnen wurden, setzte das Suchen in die richtige Richtung ein. In den 70er Jahren wurde dann offensichtlich, daß der Schlüssel zum Verständnis der starken Wechselwirkung nicht in den Wechselwirkungsreaktionen zwischen den Hadronen liegt, sondern im Studium jener Kräfte, die zwischen den Quarks ausgetauscht werden. Theoretisch ließ sich zeigen, daß diese neuen Superteilchen, die noch elementarer als die bekannten Elementarteilchen sein mußten, gewissermaßen die Bausteine für jedes Teilchen der Hadronenfamilie sind. Darauf wird im folgenden Kapitel ausführlich eingegangen.

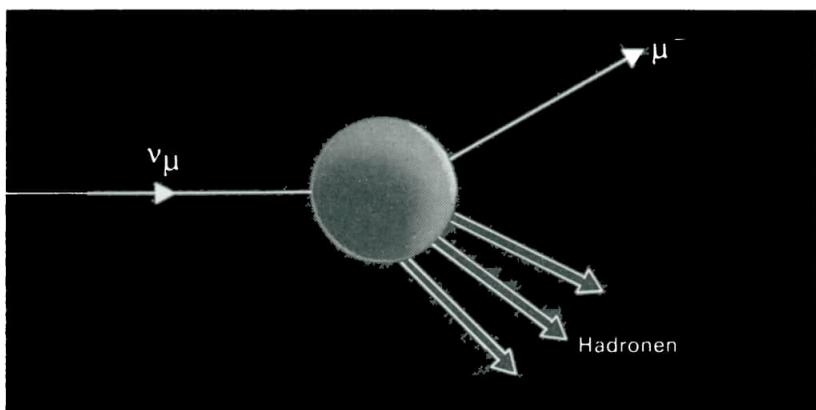
Tabelle: »Fundamentalkräfte« und ihr Wirkungsfeld

	Relative Stärke	Reichweite in cm	Teilchen, auf die die Kraft wirkt
Starke Wechselwirkung	1	$10^{-13} - 10^{-14}$	Hadronen, Quarks
Elektromagnetische Wechselwirkung	10^{-2}	praktisch unendlich	alle elektrisch geladenen Teilchen
Schwache Wechselwirkung	10^{-5}	kleiner als 10^{-14}	Hadronen, Leptonen, Quarks
Gravitation	10^{-39}	praktisch unendlich	alle Teilchen



Montagearbeiten an der Spurennachweiskammer RISK in Serpuchow

Die 1964 aufgestellte Hypothese lautete zunächst: Drei Teilchen, noch kleiner als alle bis dahin beobachteten Partikeln, sollten die Grundbausteine der Hadronenmaterie sein. Zu den merkwürdigsten Eigenschaften dieser Teilchen zählte die Tatsache, daß sie über eine elektrische Ladung verfügen mußten, die nur ein Bruchteil derjenigen des Elektrons ist. Die Elektronladung galt bis dahin aber als die kleinstmögliche, gewissermaßen als die elementare elektrische Ladung in der Natur.



Wenn ein Myon-Neutrino auf einen Wasserstoffkern trifft, kann es sich in ein Myon umwandeln. Dem Proton wurde ein großer Teil der Neutrinoenergie zugeführt, deshalb zerfällt es in eine Anzahl anderer Teilchen.

Seither ist diese kühne These zu einer in sich abgeschlossenen Theorie erweitert worden. Danach – soweit soll vorgegriffen werden – kann jedes dieser Quarkteilchen – fünf sind bisher bekannt – in drei verschiedenen Versionen existieren, die von besonderen, neuartigen Quantenzahlen gekennzeichnet sind, die mit Farbnamen bezeichnet wurden. Aus der Kombination solcher verschiedenen Quarkpartikeln mit den »Farben« Rot, Grün und Blau sowie deren Antiteilchen können alle bekannten Hadronen entstehen, freilich nur unter Beachtung strenger und komplizierter Kombinationsregeln.

Wenn auch ein solches Quark einzeln im Experiment noch nie nachgewiesen wurde, so besteht seit Ende der 70er Jahre aufgrund indirekter Beweise an der Richtigkeit dieses theoretischen Modells kein Zweifel mehr.

Nach dem aktuellen Stand der Elementarteilchenforschung ergibt sich somit folgende präzisierte Ordnung im Elementarteilchenzoo: Die Quarks und die Leptonen werden als in gewissem Sinne fundamentale Partikeln angesehen. Sie sind verantwortlich für das physikalische Geschehen im Bereich der Atomkerne sowie der Elementarteilchenreaktionen in Beschleunigeranlagen, in der kosmischen Höhenstrahlung oder im Innern von Sternen.

Die Wechselwirkung zwischen den Quarks, vorstellbar als Austausch virtueller Partikeln ähnlich dem Photon, ist maßgebend dafür, daß sich Protonen und Neutronen gegenseitig so stark anziehen, daß sie sich zu Atomkernen zusammenballen, die kaum größer als

Quarks			Leptonen	
elektrische Ladung - 2/3	1/3		1	0
u   	d   	e 	ν_e 	
c   	s   	μ 	ν_μ 	
$t^{1/3}$   	b   	τ 	$\nu_\tau^{2/3}$ 	
 Blau  Rot  Grün				

Übersicht über Quarks und Leptonen. Im Gegensatz zu den 6 Leptonen existiert jedes der sechs Quarks in drei verschiedenen Farben.

10^{-12} cm sind. Im Vergleich zu dieser Konzentration halten sich die Elektronen der Atomhülle in geradezu astronomischer Entfernung auf. Ein typischer Atomdurchmesser beträgt etwa das Zehntausendfache des Durchmessers des Atomkerns, nämlich etwa 10^{-8} cm. Dieses Verhältnis läßt sich folgendermaßen veranschaulichen: Legt man eine Erbse als Atomkern auf einen Fußballplatz, so würden die Elektronen etwa auf der Aschenbahn um die Erbse laufen.

Die große Vielzahl der weit über 200 bekannten Hadronenpartikeln ist somit lediglich ein momentaner oder auch stabiler Zustand der Kombination aus noch fundamentaleren Teilchen. Über das Zustandekommen dieser Kombination entscheiden die konkreten Umweltbedingungen, wie etwa der Energiebereich. Im Detail muß dieses Schema aber noch weiter präzisiert werden, wie in den folgenden beiden Kapiteln gezeigt wird.

Wie elementar sind Elementarteilchen?

Quarks, so wäre also zu vermuten, sind die kleinsten Grundbausteine der Materie, der »Urstoff« der materiellen Welt, wie in den letzten Jahren immer häufiger in Veröffentlichungen zu lesen ist. Doch schon die Tatsache, daß diese »egozentrischen« Teilchen nur für die Welt der starken Wechselwirkungen zuständig sind, nicht aber auch für die Welt der schwachen Wechselwirkung oder der Gravitation, zeigt, daß solche Ansichten übereilt und nicht ganz zutreffend sind.

Aber immerhin, es erwies sich, daß es in der Riesenfamilie der Elementarteilchen einige wenige »besonders« elementare Partikeln gibt. Es erhebt sich zwangsläufig die Frage, wie elementar eigentlich Elementarteilchen überhaupt sind, oder anders ausgedrückt, was muß im Lichte der modernen Physik unter einem Elementarteilchen, unter einem kleinsten Baustein der Materie verstanden werden? Denn das Wort »elementar« impliziert selbstverständlich die Vorstellung einer kleinsten, unteilbaren Einheit.

Im Prinzip handelt es sich hier um die uralte Frage nach der kleinsten, unteilbaren Struktureinheit der Welt, die schon von den griechischen Philosophen vor rund 2000 Jahren zum erstenmal erörtert wurde. In der Geschichte der griechischen Philosophie stellt die Atomistik praktisch einen Höhepunkt der Entwicklung des Materialismus in jenem Zeitalter dar. Nach Leukip und Demokrit sollte die Materie aus letzten, nicht weiter zerlegbaren, qualitativ gleichartigen, nur ihrer Gestalt und Größe nach voneinander unterschiedlichen Teilchen, den Atomen, bestehen. Das heute in der Wissenschaft gebrauchte Wort Atom hat denn auch seinen Ursprung in dem griechischen Wort »atomos«, das Unteilbare. Die Mannigfaltigkeit der Welt sollte nach der Theorie der altgriechischen Philosophen aus der verschiedenartigen Bewegung der Atome, aus ihrer Vermischung herrühren.

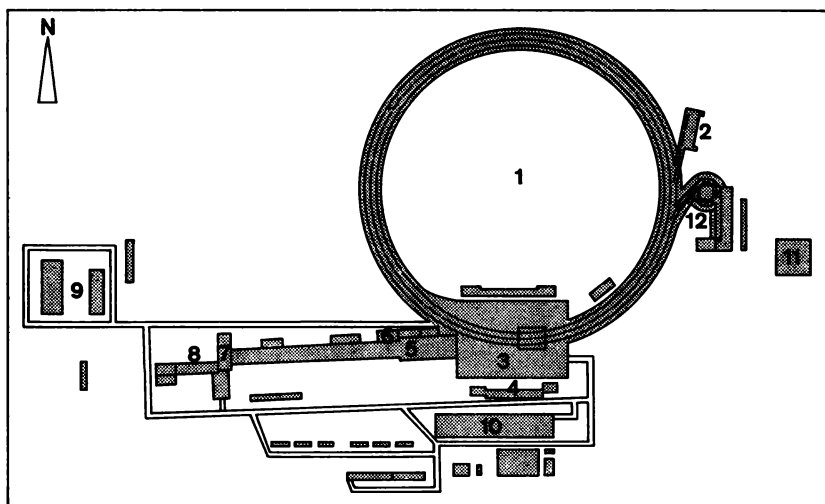
Eine Weiterentwicklung dieser Ansichten bedeutete die Atomistik Epikurs. Denn Aristoteles hatte bereits auf einen wesentlichen Mangel der Atomlehre Demokrits hingewiesen: Die Atome Demokrits besaßen nämlich nur eine unterschiedliche Gestalt und Größe, nicht aber zugleich auch die materielle Grundeigenschaft der



*Arbeitsplatz zur
Auswertung von
Spurenaufnahmen im
Vereinigten Institut
für Kernforschung
Dubna*

Schwere, die aber Epikur den Atomen zubilligte. Diese Vorstellungen wurden im Anschluß an Epikur von Lukrez weiter vervollkommen. Er gestand den Atomen zusätzlich noch spontane, schwingungsartige Bewegungen entlang ihren Bahnen zu.

Diese Grundvorstellung über die Existenz kleinster, unteilbarer Baueinheiten ist auf einem gänzlich anderen qualitativen Niveau auch in der Physik unseres Jahrhunderts gegenwärtig. Nach den

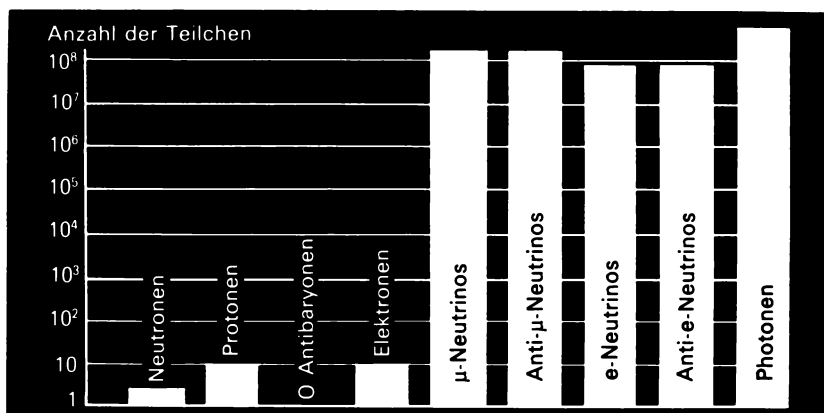


Beschleunigerkomplex in Serpuchow bei Moskau: 1 – Ringbeschleuniger, 2 – Injektor für Teilchenstrahl, 3 – Experimentierhalle, 4 – Laborgebäude, 5 – Galerie, 6 – Blaskammer »Ljudmilla«, 7 – Blaskammer »SKAT«, 8 – Blaskammer »Mirabelle«, 9 – Kältetechnikkomplex, 10 – Energieversorgung, 11 – Rechenzentrum, 12 – projektierte Speicherring

Erfolgen der Chemie im vorigen Jahrhundert, in dem der Atom-begriff wissenschaftlich neu belebt und begründet wurde, gelang es den Physikern Jahrzehnte später, auch Atome in weitere Bestandteile zu zerlegen. So wurde ein neuer Name für die noch elementare-ren Bausteine, für die im Sinne der griechischen Philosophen eigentlichen »Atome«, erforderlich. Das Wort »Atom« war ja bereits in der Chemie vergeben. Die neuentdeckten Teilchen erhielten zunächst spezielle Namen, wie Elektron oder Proton. Als sich jedoch immer weitere Partikeln einstellten, wurde ein Sammel-begriff erforderlich, der Begriff des Elementarteilchens.

Dabei war der ursprüngliche Begriffsinhalt »atomos« nicht ausschließlich auf die Eigenschaften der Masse oder aber auf die Gestalt eines Teilchens bezogen. In physikalischen Monographien zu Beginn dieses Jahrhunderts sprachen Experten beispielsweise auch häufig von »elektrischen Atomen«, wenn sie das Elektron meinten. Sie bekundeten damit die Ansicht, daß die elektrische Ladung des Elektrons die kleinste Ladung überhaupt ist und nicht in weitere, noch kleinere Ladungseinheiten bzw. Ladungsmengen zerlegt werden kann.

Ein halbes Jahrhundert später sollte die Physik aber zeigen, daß



auch die Vorstellung eines »elektrischen Atoms«, einer bis dahin für elementar und unteilbar angenommenen Ladungsgröße, nicht zutrifft. Denn die neuen Favoriten in der Teilchenwelt, die Quarks, können ja eine noch kleinere elektrische Ladung haben, nämlich nur ein oder zwei Drittel derjenigen des Elektrons.

Als in den 60er Jahren die »Sturmflut« immer neuer Teilchenentdeckungen einsetzte und insbesondere die Familie der Hadronen sich dramatisch vergrößerte, schien auch der Begriff »Elementarteilchen« gänzlich in Frage gestellt. Kritische Fragen wurden um so lauter, als sich zugleich zeigte, daß sich viele Elementarteilchen wiederum aus anderen Elementarteilchen zusammensetzen.

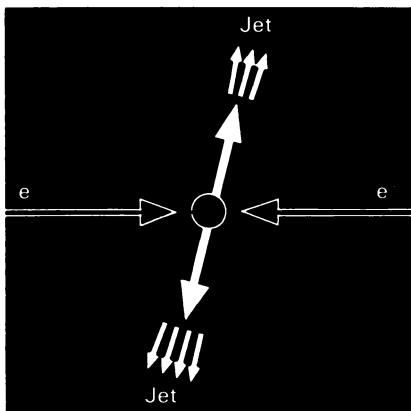
Das Grundmuster der in den Forschungszentren betriebenen Experimente besteht je eben gerade darin, hochbeschleunigte Partikeln mit anderer Materie zusammenprallen zu lassen, wobei im Ergebnis solcher »Karambolagen« Bruchstücke, d. h. Teilchen anderer Qualität mit anderen Energiewerten, davonfliegen.

Um die grundlegende Frage nach den »letzten« Bausteinen zu klären, wurden im wesentlichen zwei theoretische Richtungen beschritten: Die erste hielt weiterhin am Gedanken fest, daß es wirklich elementare Teilchen, sogenannte Fundamentalbausteine, geben müsse. Die aus ihnen zusammengesetzten Teilchen sollten aber, entgegen den atomistischen, mechanistischen Vorstellungen früherer Jahrhunderte, nicht mehr eine reine »Addition« der Grundpartikeln darstellen. So konnten durchaus Teilchen entstehen, deren Masse weitaus geringer war als die Summe der einzelnen Massen der das Teilchen bildenden Grundpartikeln.

Dieser scheinbare Widerspruch löst sich auf, wenn man die Tat-

*Anzahl der in einem Kubikmeter
durchschnittlich im Weltall
enthaltenen Teilchen (links)*

*Zusammenstoß von Elektron und
Positron: Es entstehen zunächst
ein Quark und ein Antiquark.
Diese wiederum zerfallen in
unterschiedliche Hadronen, die als
Teilchenjets fortfliegen.*



sache bedenkt, daß die Physiker bereits zu Beginn unseres Jahrhunderts herausgefunden hatten, daß Energie und Masse einander äquivalente Größen sind. So kann bei Teilchenzusammenstößen Masse als Energie abgestrahlt werden. Auch der umgekehrte Vorgang ist seit Jahrzehnten aus Experimenten bekannt. Diese Eigenschaft der Materie ist in der berühmten Einsteinschen Gleichung, $E = m c^2$, festgeschrieben. Aus dieser Tatsache entspringt ja übrigens auch die in der Elementarteilchenphysik übliche Maßeinheit für Partikelmassen, nämlich die Energiegröße »Elektronenvolt« (eV).

Die andere Forschungsrichtung suchte aus der Vielzahl der Hadronteilchen ein Schema herauszufinden, wonach jedes Teilchen dieser Familie aus beliebig vielen anderen Teilchen der gleichen Familie zusammengesetzt sein sollte. Nach dieser Hypothese des »bootstrap«, die von dem amerikanischen Physiker G. Chew zu Beginn der 60er Jahre aufgestellt wurde, stellen die stark wechselwirkenden Teilchen dynamische Strukturen dar, die ihre Existenz jenen Kräften verdanken, mittels derer sie wirken. Solche Teilchen sollten demnach durch andere, ebenfalls stark wechselwirkende Teilchen geschaffen werden. Jedes Teilchen entsteht folglich mit Hilfe anderer Teilchen und nimmt seinerseits an der Schaffung weiterer Partikeln teil.

Mit dieser Hypothese wurde allerdings die relative Selbständigkeit von Elementarteilchen, ihre Individualität, völlig aufgehoben. Der Begriff des Unteilbaren, d. h., das klassische griechische Atomverständnis war in dieser Hypothese auf sehr abstraktem Niveau

enthalten. Denn aus der endlichen Zahl vorhandener Teilchen sollte man beliebig viele andere Teilchen konstruieren können, die ihrerseits wieder als »Grundbaustein« für die Synthese anderer Partikeln wirken.

Die weitere Forschung in den 70er Jahren brachte jedoch die zuerst genannte Forschungsrichtung eindeutig in Front. Zahlreiche indirekte experimentelle Beweise lassen an der Existenz der Quarks, jener Grundbausteine der Hadronenfamilie, heute keinen Zweifel mehr.

Aber dennoch kann von ihnen als den »Urbausteinen« der Materie nur bedingt gesprochen werden. Denn auch ihre Existenz kennzeichnet nur den gegenwärtig erreichten Wissensstand in der Physik. Und dieser hat seine Grenzen natürlich wiederum in den vorhandenen experimentellen Möglichkeiten und im bisher erreichten Stand theoretischer und mathematischer Forschung. Schon hat sich die Zahl der ursprünglich vermuteten drei Quarks auf fünf erhöht. Ein sechstes steht bereits zur Diskussion. Neben den Quarks, so die Theoretiker, gibt es weitere »Fundamentarteilchen« in der Hadronenfamilie, nämlich jene, welche die zwischen den einzelnen Quarkpartikeln wirkenden Kräfte vermitteln sollen.

Und noch ein Umstand ist bei der Beantwortung der aufgeworfenen Frage zu beachten. Die Fortschritte in der Teilchenphysik der 70er Jahre, die das Quarkmodell favorisierten, wurden möglich, weil in vielen Ländern der Erde hochleistungsfähige Teilchenbeschleuniger den Betrieb aufgenommen hatten.

Als zu Beginn unseres Jahrhunderts die Physiker den inneren Aufbau des Atoms kennenlernten, standen ihnen als Arbeitsinstrumente Teilchenstrahlen von wenigen Millionen eV Energie zur Verfügung. Dieses »Skapell« war nicht scharf, nicht fein genug, um auch in das Innere der Kernbausteine einzudringen.

Als in den 50er Jahren Teilchenbeschleuniger für Protonen bis zu Energien von einigen Gigaelektronenvolt in Betrieb gingen, wurden die bereits genannten Hadronen in ihrer ungeheuren Vielfalt entdeckt. Das Studium der noch energiereicheren kosmischen Höhenstrahlung zeigte aber bereits in jenen Jahren, daß es in der materiellen Welt noch andere, exklusivere Teilchen gibt.

Den nächsten Erkenntnisfortschritt brachte 1967 der damals größte Protonenbeschleuniger der Welt in Serpuchow bei Moskau. Mit ihm standen Protonengeschosse von 76 GeV zur Verfügung.

Als Ende der 60er Jahre in Stanford (USA) ein fast 4 km langer Linearbeschleuniger für Elektronen in Betrieb genommen wurde,

*Aufnahme von
Wechselwirkungen
verschiedener Teilchen*



der diese kleinen Geschosse auf Energien von über 20 GeV beschleunigen konnte, war es den Forschern dann erstmals möglich, auch das Innere der Kernbausteine, der Protonen und Neutronen, zu durchleuchten. Jene Experimente deuteten bereits auf eine Substruktur, auf noch kleinere Bausteine im Innern der Protonen und Neutronen hin.

Dann folgte Mitte der 70er Jahre die Inbetriebnahme der gewaltigen Protonenfabriken des CERN bei Genf und in Batavia (USA). Dort werden in riesigen Anlagen, deren Beschleunigerringe einen Durchmesser von rund 2 km aufweisen, Protonen auf 400 GeV beschleunigt. Gleichzeitig entstanden Beschleuniger und sogenannte Speicherringe für Elektronen und Positronen hoher Energie. Mit diesen »Superkanonen« und einer inzwischen weiter perfektionierten entsprechenden Nachweisteknik für Partikelreaktionen konnten dann eindeutige Hinweise für die von den Quarks hervorgerufene Strukturierung der Hadronenfamilie gewonnen werden. Insbesondere wurde ein Quarkteilchen entdeckt, das überhaupt nur in höheren Energiebereichen existieren kann.

Doch die Natur kennt physikalische Vorgänge, die in noch weit-
aus höheren Energieniveaus ablaufen, als sie derzeit auf der Erde

experimentell nachzugestalten sind. Solche Prozesse gibt es beispielsweise im Sternenninnern, sie waren auch in der Frühphase kosmologischer Entwicklung bestimmend. Welche neuen Erkenntnisse sind aber noch zu erwarten, wenn es den Experimentatoren später einmal gelingt, mit noch gewaltigeren Anlagen den »energetischen Erkenntnishorizont« zu verlegen?

Superbeschleuniger für diese Aufgabe sind bereits projektiert und werden voraussichtlich Ende der 80er Jahre den Experimentatoren zur Verfügung stehen. In Serpuchow bei Moskau beispielsweise ist der Bau eines etwa 20 km langen Beschleunigerringes vorgesehen. In ihm sollen Protonen – die klassische Sonde des Elementarteilchenphysikers – auf Endenergien von 3000 GeV beschleunigt werden. Der umgebaute Beschleuniger von Batavia liefert seit 1985 eine Strahlenergie von 1000 GeV. Ähnliche Projekte wurden auch in den USA und von der westeuropäischen Kernforschungsgemeinschaft CERN in Angriff genommen, werden aber ebenfalls frühestens Ende der 80er Jahre einsatzbereit sein.

Dennoch, so kann zusammengefaßt werden, besteht in der Welt der Elementarteilchen, im Partikelzoo, heute bereits eine auch theoretisch fundierte, mustergültige Ordnung.

Allerdings gibt es einen »Außenseiter«, auf den seit Jahrzehnten die Physiker vergeblich Jagd machen. Es handelt sich um ein Teilchen, das über eine magnetische Ladung verfügen soll, ein sogenannter magnetischer Monopol. Bekanntlich kommt in allen Erscheinungen der Natur der Magnetismus immer in der Gemeinschaft eines Nord- und eines Südpols vor, d. h., die magnetische Kraft wirkt stets entlang geschlossener Feldlinien, die keinen Anfang und kein Ende haben.

Aus gewissen theoretischen Überlegungen und Berechnungen, ähnlich jenen, mit denen er bereits die Existenz der Antiteilchen herausgefunden hatte, zog Paul Dirac den Schluß, daß es in der Natur aber dennoch auch Teilchen mit einer magnetischen »Einzelladung« geben müsse. Doch selbst mit den ausgeklügeltsten Experimenten konnte kein Lebenszeichen dieses Teilchens in der Natur gefunden werden. Die Suche nach diesem Sonderling erinnert in ihren Schwierigkeiten vielfach an die Suche nach den Quarks, die ebenfalls bisher in keinem Experiment als einzelne Teilchen sichtbar gemacht werden konnten.

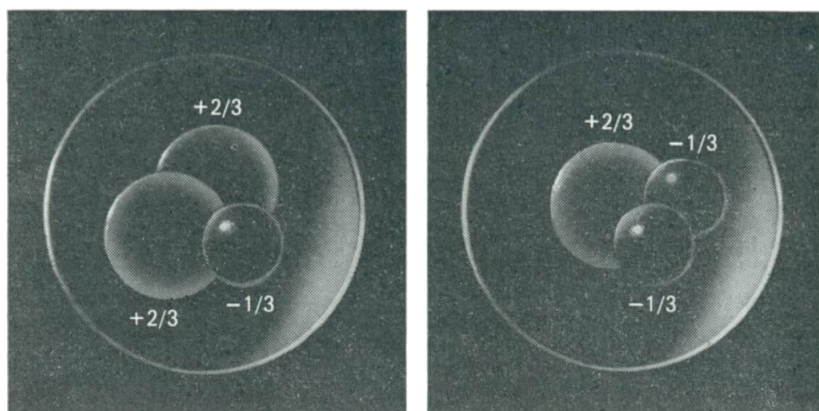
Quarks

Von welcher Seite man sich dem aktuellen Stand der Atom- und Kernphysik auch nähert, immer wieder stößt man auf die »Super-teilchen«, die Quarks. Es ist an der Zeit, sich ausführlicher mit diesen Partikeln zu beschäftigen, gleichsam als Zusammenfassung und Ergänzung des bisher Gesagten. Entdeckt wurden sie, wie bereits erwähnt, mit Papier und Bleistift – 1964 durch den amerikanischen Physiker Murray Gell-Mann.

Was mochte den Theoretiker bewogen haben, diese zunächst sehr kühn anmutende Hypothese zu formulieren? Vergleich man die physikalischen Eigenschaften jedes einzelnen Mitglieds der über 200köpfigen Hadronenfamilie, so ergaben sich gewisse Regelmäßigkeiten. Zunächst fiel die große Ähnlichkeit zwischen Proton und Neutron auf. Beide verfügen über den gleichen Spin ($1/2$), über die gleiche Baryonenzahl ($+1$) und über fast gleiche Massen. Nur in der elektrischen Ladung unterscheiden sie sich: das Neutron hat keine, während das Proton positiv geladen ist. Daß beide Teilchen an der starken Wechselwirkung teilnehmen, hatte den Physiker Werner Heisenberg schon frühzeitig veranlaßt, davon auszugehen, daß die starke Wechselwirkung in ihrer Natur unabhängig davon ist, ob bei einem Prozeß Neutronen durch Protonen ausgetauscht werden. Diese Eigenschaft – die natürlich nur bezüglich der starken Wechselwirkung gilt, schon wegen der unterschiedlichen elektrischen Ladung – erhielt die Bezeichnung Isospinsymmetrie.

Dieser Gedanke Heisenbergs erwies sich für ein verfeinertes Ordnungsschema innerhalb der Hadronenfamilie als wertvoll. So konnte man nämlich die Familie in verschiedene Gruppen einteilen, deren Mitglieder alle den gleichen Spin, die gleiche Baryonenzahl und fast die gleiche Masse, aber verschiedene elektrische Ladungen besitzen. Diese Gruppen erhielten die Bezeichnung Isospingruppe bzw. Isospinmultipllett. Neben Hadronen, die sich in solche Gruppen einordnen ließen, gab es in dieser Familie allerdings noch Partikeln, die offensichtlich als Einzelgänger ihr Dasein fristeten.

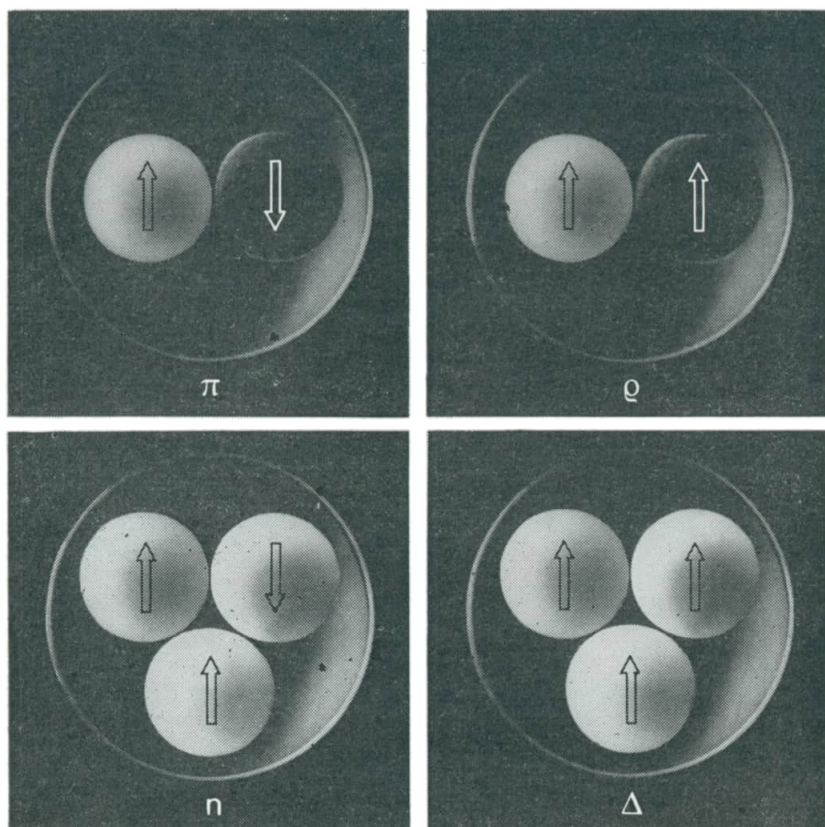
Die Existenz solcher Isospinmultiplets und der ihr zugrunde liegenden Symmetrie mußte physikalische Gründe haben. Eine Erklärung findet sich, wenn man davon ausgeht, daß die



*Aufbau des Protons (links) und Neutrons nach dem Quarkmodell.
Die Bruchzahlen bezeichnen die elektrische Ladung.*

Hadronen keine elementaren Objekte sind, sondern aus Fundamentalbausteinen zusammengesetzt sind. Gell-Mann berechnete nun, wie viele Grundbausteine mit welchen Eigenschaften vorkommen müßten, um jeweils ein stark wechselwirkendes Teilchen – entweder aus der Unterfamilie der Mesonen oder derjenigen der Baryonen – zu erhalten. Er ermittelte zunächst drei solcher Partikeln – denen er, wie bereits erwähnt, den Namen Quarks gab – und deren Antiteilchen. Freilich sollten seine Konstruktionen für einen Physiker fragwürdige Eigenschaften besitzen, beispielsweise elektrische Ladungen, die nur $\frac{1}{3}$ oder $\frac{2}{3}$ derjenigen des Elektrons ausmachen.

Frappierend einfach war aber nun der Bauplan für viele Hadronen: Mit nur zwei verschiedenen Quarks und ihren Antiteilchen lassen sich vier verschiedene Kombinationen von Quark-Antiquark-Pärchen erzeugen. Von den Mesonen war aber bekannt, daß sie häufig in Vierergruppen auftreten, so daß es nahelag, hier einen ursächlichen Zusammenhang zu sehen. Jede Mesonenvierergruppe entspricht einer solchen Quark-Antiquark-Kombination. Die Kurzlebigkeit der Mesonen erklärte sich elegant dadurch, daß das Quark-Antiquark-System naturgemäß innerhalb kürzester Zeit zerstrahlen mußte, weil Systeme aus Materie und Antimaterie keine Überlebenschance haben. Ähnlich gut ließen sich die anderen Mesonencharakteristika begründen – die elektrische Ladung, der Spin oder die Baryonenzahl. Mesonen – so die hypothetische Schlußfolgerung – entstehen kurzzeitig, wenn bei Teilchenreaktionen ein Quarkteilchen mit einem Quarkantiteilchen zusammentrifft.

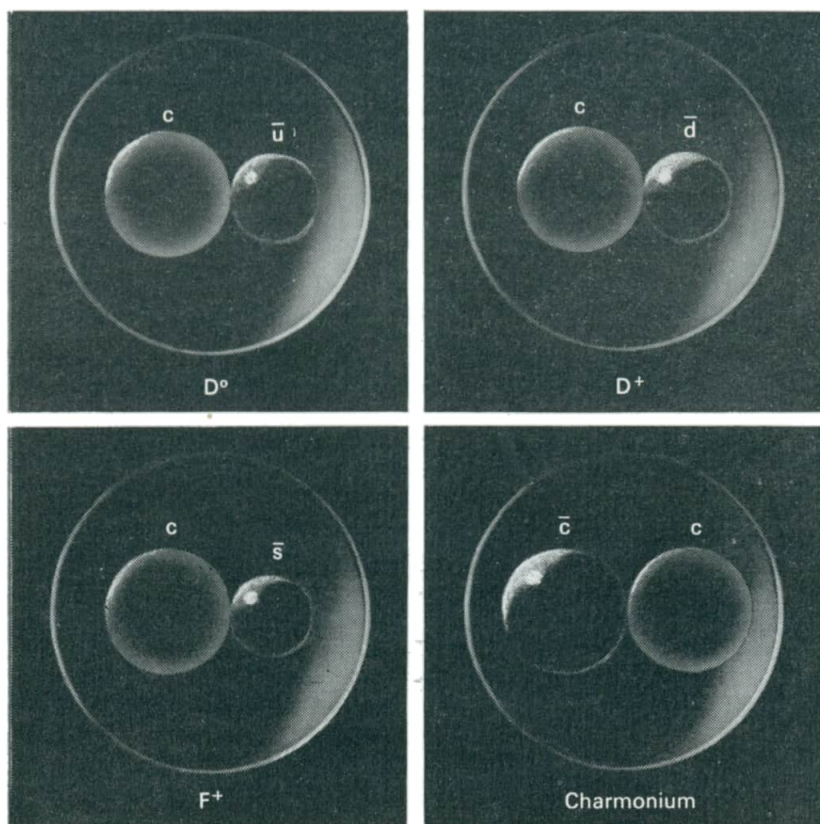


Mögliche Spinarrangements bei Mesonen und Baryonen

Ein ähnlich einfaches Schema ergab sich für die Strukturklärung der Baryonen, zu denen die Protonen und Neutronen zählen. Sie, so rechnete Gell-Mann vor, sollten aus jeweils drei dieser Grundpartikeln zusammengesetzt sein.

Aus diesem einfachen Bauplan ergibt sich wie von selbst eine weitere Regel in der Hadronenfamilie. Denn da die Quarks den Spin $\frac{1}{2}$ (je nach der Richtung plus oder minus $\frac{1}{2}$) haben und dieser beim Zusammenschluß von Partikeln addiert wird, können Mesonen nur den Spin 0 oder 1 haben, Baryonen hingegen stets einen von Null oder einer ganzen Zahl verschiedenen Spin.

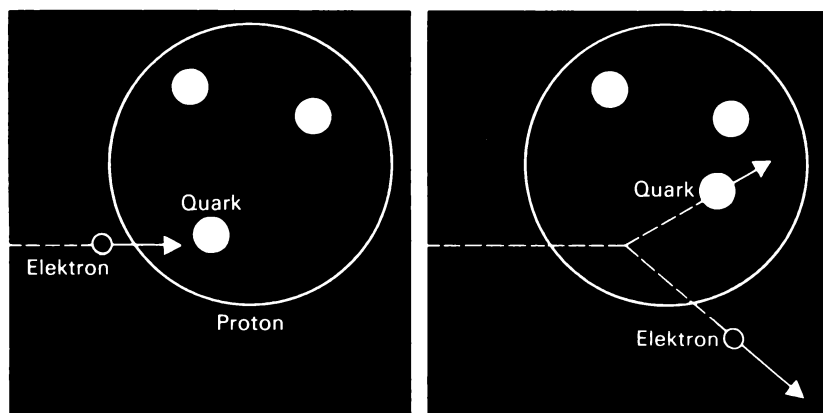
Ein Einwand gegen dieses Schema mußte nun lauten, daß die Kenntnis der Partikelmassen zu einem Widerspruch führt. Denn bekannt war beispielsweise, daß das sogenannte Rho-Meson etwa 600mal schwerer ist als das Pi-Meson, beide aber jeweils aus der



*Das Charmonium ist die Paarung Quark-Antiquark.
Mesonen, die durch das Charmschema vorhergesagt werden konnten*

gleichen Zahl von Quarkpartikeln bestehen sollten. Ähnliche Rechnungen ließen sich bei den Baryonen aufmachen. Und schließlich mußte nach den Berechnungen ein einzelnes Quark mehr Masse haben als ein Proton oder Neutron, welche ja aus drei solcher »Urbausteine« bestehen sollten.

Aber auch auf diese berechnete Frage waren rasch vernünftige Antworten gefunden. Bei der »Mesonensynthese« beispielsweise ist jene Konstellation energetisch am einfachsten, bei der die Spins der beiden Quarkpartikeln im Meson entgegengesetzt gerichtet sind. Um sie in gleiche Richtung zu orientieren, muß jedoch Arbeit geleistet, d. h. Energie zugeführt werden. Im Rho-Meson sind die beiden Spins des Quark-Antiquark-Systems in diesem Sinne ausgerichtet, im Pi-Meson sind sie entgegengesetzt orientiert. Die Massendiffe-



Sondierung im Innern eines Protons mit hochbeschleunigten Elektronen

renz zwischen dem Rho- und dem Pi-Meson ist nun nichts anderes als eben jene Energie, die für das Umlappen des Spins erforderlich war – entsprechend der Äquivalenz zwischen Masse und Energie ($E = m c^2$). Auch bei der »Synthese« von Hadronen aus Quarks löste man die diesbezüglichen Widersprüche, als man die Masse-Energie-Äquivalenz berücksichtigte.

Es gab dennoch viele Skeptiker, als diese Hypothese 1964 erstmals publiziert wurde. Da waren nicht nur die merkwürdigen Eigenschaften dieser Partikeln; viele weitere Rätsel der Hadronenfamilie konnten mit diesem Modell scheinbar nicht gelöst werden.

Doch eine Richtung war gewiesen, wie künftige Experimente zu gestalten sind. Wenn die Kernbausteine wiederum aus ganz konkreten Partikeln zusammengesetzt sind, müßten diese bei einer »Durchleuchtung« mit geeigneter Strahlung auch zu erkennen sein.

Mit Experimenten nach diesem Muster war bekanntlich im ersten Jahrzehnt unseres Jahrhunderts die Struktur der Atome (Kern und Hülle) aufgedeckt worden. Als »Sondenstrahl« freilich eigneten sich diesmal die damals eingesetzten Alphateilchen überhaupt nicht. Wenn überhaupt, konnten es nur extrem hochbeschleunigte Elektronen sein, wegen der im Vergleich zum Atom extremen Kleinheit der zu untersuchenden Fundamentalbausteine.

Solch ein Elektronenstrahl stand Ende der 60er Jahre nach Inbetriebnahme des Linearbeschleunigerzentrums in Stanford (USA) zur Verfügung. Auf der mehrere Kilometer langen »Rennstrecke« können dort Elektronen – wie gesagt – auf über 20 GeV beschleunigt werden. Mit dieser großen Durchschlagskraft konnten die

Geschosse tatsächlich in die Nukleonen eindringen. Ähnlich wie bei den Experimenten Rutherfords zur Atomstruktur, wies die Analyse der Streuwinkel der aus den Nukleonen wieder ausgetretenen Strahlungspartikeln auf vorhandene Subpartikeln hin. »Die Nukleonen bestehen nicht aus Gelee, sondern aus Himbeerkonfitüre mit Kernen«, war die ziemlich saloppe, aber dennoch plastische Schilderung durch sachkundige Wissenschaftler. Diese »Subnukleonen« wurden von dem amerikanischen Physiker Richard Feynmann auf den Namen »Partonen« getauft.

Auf eine andere Methode, um Nukleonen zu »durchleuchten«, hatte man sich im westeuropäischen Kernforschungszentrum CERN spezialisiert. Dort verwendete man seit Beginn der 70er Jahre die in diesem Buch schon ausführlich vorgestellten Neutrinos. Bei den Stoßprozessen in den Beschleunigern entstehen sie ja massenhaft. Um die Reaktionen der Neutrinos im Innern der Nukleonen nachweisen zu können, baute man beim CERN eine für damalige Begriffe riesige Blaskammer, Gargamelle genannt. Sie hatte eine Masse von 25 t und war mit 18 t flüssigem Freon (einer Kohlenstoff-Fluor-Brom-Verbindung) gefüllt. 1978 wurde das Gerät wegen technischer Defekte demontiert. Etwa 1973 lieferten diese Experimente erste klare Resultate über die tatsächliche Streuung von Neutrinos an den Konstituenten von Nukleonen, den Quarks. Seither wurden solche Experimente beim CERN vervollkommenet, entstanden insbesondere noch empfindlichere Nachweisgeräte, wie z. B. Szintillationsdetektoren von riesigem Ausmaß.

Bei der theoretischen Vervollkommenung der Quarktheorie stießen die Physiker Ende der 60er Jahre auf eine verblüffende Analogie: Gegenüber der Großfamilie der Hadronen waren die Leptonen (Elektron, Myon sowie die zugehörigen Neutrinos – das Tau-Lepton war noch nicht bekannt) klar überschaubar und schienen zudem wirklich elementar zu sein. Einiges deutete nun darauf hin, daß die Quarks zu dieser Familie der »schwachen Kraft« das Analogon in der Familie der »starken Kraft« sind.

Warum aber, so der berechtigte Einwand, sind bei den Leptonen dann vier, bei den Hadronen jedoch nur drei »Grundbausteine« vorhanden? Viel bestechender wäre es doch, wenn es auch vier Quarks gäbe! Und vielleicht gibt es sie wirklich, und sie hat nur noch niemand gesucht. Also ersann man Experimente, um Klarheit über diese Frage zu schaffen. Indirekt konnte bereits 1970 gezeigt werden, daß es dieses vierte Quark – charm oder nur c genannt – tatsächlich geben müsse, ein Beweis, der 1973 mit der Entdeckung

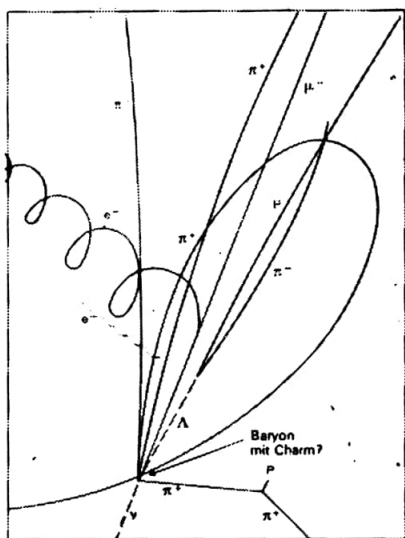
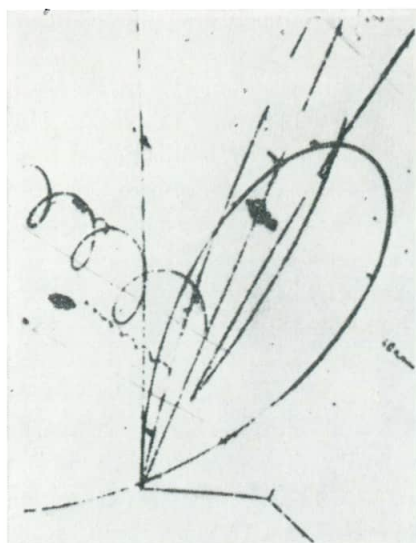
sogenannter neutraler Ströme und ihrer Wechselwirkung untermauert wurde.

Das bereits ausführlich geschilderte Auffinden des J/Psi-Teilchens in Stanford und Batavia im Jahre 1974 war der letzte eindeutige Beweis für ein viertes Quark. Bei dem J/Psi-Teilchen handelte es sich konkret um den Nachweis eines sogenannten Charmoniums, d. h. eines neuen Mesons, welches aus dem charm-Quark und dessen Antiteilchen zusammengesetzt ist. Unterdessen ist ein ganzes Spektrum solcher Charmoniumzustände, die alle zur Unterfamilie der Mesonen gehören, im Experiment erzeugt und nachgewiesen worden.

Natürlich kann das vierte Quark auch mit einem der drei »alten« Quarks Mesonen bilden. Bei der Vereinigung mit zwei von diesen drei – genau denen, die auch beim Aufbau der Nukleonen benötigt werden – entstehen Mesonen mit einer neuen, weiteren Quantenzahl, die ebenfalls »charm« genannt wird. Im Gegensatz zu diesen D-Mesonen werden die Partikeln, die aus der Kombination eines c-Quarks mit dem dritten »alten« Quark entstehen, F-Mesonen genannt. Und natürlich kann das charm-Quark zusammen mit seinen drei älteren Brüdern auch Baryonen, d. h. stabile Partikeln konstituieren. 1979 fanden Physiker den ersten direkten Hinweis, daß charm-Baryonen, die ebenfalls über eine Charmquantenzahl verfügen, tatsächlich existieren.

Aus anfänglich nur drei, sind also vier Quarks geworden. Doch mit diesem Zuwachs waren dennoch nicht alle Unstimmigkeiten der ansonsten immer bestechenderen Hypothese zu beseitigen. Ein strittiger Punkt war noch der, warum es – trotz der inzwischen vorhandenen Riesenbeschleuniger – noch immer nicht gelungen war, diese Teilchen im Ergebnis von Stoßprozessen aus den Nukleonen herauszubringen und nachzuweisen. Und warum, so war schließlich zu fragen, gab es in der Natur offenbar nur Hadronen, die entweder aus einem System Quark–Antiquark (Mesonen) bzw. aus 3-Quark-Systemen bestehen (Baryonen). Warum sollte es nicht Systeme aus zwei oder aber auch aus vier Quarks geben?

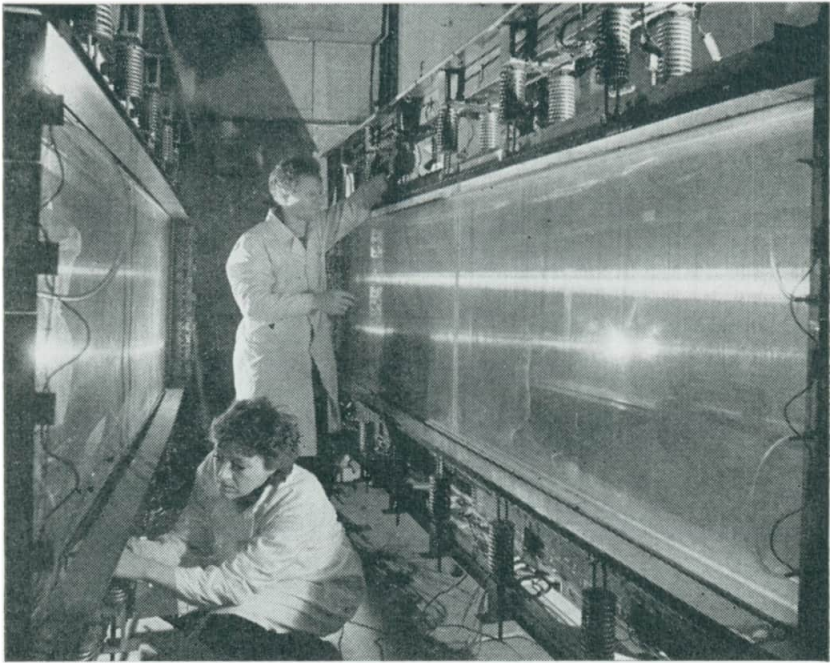
Wenden wir uns zunächst der zweiten Frage zu: Die ursprüngliche Quarktheorie ermöglichte hierauf auch in ihrer erweiterten »Vierergestalt« keine Antwort. Eine Lösung wurde erst nach 1970 gefunden. Die Quarks, so mußte schließlich vermutet werden, verfügen über eine weitere Quantenzahl. Da es für sie in der klassischen Physik kein anschauliches Analogon gibt, wurde sie als »Farbe« bezeichnet. Jedes Quarkteilchen kann nach dieser neuen theoretischen



Spurenkammeraufnahme und ihre Interpretation: Das auslösende Ereignis ist der Zusammenstoß eines Neutrinos mit einem Proton. Dabei entstand offenbar ein Baryon mit Charm (unten links). Das Neutrino ist auf dem Foto nicht sichtbar, weil es keine Ladung hat und somit in der Wasserstoffkammer entlang seiner Bahn keine Atome ionisieren konnte. Das Charmteilchen zerfällt praktisch sofort nach seiner Erzeugung. Dabei entsteht neben einer Reihe elektrisch geladener Partikeln ein neutrales und somit ebenfalls in der Blasen-kammer unsichtbares Lambda-Teilchen, das nach kurzer Flugzeit dann aber in geladene und somit sichtbare Bausteine zerfällt.

Einsicht in drei verschiedenen Formen existieren, gekennzeichnet durch eine jeweils unterschiedliche »Farbquantenzahl«. Jedes Quark gibt es also in einer roten, grünen und blauen Variante, also mit einer »Farbladung«. So bezeichneten die wortschöpfenden Physiker die drei neuen Quantenzahlen, die mit wirklichen Farben natürlich nicht das geringste zu tun haben. Aufgrund dieser Erweiterung konnten die Theoretiker zeigen, daß es auf ganz bestimmte Auswahlregeln hinsichtlich der Farbe ankommt, damit noch offene Widersprüche in der Hadronenwelt beseitigt werden können. Diese »mikrokosmische Farbenlehre« soll nun dargelegt werden.

Zieht man an dieser Stelle eine kurze Zwischenbilanz, so ist festzustellen, daß die Zahl möglicher Quarks, sogenannter »Fundamentarteilchen«, von anfänglich drei auf bereits wenigstens zwölf angestiegen ist. Grund also, sich ein Schema auszudenken, um bei weiterem Zuwachs nicht erneut den Überblick zu verlieren.



Vorbereitung zum Positronennachweis an einer Driftkammer

Jedes Quarkteilchen läßt sich aus der Angabe seiner zwei wichtigsten, »arttypischen« Quantenzahlen bestimmen. Interessanterweise ist hierbei die – historisch gesehen – zuletzt gefundene Farbquantenzahl primär, d. h. die »Farbladung« Rot, Grün oder Blau. Entsprechend der Farbe wird ein einzuordnendes Quark im Index dann mit den Ziffern 1 bis 3 gekennzeichnet. Der zweite Index bezeichnet die »Art« des Quarks, beispielsweise, ob es sich um ein charm-Quark handelt.

Die beiden zuerst bekannten Quarks hatten die Namen »up« (deutsch »auf«) und »down« (unten) erhalten. Aus diesen Partikeln bzw. ihren Antiteilchen sind beispielsweise die Nukleonen aufgebaut. Ein Proton verfügt über die Struktur up, up, down; ein Neutron hingegen up, down, down. Das dritte Quark hatte den Namen »strange« (seltsam) erhalten, die mit seiner Existenz verknüpfte entsprechende Quantenzahl in zusammengesetzten Teilchen den Namen »strengeness« (Seltsamkeit). Alle diese vier Namen faßte man nun unter dem Begriff »flavours« (Geschmack) zusammen und versah sie mit den Ziffern eins bis vier, die einem jeweiligen Quark nun als

zweiter Index hinzugefügt werden. Ein »rotes up-Teilchen« erscheint in der so gegebenen Systematik als q_{11} ; ein »blaues charme-Quark« hingegen als q_{34} (siehe Tabelle).

Wichtig ist nun, daß nach dem Erkenntnisstand zu Beginn der 80er Jahre der erste Index nur die Ziffern 1 bis 3 aufweisen kann, d. h., nur diese drei Farben sind überhaupt möglich. Der zweite Index, d. h. die Quarkart, oder – um im Bilde der Namensgeber zu bleiben – die Anzahl der Geschmacksrichtungen, kann durchaus auch größer als vier sein. So wurde unterdessen bereits ein weiteres »Geschmacksteilchen«, das sogenannte bottom-Quark (unterst-Quark) entdeckt. Mitunter wird das b-Quark auch beauty (Schönheit) genannt.

Wie soll diese komplizierte »Farbenlehre« aber auf jene Partikeln angewandt werden, die zuvor mit der noch nicht vollständig ausgearbeiteten Theorie bereits so elegant und schön beschrieben werden konnten? Mesonen sind nach der verfeinerten Theorie nicht einfach mehr nur Systeme aus Quark- und Antiquarkteilchen, sondern Überlagerungen (sogenannte Superpositionen) dreier solcher Systeme, nämlich eines roten, grünen und blauen. Die »eherne« Farbenregel besagt nun, daß keine der drei Farben vor einer anderen ausgezeichnet ist. Das heißt, bei allen möglichen Konfigurationen müssen die »Fundamentalbausteine« so vertreten sein, daß in den jeweiligen Hadronen alle Farben in gleicher Anzahl vertreten sind, d. h., daß das entstandene Teilchen selbst »ohne Farbe« erscheint. Der Hochenergiephysiker spricht in diesem Zusammenhang von der Eigenschaft, daß Hadronen stets Farbsingulets sind.

Anschaulich läßt sich das so ausdrücken: Quarks können nur so

Tabelle: Ordnungsschema für Quark-Teilchen

»Farbladung«	»Geschmack«					
	up	down	strange	charm	bottom (beauty)	top (truth)
Rot	q_{11}	q_{12}	q_{13}	q_{14}	q_{15}	q_{16}
Grün	q_{21}	q_{22}	q_{23}	q_{24}	q_{25}	q_{26}
Blau	q_{31}	q_{32}	q_{33}	q_{34}	q_{35}	q_{36}

Beispiel: q_{24} ist ein »grünes« charm-Quark

miteinander kombiniert werden, daß in der Summe Weiß (bzw. farblos) entsteht. Oder anders ausgedrückt: Eine aus Quarks zusammengesetzte Partikel kann selbst nie über die Eigenschaft der Farbe verfügen. Mit dieser Regel ist die vorhin aufgestellte Frage beantwortet: Zwei -bzw. Vierquarksysteme kann es nicht geben, weil sonst eine Farbe vor den anderen beiden ausgezeichnet wäre; denn jeweils eine Farbe wäre notwendigerweise entweder doppelt oder gar nicht vertreten.

Daß diese »Farbenlehre« mehr ist als nur ein akademisches Spiel, sei ausdrücklich vermerkt. In verschiedenen Experimenten konnten nämlich seit 1971 hierfür aufschlußreiche, beweiskräftige Daten vorgelegt werden. So stand man bei exakten Messungen des Zerfalls von Pi-Mesonen lange vor einem Rätsel. Dieses Teilchen lebte nur ein Neuntel der Zeit, die von der Theorie her zu erwarten wäre, nämlich 0,083 statt 0,75 milliardstel (10^{-15}) Sekunden. Nahm man jedoch die Existenz der drei Farbquarks zu Hilfe, so ergab die Theorie exakt den errechneten Wert. Es zeigte sich nämlich, daß das neutrale Pi-Meson um so schneller zerfällt, je mehr Farben in ihm existieren. Weitere Beweise dieser Art wurden seit 1972 bei Experimenten mit Hilfe von Elektron-Positron-Speicherringen geliefert.

Wenden wir uns nun der anderen Frage zu: Warum konnte es bisher trotz intensiver Bemühungen nicht gelingen, ein Quark aus einem Hadronenverband »herauszuschießen« und im Experiment nachzuweisen? Dieses ist viele Jahre lang in verschiedenen Forschungszentren versucht worden. Die schon beschriebenen Beugungsexperimente mit Elektronen und Neutrinos konnten lediglich im Innern der Nukleonen das Vorhandensein von drei »Punkten« ausmachen. Diese »Punkte« herauszuholen erwies sich indessen als unmöglich.

Die Verfeinerung der Theorie Ende der 70er Jahre verdichtete jedoch die Vermutung, daß es möglicherweise aus prinzipiellen Gründen unmöglich sei, Quarks isoliert, als einzelnes Partikel darzustellen. Zu solchen Vermutungen bot das Studium der zwischen diesen Partikeln wirkenden Kräfte Anlaß.

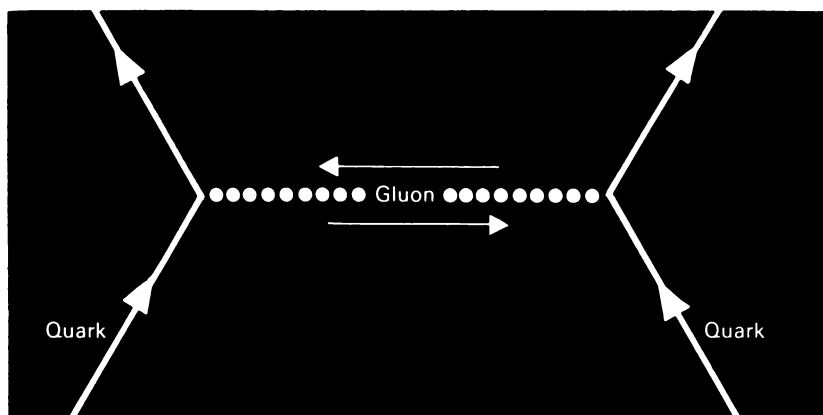
In unmittelbarer, gegenseitiger Nähe sind Quarks nach den neueren Vorstellungen der Physiker in ihrer Bewegungsfreiheit zunächst kaum beschränkt. Werden sie aber voneinander entfernt, verhalten sie sich, als ob sie mit einem festen Band versehen sind. Denn im Gegensatz beispielsweise zur Gravitationskraft, welche mit zunehmendem Abstand zwischen den beiden Massen in rasch wach-

sendem Maße geringer wird, bleibt die Bindungskraft zwischen sich entfernenden Quarks immer gleich. Mit anderen Worten: Den Quarks muß für jeden Bruchteil eines milliardstel Zentimeters, den sie sich voneinander entfernen, ständig enorme Energie zugeführt werden. Bei einem Meson – also einem Quark-Antiquark-Paar – reicht die dabei in diese Bindung von außen (z. B. aus einem Teilchenbeschleuniger) zufließende Energie bald aus, um ein neues Quark-Antiquark-Paar entstehen zu lassen. Dieses vereinigt sich wiederum mit dem alten, »gedehnten« Paar zu zwei neuen, voneinander fortfliegenden Mesonen. Jeder Versuch der Quarkisolation wird von der Natur also mit der Synthese neuer Hadronen aus der zugeführten Energie beantwortet.

Solche Vorgänge konnten in der Tat bereits sichtbar gemacht werden. Schießt man Elektronen und Positronen bei genügend hohen Energien aufeinander, so vernichten (annihilieren) sie sich auf besondere Weise. Für einen minimalen Zeitraum »driften« die Quarks auseinander. Dann plötzlich erfolgt ein Umschlag, und es entstehen entlang der Impulsrichtung der Quarks mehrere Hadronenstrahlen, sogenannte Jets, die in entsprechenden Nachweiskammern sichtbar werden.

Bisher war von Mesonen die Rede. Welche Chancen ergeben sich, aus einem Baryon, beispielsweise einem Proton, ein Quark herauszuschießen? Wird beispielsweise ein hochbeschleunigtes Elektron an einem Quark gestreut, so überträgt es einen beachtlichen Teil seiner Energie auf diese Subpartikeln. Dabei, so zeigen Berechnungen, kann ein Quark aus dem Verband »ausreißen«. Doch auch hier ergibt sich das gleiche Bild: Das herausgeschleuderte Quark erzeugt innerhalb einer winzigen Zeitspanne wieder einen Jet hadronischer Teilchen. Solche Jets konnten bisher allerdings noch nicht direkt beobachtet werden. Nur indirekte Nachweise sprechen dafür. Um solche Jets zu sehen, benötigt man Strahlenenergien (Elektronen, Myonen oder Neutrinos) von einigen 100 GeV. Mit dem Bau einer entsprechenden Anlagen, mit deren Hilfe Elektronen und Protonen sehr hoher Energie aneinander gestreut werden können, ist am Deutschen Elektronensynchrotron (DESY) in Hamburg (BRD) bereits begonnen worden. Vor 1988 ist allerdings mit der Inbetriebnahme nicht zu rechnen.

Noch eine andere Frage vermag gegenwärtig kein Physiker mit Sicherheit zu beantworten. Wieviel Quarks gibt es eigentlich? Oder, genauer gefragt, wieviel unterschiedliche »flavours«, d. h., wieviel unterschiedliche »Geschmacksrichtungen« gibt es? Denn,



*Wechselwirkung zweier Quarks, die über ein Gluon vermittelt wird.
Dabei wechselt das Quark die Farbe.*

so wurde ja bereits erwähnt, das Phänomen der drei Farben oder Farbladungen ist jedem Quark eigen, egal, ob es den »Geschmack« up, down, strange oder charm hat. Ein fünftes Quark, das bottom (oder beauty)-Teilchen, wurde 1977 gesichtet. Am 400-GeV-Beschleuniger von Batavia fand man bei Zerfallsprozessen ein neues Teilchen der riesigen Masse von 9,5 GeV, was etwa dem Zehnfachen der Protonmasse entspricht. Die Berechnungen zeigten, daß es sich bei diesem Teilchen um den Bindungszustand eines sehr schweren, bis dahin unbekannten Quarks mit seinem Antiteilchen handeln mußte.

Klarheit brachte auch hier die umgekehrte Reaktion, die Zerstrahlung hochenergetischer Elektronen und Positronen mit anschließender Erzeugung von Mesonen. Trotz der enormen Schwierigkeiten gelang 1978 am DESY in Hamburg, im Energiebereich bei 9,5 GeV, die Produktion solcher Mesonen, die den Namen Y-Teilchen erhielten. Indirekt war damit auch die Existenz der b-Quarks untermauert.

Doch die Zahl von fünf Quarks, soviel ist nach dem bisher Gesagten klar, kann die theoretischen Physiker nicht befriedigen. Sie liebäugeln ja mit dem Vergleich Leptonen – Quarks als in ihrer Wertigkeit und Struktur gleichen Gruppen. Leptonen aber gibt es sechs! Grund genug also – last not least – auch an die Existenz eines sechsten Quarks zu glauben. Einen Namen besitzt es schon – nämlich top-Quark, was soviel wie Spitzen-Quark heißt. Mitunter ist für das t-Quark auch die Bezeichnung truth (Wahrheit) im

Gebrauch. Bisher hat man in Experimenten aber noch keine Hinweise auf die Anwesenheit dieses Teilchens in der Natur gefunden.

Will man sie nachweisen, soviel Gewißheit herrscht aber bereits, muß man die Energieleiter noch weiter hinaufsteigen und könnte bei einer t-Quark-Masse von mehr als 18 GeV möglicherweise Erfolg haben.

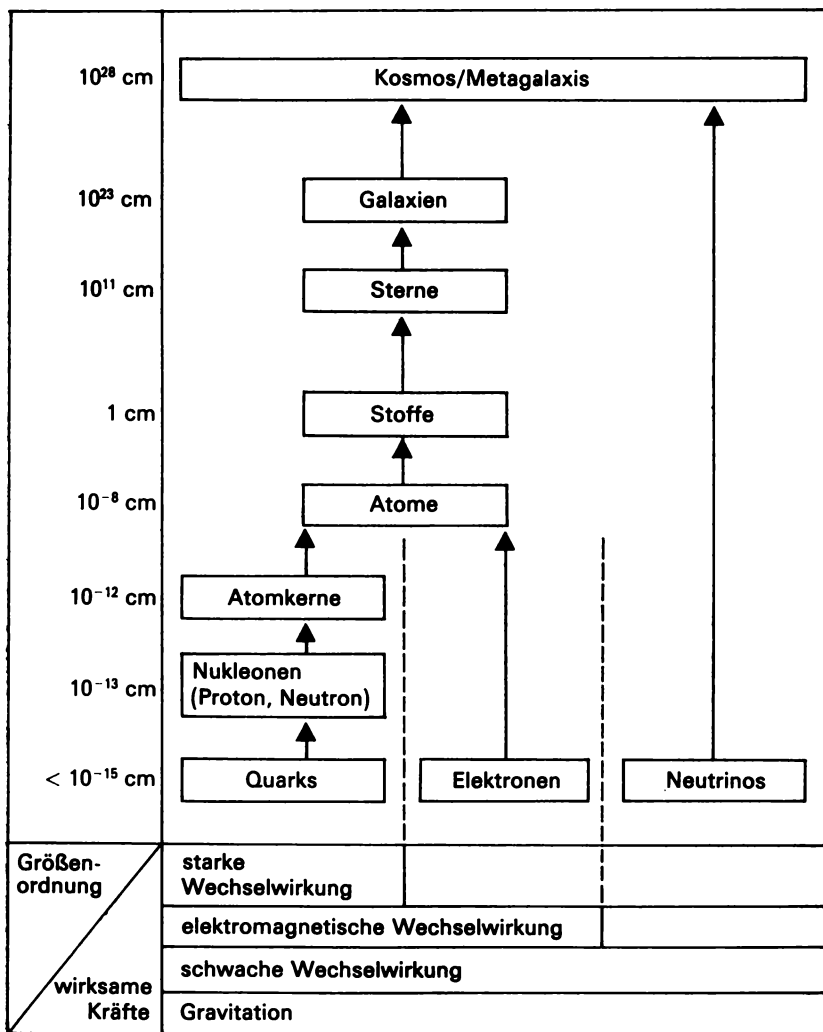
Wie man sieht, zeigt das anfänglich so einfache Quarkschema immer mehr seine Tücken. Aber es kommt noch verwickelter: Ergebnisse aus dem Jahre 1980 lassen keinen Zweifel mehr daran, daß die »mikroskopische Farbenlehre«, wie sie bereits behandelt wurde, im Prinzip geradezu unendliche Variationsmöglichkeiten zuläßt. So können zunächst einmal Quarks ihren »Geschmack« ändern. Aus einem U-Quark wird unter der Hand ein s-Quark, wenn auch nur mit 5% Wahrscheinlichkeit. Warum das so ist, bleibt im Rahmen der bisher vorliegenden Theorie unklar. Aber nur mit dieser Zusatzhypothese kann beispielsweise derzeit die extreme Kurzlebigkeit einiger Strangeness-Teilchen erklärt werden.

Und noch eine überraschende Frage werfen Experimente der letzten Jahre auf. Mit der Entdeckung der masse- bzw. energiereichen Quarks zeigte sich nämlich, daß diese Teilchen der starken Wechselwirkung mit zunehmender Energie für die schwache Wechselwirkung »anfällig« werden, ja, daß es möglicherweise einen energetischen Schwellwert gibt, wo die schwache Kraft dominierend wird. Gibt es vielleicht Gesichtspunkte, um beide Kräftearten mit nur einer Theorie einheitlich zusammenfassen zu können?

Bevor wir uns dieser Frage zuwenden, soll der Versuch unternommen sein, daß bisher Gesagte kurz zusammenzufassen:

Im Elementarteilchenzoo existieren zwei große Familien: Den sechs Leptonen (Elektron, Myon, Tauon sowie den drei entsprechenden Neutrinos) stehen die sechs Quarks gegenüber (up, down, strange, charm, bottom, top). Sie sind die elementaren Teilchen in der Welt der schwachen und starken Wechselwirkung (bis auf Widerruf, versteht sich).

Jedes dieser sechs Quarks gibt es in drei »Farben« – Rot, Grün und Blau. Die Quarks sind die Grundbausteine für die Familie der Hadronen. Jeweils ein Quark und Antiquark bilden ein instabiles Meson. Da immer zwei Quarks in Verwandtschaft stehen und untereinander kombinieren können, existieren folglich Mesonen häufig in Vierergruppen. Die Farbenregel besagt, daß Quarks und Antiquarks entweder ihre »Farbe« kompensieren müssen (Mesonen) oder daß stets drei verschiedenfarbige Quarks sich zu »Weiß« (Farblosigkeit)



»Bauplan« der Welt und Wirkungsbereich der Kräftearten

addieren müssen. Mesonen oder Baryonen mit »Farbe« kann es nicht geben, sie sind sogenannte Farbsingulets.

Quarks haben den Spin $1/2$ wie die Leptonen auch. Nach den genannten Kombinationsregeln folgt daraus für Hadronen im Grundzustand, daß Mesonen nur den Spin 0 oder 1 besitzen können, Baryonen hingegen den Spin $1/2$ oder $3/2$.

Die Vielzahl der Baryonen erklärt sich durch den »Geschmack« der Quarks, d. h. durch die Anzahl von sechs verschiedenen Parti-

keln in je drei »Farbvarianten«, die miteinander kombiniert werden können. Hinzu kommen Partikeln, die aus prozentualen Mischungen verschiedener Quarkarten bestehen.

Am häufigsten in der irdischen Materie kommen die zwei leichtesten vor – up-Quark und down-Quark. Nur sie sind an der Synthese von Protonen und Neutronen, den Bausteinen der Atomkerne, beteiligt.

Die »große Vereinigung« der Naturkräfte

Quarks und Leptonen – darauf wurde im vorangegangenen Kapitel bereits verwiesen – sind von ihrer Bedeutung her ähnliche Teilchen. Sind sie vielleicht sogar miteinander verwandt, obgleich sie eigentlich nur in getrennten »Welten« agieren, nämlich in denen der starken bzw. schwachen Wechselwirkung? Gibt es vielleicht eine Theorie, die beide Spezialitäten der Materie einheitlich beschreibt, sozusagen als Varianten einer Supertheorie, die das Wirken eines bislang noch verschlüsselten, fundamentalen Naturgesetzes darstellt? Für den Bereich der elektromagnetischen und der schwachen Wechselwirkung konnte ein solcher »höherer« Zusammenhang tatsächlich bereits gefunden werden, wie in der Einleitung zu diesem Buch schon kurz ausgeführt wurde.

Man kann konsequenterweise aber noch weitergehen und fragen, ob nicht überhaupt alle vier bekannten Kräftearten, also auch die Gravitation, vom Standpunkt einer einheitlichen Theorie her verstanden werden können. Oder anders formuliert: Sind die vier bekannten Kräfte in Wirklichkeit nicht nur Erscheinungsformen ein und desselben universalen Zusammenhangs der Natur, der sich unter jeweils konkreten physikalischen Bedingungen in dieser oder jener Gestalt äußert?

Diese Frage hat mehr als nur akademisches Interesse. Um ihren Gehalt möglichst anschaulich darzulegen, erweist es sich wiederum als sehr nützlich, einen kleinen Ausflug in die Physikgeschichte des vorangegangenen Jahrhunderts zu unternehmen, als es gelang, die Erscheinungen der Elektrizität und des Magnetismus in ihrem engen Zusammenhang zu erkennen und mit Hilfe nur einer Theorie in ihrem realen Wirken zu beschreiben.

In der ersten Hälfte des vorigen Jahrhunderts gab es drei Phänomene, die den Physikern zwar gut bekannt waren, deren ursächlichen Zusammenhang aber lange Zeit niemand für möglich hielt.

Da war die Erscheinung der Elektrizität, wie man sie beispielsweise beim Reiben eines Glasstabes mit einem Wolltuch erzeugen kann. Das auffälligste an diesem Phänomen war, daß sich gleiche Ladungen infolge einer elektrischen Kraft abstießen, ungleiche Ladungen hingegen gegenseitig anzogen.

Zweitens waren die magnetischen Effekte bekannt, z. B. die Tatsache, daß sich eine Kompaßnadel in Nord-Süd-Richtung ausrichtet. Auch hier konnten mit Leichtigkeit zwischen den Magnetpolen wirkende Kräfte vorgeführt werden. Im Unterschied zur Elektrizität traten aber beim Magnetismus die Gegenpole – das heißt Nord und Süd – stets zusammen auf.

Das dritte Phänomen schließlich war das Licht, dessen Ausbreitungsgesetze sehr gut erforscht waren und zum Bau leistungsfähiger astronomischer Geräte, von Mikroskopen und anderen Instrumenten genutzt wurden.

Daß zwischen Magnetismus und Elektrizität ein Zusammenhang bestehen müsse, fand als erster der dänische Physiker Hans Christian Oersted heraus. So entdeckte er bei Laborexperimenten zufällig, daß sich der Ausschlag einer Kompaßnadel ändert, wenn sie in die Nähe stromführender elektrischer Leitungen gelangt. Gewissermaßen auf die Umkehrung dieses Effektes stieß elf Jahre später der englische Physiker Michael Faraday. Bewegte er nämlich einen Magneten mit ziemlicher Geschwindigkeit in der Nähe eines Drahtes, so begann in ihm ein elektrischer Strom zu fließen. Diese Entdeckung wurde übrigens zur physikalischen Grundlage des Dynamoprinzips, nach dem in allen industriellen Kraftwerken der Welt auch heute noch Elektroenergie erzeugt wird.

Der eigentliche Fortschritt, der für die Physik von Faraday ausging, war aber viel tiefergehend. Bis dahin schien es den Physikern nämlich klar zu sein, daß jede Kraft stets von ihrer Quelle aus über die Distanz von Kraftquelle zum jeweiligen Ort der »Arbeit« wirkt. So wurde beispielsweise jahrzehntelang stillschweigend vorausgesetzt, daß die von der Sonne ausgehende Anziehungskraft auf die Erde nur eine Eigenschaft der Sonne sei und lediglich von der Entfernung Sonne-Erde und den Massen beider Himmelskörper abhängt. Der Raum zwischen Kraftzentrum und Kraftwirkung war nach diesen Vorstellungen völlig belanglos.

Als man die Kraftwirkungen zwischen elektrischen Ladungen entdeckte, übernahm man dieses Bild einer »Fernwirkung« zunächst widerspruchsfrei und kam zu einem ähnlich gebauten Gesetz zur Berechnung der zwischen elektrischen Ladungen wirkenden Kräfte.

Doch die experimentelle Situation war dennoch anders. Hatte man nämlich in einem Labor eine elektrische Ladung, beispielsweise eine Metallkugel, deponiert, so konnte man auch an jedem beliebigen Punkt des Labors deren Wirkung nachweisen. In der Mechanik war das so nicht ausführbar. Denn der Raum zwischen Erde und Sonne

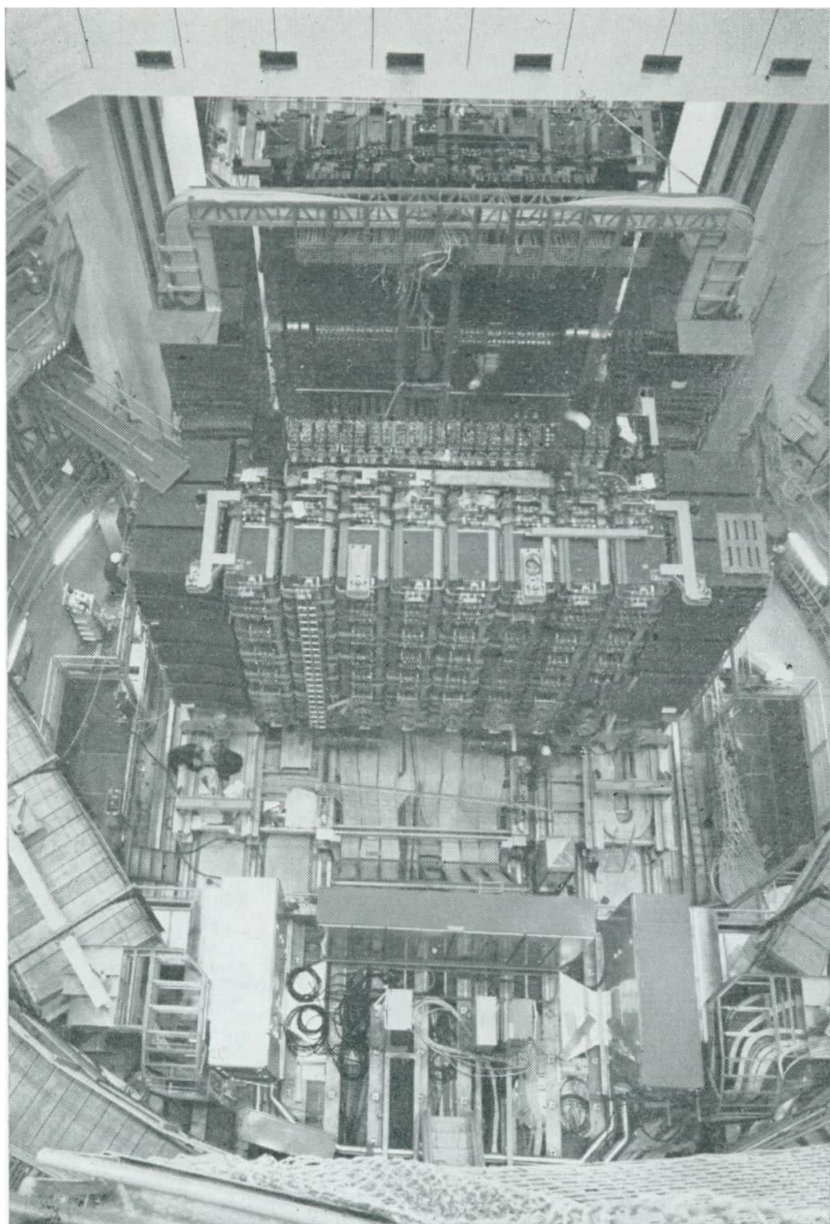
blieb in jener Zeit noch tabu, Raketen und Raumfahrt gab es noch nicht, und für Laborexperimente zwischen beliebig schweren Massen blieb andererseits die Gravitationskraft unmeßbar klein. Die neue Meßverfahren veranlaßte Faraday zu einer völlig anderen Vorstellung, zu einer neuen Denkweise über das Wirkprinzip der Kräfte. Er ging davon aus, daß die gemessenen elektrischen Kräfte das Ergebnis eines Feldes sind, d. h. sogenannter Kraftlinien, die von der Quelle aus auf gesetzmäßige Weise den Raum durchdringen. Jeder andere elektrische Körper, der nun in diesen Raum hineinkommt, reagiert nicht per Distanz mit der Quelle, sondern unmittelbar mit der entsprechenden Kraftlinie am Ort seiner Anwesenheit. Aus der Fernwirkungstheorie wurde somit eine Nahwirkungstheorie, die Theorie des Feldes.

Sehr bald ging Faraday in seinem Denken einen Schritt weiter. Eigentlich, so überlegte er, sollte es auch Felder geben, die elektrische und magnetische Eigenschaften gleichermaßen vermitteln. Seine kühnste, wenn auch von ihm nicht beweisbare Hypothese lautete nun, das Licht sei solch ein »elektromagnetisches« Feldphänomen.

Daß dies tatsächlich der Fall ist, demonstrierte 1861 der schottische Physiker James Clerk Maxwell. Er entwickelte ein Gleichungssystem, in dem die Größen für die magnetischen und elektrischen Feldstärken wie siamesische Zwillinge zusammengehören. Diese Maxwellschen Gleichungen – das kennzeichnet die Qualität ihres Entdeckers – haben in ihrer Gültigkeit auch die beiden revolutionierenden Einschnitte der Physik unseres Jahrhunderts überdauert – die Relativitäts- und die Quantentheorie.

In unserem Jahrhundert fanden die Physiker nämlich heraus, daß Licht nicht nur als eine elektromagnetische Welle, sondern zugleich auch als Teilchenstrahlung zu interpretieren ist. Diese »Lichtpartikeln« muß man sich als energetische »Portionen« vorstellen, mit denen die physikalische Wirkung eines Lichtstrahles vermittelt wird. Für sie wurde der Name »Photonen« gefunden. In der heutigen Sprache der elektromagnetischen Feldtheorie ausgedrückt, beschreiben die Maxwellschen Gleichungen nichts weiter als die Ausbreitung der Photonen im Raum. Eine Abstoßung und Anziehung zwischen elektrisch geladenen Körpern kommt nun dadurch zustande, daß zwischen ihnen ständig Photonen hin- und hergeschleudert werden.

Auch für den Bereich der Gravitationskräfte ging man angesichts der Erfolge auf dem Gebiete des Elektromagnetismus rasch zur Denkweise einer Feldtheorie über. Als Quantenteilchen des Gravita-



*Blick auf den Teilchendetektor UA 1 des CERN,
mit dem 1983 der experimentelle Nachweis
der W- und Z-Bosonen gelang.*

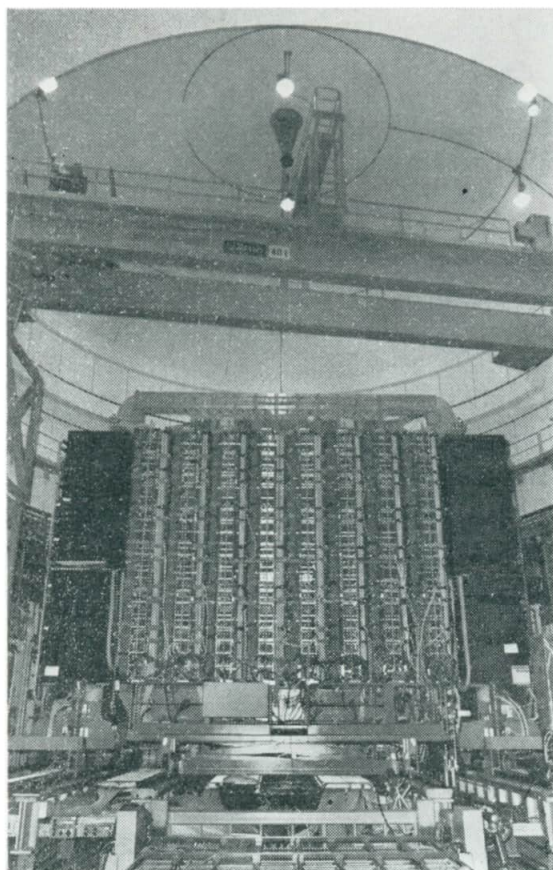
tionsfeldes nimmt man sogenannte Gravitonen an. Wegen der extremen Schwäche dieser Kraft bleibt der experimentelle Existenzbeweis solcher Partikeln aber bis auf weiteres im Bereich des Unmöglichen.

Doch zurück zu unserem Partikelzoo: Es erscheint nach dem bisher Gesagten geradezu als selbstverständlich, daß für die Wirkung von starker und schwacher Wechselwirkung ebenfalls das Konzept des Feldes zugrunde gelegt wurde.

Auch die schwache Wechselwirkung läßt sich durch den Austausch von Feldquanten, d. h. von Teilchen, erklären. Die Aufgabe, die beim Elektromagnetismus das Photon ausführt, müssen bei den schwachen Kraftfeldern aber gleich drei Partikeln übernehmen, sogenannte intermediäre Vektorbosonen. Sie wurden auf die Namen W-Teilchen (in elektrisch positiver und negativer Ausführung) und Z-Teilchen (elektrisch neutral) getauft. Wenn es ein solches Z-Teilchen gibt, errechneten die Theoretiker, müsse es auch einen bis dahin noch nicht entdeckten Reaktionstyp geben. Sie wurde 1973 bei Experimenten beim CERN auch wirklich gefunden. Diese Vektorbosonen sind etwa einhundertmal schwerer als Protonen und waren deshalb lange Zeit experimentell nicht darstellbar.

In den 60er Jahren wurden für diesen Sachverhalt bereits entsprechende theoretische Modelle durchgerechnet. Dabei wurde ermittelt, daß zwischen dem Z-Boson und dem Photon eine enge Verwandtschaft besteht, ja daß keines ohne das andere existieren kann. In dieser mathematisch sehr anspruchsvollen Theorie sind Elektromagnetismus und schwache Wechselwirkung zwei Seiten nur einer fundamentalen Erscheinung, »elektroschwache Kraft« genannt. Nachdem 1977 eindeutige experimentelle Befunde vorlagen, welche mehrere Konsequenzen dieser neuen Theorie belegten, erhielten Sheldon Glashow, Abdus Salam und Steven Weinberg dafür 1979 den Nobelpreis für Physik. 1983 gelang es dann unter Leitung von Carlo Rubbia am CERN, diese drei Teilchen, die W- und Z-Bosonen, experimentell zu erzeugen, wovon im einzelnen noch zu berichten sein wird.

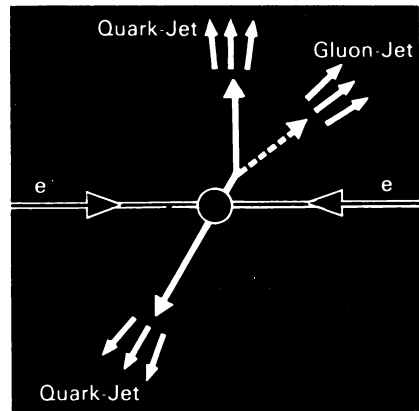
Warum aber soll nun die starke Wechselwirkung eine Ausnahmestellung besitzen? Diese Frage provoziert geradezu die Absicht, nun auch die »große Vereinigung« der Naturkräfte anzustreben, d. h., auf dem eingeschlagenen Wege fortzuschreiten und auch die starke Wechselwirkung unter die Haube einer noch allgemeiner gefaßten Theorie zu bekommen, die das gemeinsame Wesen aller drei (oder gar vier) Spezies bloßlegt und befriedigend beschreibt.



*Vorderansicht des
Teilchendetektors UA 1*

Photonen, so wurde festgestellt, vermitteln die Kräfte zwischen elektrischen Ladungen. Intermediäre Vektorbosonen vermitteln analog die Kräfte zwischen den Teilchen der schwachen Wechselwirkung, den Leptonen. Es gibt nun bereits Ansätze, Leptonen und Quarks ebenfalls unter einen Hut zu bringen. Auf bestechende Analogien wurde ja bereits verwiesen. Den sechs fundamentalen Leptonen sollen die vermutlich sechs fundamentalen Quarks gegenüberstehen. Beide Gruppen bilden jeweils verschiedene »Generationen«. Die erste besteht bei den Leptonen aus dem Elektron und dem Elektron-Neutrino, bei den Hadronen aus den up- und down-Quarks. Die zweite Generation bilden einerseits Myon und Myon-Neutrino sowie andererseits charm- und strange-Quarks. Tau-Lepton und zugehöriges Tau-Neutrino sowie bottom- und top-Quarks stellen die dritte Generation dar.

Beim Zusammenstoß von Elektron und Positron können Quark- und Gluonjets entstehen.



Was die Photonen in der Quantenelektrodynamik, was die intermediären Vektorbosonen in der Theorie der elektroschwachen Kraft sind, sollte demnach im Bereich der starken Kernkräfte, im Austausch Quark zu Quark, ein Analogon haben. Solche Partikeln des Feldes der starken Wechselwirkung werden Gluonen genannt. Es sind sogenannte virtuelle Feldquanten. Sie sind es auch, die in einem Atomkern den Kräfteaustausch zwischen Protonen und Neutronen bewerkstelligen und damit für den Zusammenhalt des Kerns verantwortlich sind. Das erklärt auch ihren Namen, der vom Englischen gluc (Leim) herrührt. Gluonen sind gewissermaßen die »Leimteilchen« der stark wechselwirkenden Partikeln.

Bei der »großen Vereinigung« der Theorie – sollte es sie je geben – werden also Leptonen und Quarks zu einer einzigen Teilchengruppe zusammengefaßt. Dann sollte es aber auch möglich sein, daß sich ein Quark in ein Lepton umwandelt. Zu den hieraus folgenden Konsequenzen gehört, daß das Proton nicht stabil sein kann. Die bereits angeführten neuartigen Experimente zur Prüfung der Protonstabilität haben somit einen weiteren gewichtigen erkenntnistheoretischen Hintergrund. Denkbar wäre, daß unter den Bedingungen des Urknalls die Materie einen physikalischen Zustand einnahm, der aus der Sicht des Hochenergiephysikers mit der vereinigten großen Theorie erfaßt werden könnte. Im weiteren Verlauf der kosmologischen Entwicklung – so das Szenarium der Physik – manifestierte sich die Materie schließlich in Energiebereichen, die von vereinfachten Spezialfällen dieser einheitlichen Theorie gut beschrieben werden, den Theorien der starken und schwachen Wechselwirkung, des Elektromagnetismus und der Gravitation. Aussagen dieser Art

liegen heute freilich noch im Bereich kühner Spekulationen, berühren das Feld unerforschten Neulands.

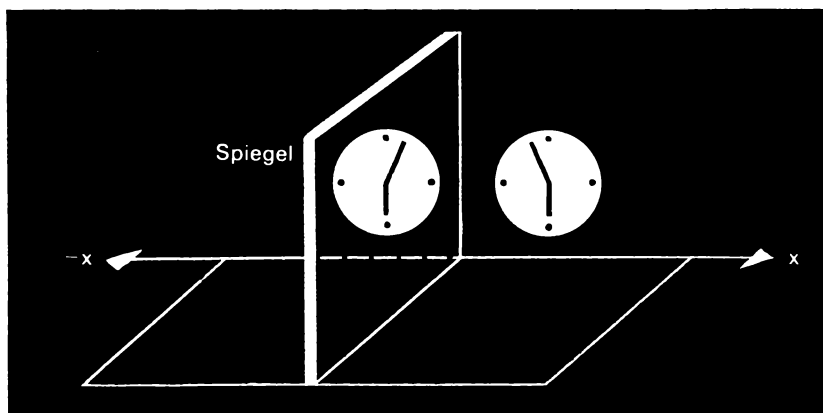
Es sind nicht nur die immer komplexer und teurer werdenden Experimente, die jede weitere neue Erkenntnis erschweren. Es ist in besonderem Maße auch die mathematische Theorie, die immer komplizierter wird und die Grenze des Gegenständlich-Anschaulichen schon lange überschritten hat

Eine grundlegende Frage jeder physikalischen Theorie ist die, wie mathematische Gleichungssysteme beschaffen sein müssen, damit sie den durch sie ausgedrückten physikalischen Sachverhalt unabhängig von möglicherweise verschiedenen Beobachterstandpunkten exakt widerspiegeln. Solch eine Fragestellung hat beispielsweise Albert Einstein zur Entwicklung seiner Speziellen und seiner Allgemeinen Relativitätstheorie geführt, worauf bereits ausführlich eingegangen wurde. Von ähnlichem Rang ist in der Hochenergiephysik die Frage nach der Symmetrie physikalischer Gesetze.

Nehmen wir als Beispiel die Spiegelsymmetrie. Denken wir uns eine rollende Billardkugel, die durch den kunstvollen Anstoß eines Spielers mit immer neuen Kugeln zusammenstößt und dabei oftmals ihre Richtung ändert. Das alles läßt sich berechnen unter Zuhilfenahme des Impulserhaltungssatzes und der Bewegungsgleichungen der klassischen Physik. Würde man diesen Vorgang nun durch einen Spiegel betrachten und anhand dieses seitenverkehrten Bildes die entsprechenden Bewegungen berechnen, so wäre das Ergebnis dennoch völlig identisch.

Tabelle: Die Feldquanten und einige ihrer Eigenschaften

Feldquant	Ladung	Masse	Spin	Lebensdauer in s
Gluon g (starke Wechselwirkung)	0	0	1	∞ (?)
Photon γ (elektromagnetische Wechselwirkung)	0	0	1	∞
Geladene Vektor- bosonen $W^{\pm}$ (schwache Wechselwirkung)	± 1	78 GeV/c ²	1	$< 10^{-23}$
Neutrales Vektorboson Z^0 (schwache Wechselwirkung)	0	90 GeV/c ²	1	$< 10^{-23}$



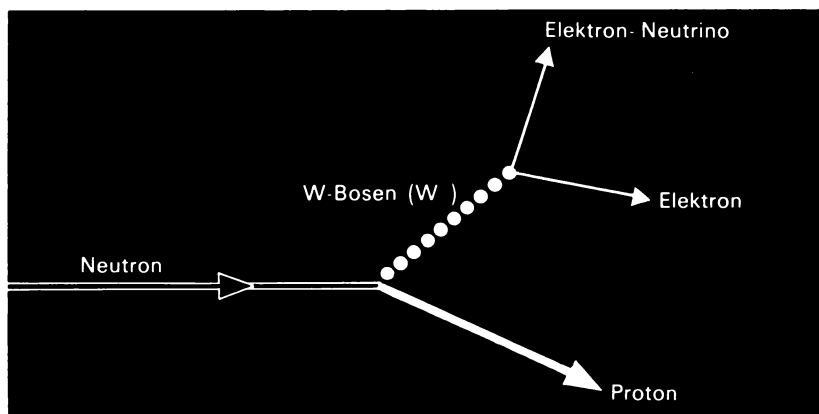
Beispiel der Raumspiegelung an einer Uhr – sie ergibt eine unterschiedliche Zeitangabe

Die Gesetze der klassischen Mechanik, so sagt der Physiker, sind also invariant gegenüber Raumspiegelungen. Wenn das im Spiegel beobachtete Abbild eines Prozesses sich ebenfalls in der Natur realisieren läßt, so spricht der Kernphysiker davon, daß die Parität erhalten ist. Im Beispiel der Billardkugeln, also im Falle der Gesetze der klassischen Mechanik, ist das ohne Zweifel der Fall.

Daß in der Natur dennoch nicht alles spiegelsymmetrisch verläuft, kann man sich ebenso leicht vor Augen führen, nämlich an der Anatomie des Menschen. Das Herz sitzt immer links, obgleich grundsätzlich auch eine Umverteilung der Organe denkbar ist. Aber die genetischen Steuerungsprozesse sind so beschaffen, daß bei der Heranreifung des Embryos das Herz immer auf der linken Seite liegt. Bei diesen Naturgesetzen ist die Parität also verletzt.

Genauere Untersuchungen, insbesondere durch die in den USA arbeitenden Physiker T. D. Lee und C. N. Yang, haben nun gezeigt, daß auch die schwache Wechselwirkung – entgegen früheren Ansichten – die Parität verletzt, d. h. unsymmetrisch gegenüber Raumspiegelungen ist. Das erste Experiment, das diesen Sachverhalt klar belegte, wurde übrigens bereits 1957 ausgeführt. Es handelte sich dabei um das Studium des Beta-Zerfalls von Kobalt-60. Dennoch hat es viele Jahre gedauert, bis der Mechanismus dieser Paritätsverletzung erkannt und beschrieben werden konnte.

Eine Erklärung ergibt sich, wenn man Spin und Bewegungsimpuls eines Elektrons oder anderer vergleichbarer Teilchen mit dem Spin $1/2$ (sogenannte Fermionen) beachtet. Dann erhält man



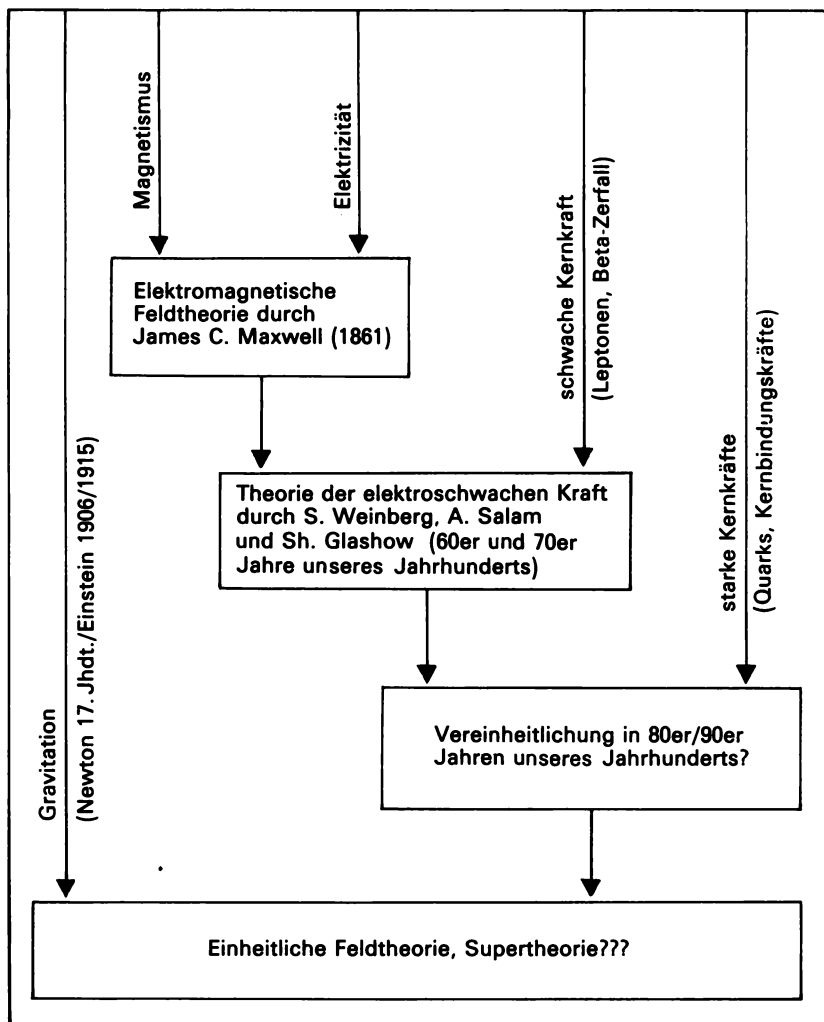
W-Bosonen ermöglichen eine einfache Beschreibung des Beta-Zerfalls: Das Neutron emittiert ein W-Boson und verwandelt sich dabei in ein Proton; das W-Boson zerfällt sofort in ein Elektron und in ein Antineutrino.

nämlich zwei Gruppen: In der ersten sind Spin und Teilchenimpuls gleichgerichtet. Ein Teilchen dieser Gruppe rotiert in Form einer Rechtsschraube. Die zweite Gruppe bilden dann eben Teilchen, bei denen Spin und Impulsrichtung entgegengesetzt stehen. Es ist leicht vorstellbar, daß bei einer Spiegelung aus einem »rechtsdrehenden« ein »linksdrehendes« Elektron entstehen müßte.

Erstaunlicherweise reagieren aber bei bestimmten Teilchenreaktionen beide Gruppen unterschiedlich. W-Bosonen beispielsweise nehmen nur von »linksdrehenden« oder »linkshändigen«, wie in der Literatur häufig zu finden ist, Leptonen oder Quarks Notiz, die »rechtsdrehenden« hingegen werden ignoriert. Diese Eigenschaft der W-Bosonen erstreckt sich nicht nur auf das Elektron. Auch die »schweren« Leptonen und – besonders wichtig – auch alle bekannten Quarks sind davon betroffen.

Etwa 1977 gelang es den Experimentatoren zu zeigen, daß die Situation bezüglich der Z-Bosonen anders ist. Mit ihnen wechselwirken sowohl die links- wie auch die rechtsdrehenden Leptonen und Quarks. Damit ist diese Wechselwirkung verwandt mit der der Photonen, d. h. also mit den Quantenteilchen des elektromagnetischen Feldes. Dieser Umstand nimmt in der vereinigten »elektroschwachen« Theorie einen wichtigen Platz ein.

Die theoretische Beschreibung all dieser Vorgänge ist im Rahmen der Elementarmathematik nicht möglich. Dazu müssen beispielsweise Ergebnisse der sogenannten Gruppentheorie, eines Spezial-



»Urkräfte« und ihre theoretische Beschreibung

gebietes der theoretischen Mathematik, herangezogen und gezielt weiterentwickelt werden. In solchen Theorien werden Elemente entsprechend ihren Eigenschaften in Gruppen zusammengestellt, und es werden Verknüpfungsbeziehungen zwischen den Elementen, ja sogar zwischen verschiedenen Gruppen definiert. Eine solche Gruppe war von Gell-Mann und Newman für die Beschreibung der Quarks herangezogen worden. Später zeigte sich, daß diese sogenannte »unitäre Gruppe $SU(3)$ « von ihrer mathematischen Struktur her

auch alle möglichen »Farbkombinationen« der Quarks mit den entsprechenden Regeln hervorragend wiedergibt. Im Rahmen solcher formalisierten Überlegungen konnte dann auch die vereinigte elektroschwache Kraft durch die spezifische Verknüpfung einer SU (2)- mit einer U (1)-Gruppe dargestellt werden.

Die Bemühungen, die elektroschwache mit der starken Wechselwirkung zu vereinigen, gehen nun davon aus, die Merkmale einer mathematischen Gruppe herauszufinden und diese Gruppe zu definieren, in der gleichermaßen die »chromodynamische« Gruppe SU(3) der Quarks als auch die kombinierte Gruppe SU (2) $\times$ U (1) der elektroschwachen Teilchen (Leptonen und Photonen) enthalten sind. Die einfachste solcher Gruppen ist von den Mathematikern und Physikern mit dem Kürzel SU (5) versehen worden. Aus den Berechnungen zu Beginn der 80er Jahre ist zu vermuten, daß, falls diese SU (5)-Theorie stimmt, bei Energien von mehr als 10^{15} GeV die Unterschiede zwischen den verschiedenen Wechselwirkungen verschwinden. Oder anders ausgedrückt: Die unterschiedlichen Kräfte sind tatsächlich nichts weiter als die unterschiedlichen Manifestationen ein und derselben fundamentalen Materieeigenschaft, die von der »großen vereinigten Theorie« widergespiegelt wird.

Doch wie bereits gesagt – vorerst sind das alles nur Berechnungen auf dem Papier, Hypothesen oder gar Spekulationen. Hier liegt das Vorfeld der Forschung, Neuland. Weitere Fortschritte werden neue Teilchenbeschleuniger und Nachweisdetektoren bringen müssen, die gegenwärtig bereits in Bau sind und schon von ihren äußeren Abmessungen her – beispielsweise Beschleunigerstrecken von etwa 20 km Länge – alle bisherigen Maßstäbe der Experimentiertechnik in den Schatten stellen werden.

Giganten der Technik für die Mikrowelt

Wie erzeugt man Elementarteilchen, wie kann man sie untersuchen? Vom Prinzip her – darauf wurde bereits verwiesen – ist das Vorgehen der Physiker sehr einfach: Sie beschießen Protonen oder andere Atomkerne bzw. Kernteilchen mit »schwerem Geschütz«. Trifft eines der Geschosse auf einen Atomkern oder ein anderes Teilchen, so zerplatzen Geschöß und Trefferscheibe. Unter den Stücken sind die verschiedensten Elementarteilchen – welche genau, das hängt von der Energie des Geschosses ab. Eine erst in den letzten Jahren zur Perfektion entwickelte Methode besteht auch darin, zwei hochbeschleunigte »Geschosse« aufeinanderprallen zu lassen, beispielsweise Proton und Antiproton oder Elektron und Positron.

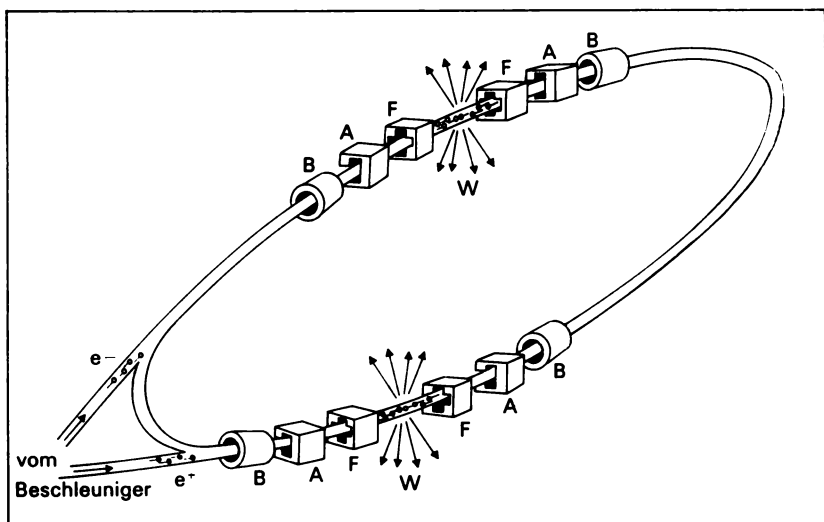
So einfach dieses Prinzip auch ist, so schwer läßt es sich im Experiment realisieren. Denn als Geschosse eignen sich eben nur Protonen oder andere Elementarteilchen. Diese für den Laien unvorstellbar winzigen Teilchen müssen erzeugt werden, sind auf gewaltige Energiebeträge zu beschleunigen und dann noch ganz gezielt auf das Treffermaterial zu lenken, das in seine »elementaren« Bestandteile zerlegt werden soll.

Dazu werden heute technische Anlagen von gewaltigen Dimensionen eingesetzt. Sie sind jedoch noch klein gegenüber jenen Projekten, die bereits gebaut werden und ungefähr Ende der 80er Jahre Einzug in den Forschungsalltag halten sollen.

In der Kernphysik gibt es gegenwärtig vier Gruppen von Geschößarten, die für physikalische Experimente eingesetzt werden – Neutronen, Ionen, Protonen und Elektronen. Die elektrisch neutralen Neutronen sind nur mit Hilfe von Kernspaltungsreaktoren zu gewinnen. Sie lassen sich jedoch nicht mehr weiter beschleunigen. Man kann die Partikeln nur in der Energiestufe verwenden, mit der sie aus der Reaktorzone herausgeführt werden.

Elektrisch geladene Partikeln hingegen – sowohl Ionen als auch Protonen und Elektronen sowie deren Antiteilchen – lassen sich in geeigneten Anlagen mit Hilfe elektrischer Spannungen bzw. hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf nahezu beliebig hohe Energie weiter beschleunigen.

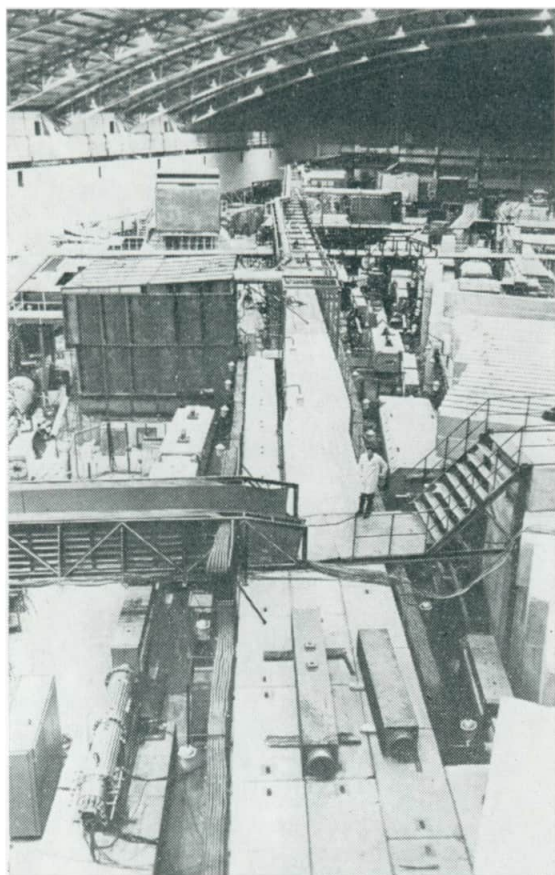
Für die Aufgaben der Hochenergiephysik sind dabei die Protonen



Funktionsschema eines Speicherringes: Aus dem Beschleuniger werden nacheinander Teilchen- und Antiteilchenbündel in den Speicherring eingeschossen, und zwar wegen der entgegengesetzten Ladung in gegenläufige Richtungen. Ablenkmagneten (A) zwingen die Teilchenbündel auf die Kreisbahn; Fokussierungsmagneten (F) halten die Bündel auf kleinstem Raum zusammen; in hochfrequenten elektrischen Feldern (B) wird den Partikeln Energie zugeführt; in den Wechselwirkungszone(n) (W) können beide Strahlbündel für das Experiment zur Kollision gebracht werden.

und Elektronen sowie deren Antiteilchen von besonderem Interesse. Schwerionen hingegen sind heute bereits im Einsatz, sowohl bei vielen technischen Anwendungen als auch bei der Suche nach immer neuen, schwereren künstlichen Elementen. Darauf soll in diesem Buch aber nicht näher eingegangen werden.

Unter den vielen Beschleunigerprinzipien haben sich das sogenannte Synchrotron, aber auch der Linearbeschleuniger durchgesetzt. Im Synchrotron werden die elektrisch geladenen Partikeln mit Hilfe starker Magnetfelder auf gekrümmte Bahnen gedrängt. Die Teilchen fliegen durch ringförmige Rohre, die luftleer gepumpt sind. Bei jedem Umlauf in diesem Kreis durchqueren sie ein hochfrequentes elektrisches Feld, in dem sie jeweils beschleunigt werden. Von Mal zu Mal nehmen sie auf diese Weise weitere Energie auf. Starke Elektromagneten, die entlang dieser Kreisbahn angeordnet sind und deren magnetische Feldstärke entsprechend der jeweiligen Partikelenergie gesteuert wird, sorgen dafür, daß die Geschosse

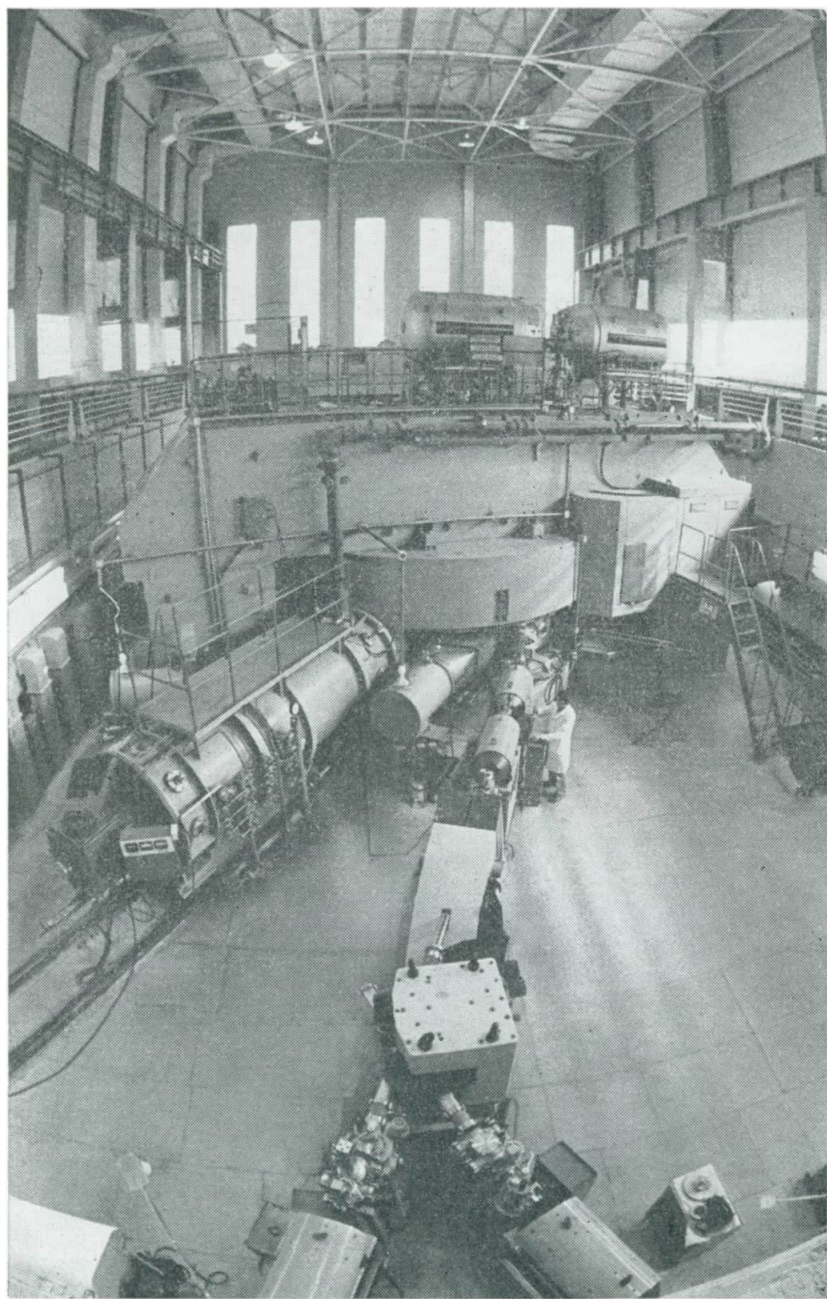


*Experimentierhalle am
Teilchenbeschleuniger
von Serpuchow*

immer genau in der Mitte des Rohres fliegen. Haben die Teilchen die in der jeweiligen Anlage mögliche maximale Energie erreicht, werden sie durch starke magnetische Impulse aus dieser Kreisbahn herausgelenkt und fliegen durch spezielle Röhren zu den Experimentierplätzen.

In der Regel befinden sich dort spezielle Kammern, in denen die Hochenergiegeschosse auf Wasserstoffkerne oder andere Materialien auftreffen und dort die bereits erwähnten Materieprozesse hervorrufen. Solche Anlagen können beispielsweise sogenannte Blaskammern oder auch Funkenkammern sein, in denen die bei den Zusammenstößen produzierten neuen Elementarteilchen sichtbare Bahnen hinterlassen.

Im Jahre 1967 nahm in Protwino, nahe der alten Stadt Serpuchow bei Moskau, der damals größte Beschleuniger dieser Art den Betrieb



Experimentiertechnik für die Kernforschung hat heute beachtliche Dimensionen – hier der neue Schwerionenbeschleuniger U 400 des VIK Dubna.

auf. Er ermöglicht, Protonen auf Energien von 76 GeV zu beschleunigen. Mit diesem Beschleuniger wurde eine Reihe prinzipiell neuer Ergebnisse erhalten, z. B. die Entdeckung eines neuen Symmetrietyps in der Hochenergiephysik. Dieses fundamentale Ergebnis wurde zusammen mit nachfolgenden Untersuchungen zu einer Grundlage der Quantenchromodynamik, der Theorie der starken Wechselwirkung bei kleinen Entfernungen unter Beteiligung der Quarks, die gerade die große Gruppe der Hadronen bilden.

Dieser Beschleuniger hatte für seine Zeit unvorstellbare Ausmaße. Das unterirdisch in einem Tunnel verlegte evakuierte Beschleunigerrohr hat einen Durchmesser von rund 500 m. Sein Umfang mißt etwa 1,5 km. Die elektrische Leistung, die für den Betrieb der riesigen Magnete während eines Experiments benötigt wird, würde ausreichen, eine mittlere Stadt zu versorgen. Ein noch größerer Protonenringbeschleuniger wurde 1972 in Batavia (USA) fertiggestellt und 1974 offiziell in Betrieb genommen. Damit können bereits Geschoßenergien von 400 GeV bereitgestellt werden. Auch dort wurde der Beschleunigerring unterirdisch installiert. Der Ring hat einen Radius von etwa 1 km. Das Tunnelrohr ist fast 7 m breit und 5,5 m hoch. Platz genug, um dort bequem eine Metro fahren zu lassen. Doch fährt im Tunnel natürlich kein Zug, sondern dort stehen starke Elektromagnete. In dem Rohr »fahren« die beschleunigten Protonen Karussell: Sie werden dazu von einem Vorbeschleuniger in das Rohr eingeschossen.

Eine weitere Anlage für Protonen von 400 GeV wurde 1977 im europäischen Kernforschungszentrum CERN offiziell in Betrieb genommen. Ihr unterirdischer Beschleunigerring hat eine Länge von rund 7 km. Bereits im Juni des vorangegangenen Jahres waren in dieser Anlage erstmals Protonen auf die projektierte Endenergie gebracht worden. Zuvor stand beim CERN bereits ein Synchrotron für Endenergien von 28 GeV zur Verfügung. Dieser kleinere Beschleuniger wird für die große Anlage als Startstufe eingesetzt. Daraus werden die vorbeschleunigten Partikeln in den großen Ring eingeschossen. Der sogenannte Superbeschleuniger von Genf hat einen Ringdurchmesser von 2,2 km. Er wurde etwa 40 m unter der Erde verlegt. Allein das Graben des unterirdischen Tunnels mit Hilfe einer Spezialmaschine hat 16 Monate beansprucht. Insgesamt 744 Magnete von je 6,26 m Länge und über 17 t Gewicht bringen mit ihrer magnetischen Kraft die Teilchen auf die vorgeschriebene Kreisbahn. In regelmäßigen Abständen wurden entlang der Flugbahn weitere 216 sogenannte Magnetlinsen und 282 Korrektur-

magnete installiert. Sie sorgen dafür, daß der Teilchenstrahl auch wirklich in der Mitte des Rohres entlangteilt.

Mit diesen beiden Hochenergiebeschleunigern für Protonen – das wurde bereits mehrfach erwähnt – konnten Ende der 70er Jahre viele interessante experimentelle Ergebnisse gewonnen werden, die der neuen Elementarteilchentheorie der Quarks zum Siegeszug verhalfen.

Ein nächster Schritt bei der Entwicklung der Experimentiertechnik war die Inbetriebnahme der sogenannten Speicherringe. Mit Hilfe hochpräziser Steuerungen unter Einsatz von Computern gelang es, beschleunigte Teilchenbündel über lange Zeit in solchen Beschleunigerrohren zirkulieren zu lassen. Bei entsprechenden Umbauten ließen sich sogar bestehende Anlagen für diese Methode nutzen. Damit erschloß sich die Möglichkeit, die Zahl der Partikeln, die auf den »Wartebahnen« kreisten, immer weiter zu erhöhen.

Da Protonen und Antiprotonen bis auf die entgegengesetzte elektrische Ladung völlig gleiche Eigenschaften haben, wurde es insbesondere möglich, im gleichen Beschleunigerrohr gleichzeitig Bündel von Protonen und Antiprotonen auf Wartebahnen zu schicken, die allerdings in entgegengesetzter Richtung verlaufen. Haben beide Teilchenwolken eine genügend hohe Energie und eine genügend hohe Teilchendichte, so bedarf es nur weniger technischer Hilfsmittel, um sie so zu lenken, daß sie mit voller Wucht aufeinanderprallen. Die wirksame Kollisionsenergie ergibt sich aus den Energien beider Kollisionspartner. Sie ist bedeutend höher, als wenn nur ein Protonenstrahl auf eine feste »Zielscheibe« geschossen wird, wie es bei den bisherigen Experimenten möglich war. Das gleiche gilt natürlich auch für Elektronen und deren Antiteilchen.

Anfang 1983 berichteten Physiker des CERN von ersten erfolgreichen Experimenten mit dem umgebauten Superprotonenbeschleuniger. Die baulichen Veränderungen hatten bewirkt, daß auch dieser große Beschleuniger als Speicherring eingesetzt werden kann. Zuvor stand im CERN bereits eine kleinere Anlage für Protonen und Antiprotonenreaktionen zur Verfügung.

Nunmehr ist es möglich, die im Gegensinne zirkulierenden Protonen und Antiprotonen an zwei Stellen mit jeweils 270 Milliarden eV (270 GeV) gegeneinander zu schießen. Die dabei wirksame Gesamtenergie beträgt 540 GeV.

Ergänzt wurde diese Beschleunigertechnik von einer weiteren Entwicklung – der sogenannten stochastischen Kühlung des Holländers Simon van der Meer. Damit wurde es möglich, die künstlich

erzeugten Antiprotonen zu sammeln und zu Strahlpaketen zu bündeln. Während dieses Vorganges werden in dem Antiprotonen-Akkumulator die Teilchen zunächst nach ihrer Bewegungsenergie sortiert und von zufällig (stochastisch) ausreißenden, energiereicheren Antiprotonen gereinigt. Auf diese Weise wird die Bewegungsenergie der Partikeln des Bündels weiter vereinheitlicht (abgekühlt). Nach etwa 24 Stunden steht ein Bündel von etwa 600 Milliarden Antiprotonen zur Verfügung, die dann in das Superprotonensynchrotron (SPS) zur weiteren Beschleunigung eingeschossen werden, um sie schließlich auf Kollisionskurs mit einem gegenläufigen Protonenbündel zu bringen.

Mit dem SPS und dem Antiprotonen-Akkumulator gelang es – wie im Zusammenhang mit der elektroschwachen Kraft bereits kurz erwähnt – einer Gruppe von über hundert Forschern unter Leitung des Italieners Carlo Rubbia im Januar 1983, die beiden gesuchten W-Bosonen und im Mai desselben Jahres auch das Z-Boson im Teilchendetektor UA 1 nachzuweisen. Dafür erhielten Rubbia und van der Meer den Physik-Nobelpreis 1984.

Der beim Umbau des SPS eingeschlagene Weg ermöglichte es zunächst jedoch nicht, für die Speicherringexperimente die maximale Leistung des Beschleunigers von 400 GeV zu nutzen. Denn dazu muß ein Teilchenstrahl über mehrere Stunden in dem Beschleunigerrohr kreisen können. In dieser langen Zeit wärmen sich die Elektromagnete jedoch auf unzulässig hohe Temperaturen auf. Es wurden von den CERN-Forschern aber bereits weitere technische Veränderungen vorgeschlagen und auch in Auftrag gegeben, deren erfolgreiche Verwirklichung es ermöglichen soll, bei diesen Speicherexperimenten ebenfalls die maximale Teilchenenergie von 400 GeV für Protonen und Antiprotonen einzusetzen.

Ähnlich wie bei den Protonenbeschleunigern ist die Situation bei den Elektronenbeschleunigern. Da diese Teilchen eine wesentlich geringere Masse als Protonen haben, sind die in diesen Apparaten erzielten Endenergien entsprechend geringer als bei den Teilchekanonen für die schweren Geschosse. Von besonderem Interesse sind auch hier Experimente mit gegenläufigen Bündeln von Elektronen und deren Antiteilchen, den Positronen. Der Zusammenschuß von Elektronen und Positronen hatte ja bereits 1974 zur Entdeckung der sogenannten Charmteilchen geführt, für die bekanntlich postwendend der Physik-Nobelpreis vergeben wurde.

Die leistungsfähigsten Beschleuniger für Elektronen arbeiten gegenwärtig in Stanford (USA) und in Hamburg (BRD). Im Gegen-

satz zu allen anderen Großbeschleunigern der Welt arbeitet in Stanford ein sogenannter Linearbeschleuniger, bei dem die Elektronen auf einer rund 4 km langen, geraden Strecke nur mit Hilfe von elektrischen Feldern auf Fahrt gebracht werden. Vorteil dieser Anordnung ist das Fehlen großer Magnete; der Nachteil besteht unter anderem im enormen Platzbedarf. Die Beschleunigeranlage von Stanford wurde in den letzten Jahren ebenfalls mit Speicherringen für Elektronen und Positronen erweitert.

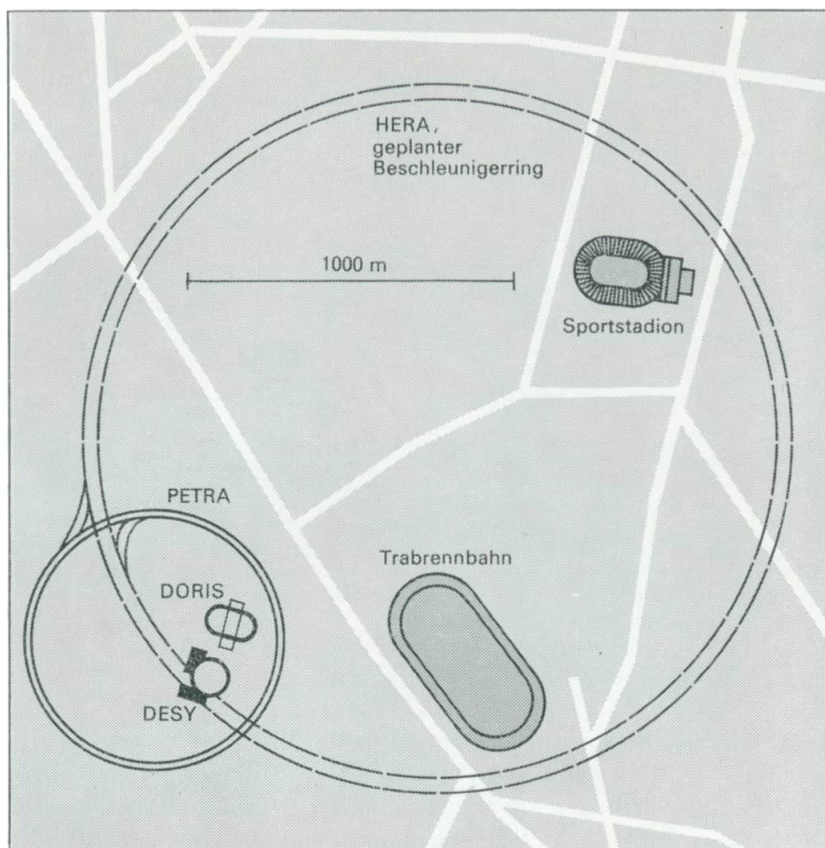
Die gegenwärtig erzielbare Maximalenergie in Elektron-Positron-Speicherringen beträgt 15 bis 19 GeV pro Teilchenbündel. In der Sowjetunion sind derartige Anlagen vor allem im Institut für Kernphysik der Sibirischen Abteilung der Akademie der Wissenschaften der UdSSR in Nowosibirsk errichtet worden. Die dort gegenwärtig erzielbare Maximalenergie pro Teilchenbündel beträgt 7 GeV.

Anlagen der neuen Generation, die alle bisherigen Leistungsparameter weit in den Schatten stellen werden, sind jedoch bereits in Bau. Beim westeuropäischen CERN plant man beispielsweise einen neuen Elektron-Positron-Beschleuniger mit gegenläufigen Bündeln von weit über 100 GeV Maximalenergie.

Ein großes Beschleuniger-Speicher-Projekt für Protonen wurde in der Sowjetunion in Angriff genommen. In Erweiterung des bestehenden Forschungskomplexes von Protwino wird dort der neue Superbeschleuniger für Endenergien von 3000 GeV errichtet. Der bereits vorhandene Beschleuniger von 70 GeV wird als sogenannter Injektor Verwendung finden, als Startmaschine für die Riesenanlage.

Der Beschleunigerring der Anlage U 3000 wird fast 20 km lang sein. Würde sie in herkömmlicher Technik errichtet, wäre sogar die dreifache Länge erforderlich. Der Einsatz von sogenannten supra-leitfähigen Elektromagnete ermöglicht indessen die sedrastische Reduzierung. Auch der Energiebedarf der weitaus größeren Anlage kann dank der neuartigen Magnete in der Größenordnung des bereits vorhandenen Beschleunigers U 70 gehalten werden. Die supraleitenden Magnete werden von den Spezialisten der UdSSR in Kooperation mit französischen Experten des Nationalen Kernforschungszentrums in Saclay hergestellt.

Der neue Beschleuniger wird aus drei Stufen bestehen, der Startmaschine, dem Vorbeschleuniger für 400 GeV und dem Hauptbeschleuniger von 3000 GeV. In diesem Ring soll in der Endstufe noch ein dritter Kreis untergebracht werden, der Proton-Antiproton-Experimente in gleicher Energiestufe möglich machen soll.



Überblick über die bei Hamburg geplante Anlage HERA. Sie nutzt die vorhandenen Beschleunigerkomplexe DESY und PETRA.

Die beim CERN in der Planungsphase befindliche Superanlage für Elektronen und Positronen soll noch gewaltigere Ausmaße erhalten. Ihr Speicherring wird etwa 30 km Umfang haben. Angestrebt wird eine Maximalenergie für diese superleichten Teilchen von etwa 140 GeV. Auch hier ist der Einsatz supraleitender Magnete vorgesehen.

Kleiner wird die Maschine HERA des Deutschen-Elektronen-Synchrotrons (DESY) in Hamburg ausfallen. Ihre besondere Spezialität wird die Möglichkeit sein, erstmals auch hochbeschleunigte Elektronen und Protonen zur Kollision zu bringen. Aus diesem Grundprinzip leitet sich auch der Name HERA ab, der für Hadron-Elektron-Ring-Anlage steht.

Die Anlage HERA wird gewissermaßen aus zwei separaten Spei-



Während der Rekonstruktion des Synchrozyklotrons in Dubna

cherringen bestehen, die in einem Tunnel unterirdisch verlegt werden. In dem Ring für Protonen werden diese Partikeln auf etwa 800 GeV beschleunigt. Im Ring gleichen Durchmessers für die Elektronen erhalten jene Teilchen eine Endenergie von etwa 30 GeV.

Dazu sind an vier verschiedenen Stellen entsprechende Experimentierhallen vorgesehen. Der Beschleunigungstunnel wird insgesamt etwa 6 km lang sein. Mit dieser Anlage soll insbesondere das Studium der Wechselwirkung von Elektronen mit den Quarks im Inneren des Protons sehr gut möglich sein. Außerdem hoffen die Wissenschaftler, mit Hilfe dieser Anlage entscheiden zu können, ob die Leptonen und die Quarks nicht doch aus noch kleineren Objekten bestehen.

Aber nicht nur die Beschleunigeranlagen, sondern auch die Geräte zum Nachweis der entstehenden Elementarteilchen sind heutzutage wissenschaftlich-technische Meisterwerke, beispielsweise riesige Kammern aus Stahl, die mit flüssigem Wasserstoff oder Propan gefüllt sind. Bei einer bestimmten Temperatur und einem bestimmten Druck steht die Flüssigkeit kurz vor dem Sieden – sie bedarf dazu nur noch eines kleinen Anstoßes von außen. Diesen Anstoß geben die Teilchengeschosse und Trümmerstücke der Kerne.

Sie bewegen sich, für das Auge natürlich unsichtbar, mit blitzartiger Geschwindigkeit durch die Flüssigkeit. Entlang ihrer Flugbahn regen sie nun die Flüssigkeitsmoleküle energetisch an, aus der flüssigen in die gasförmige Phase überzuwechseln. Entlang der Flugbahn der Teilchen entstehen auf diese Weise Gasbläschen, die die Anwesenheit der Elementarteilchen verraten: Belichtet man in einem solchen Moment das Kammerinnere, so wird das Licht an den Bläschen gebrochen – die unsichtbaren Teilchen haben somit sichtbare Spuren hinterlassen.

Filmkameras halten die Spuren fest, die sich auf den entwickelten Aufnahmen exakt vermessen lassen. Die Länge einer derartigen Spur gibt z. B. an, wie lange ein bei den Protonenstößen entstandenes Elementarteilchen existierte, bevor es weiter zerfiel. Aus der Krümmung der Flugbahn oder dem Flugwinkel von Bruchstücken, bezogen auf den »Detonationspunkt«, lassen sich exakt Rückschlüsse auf Masse, Energie und Impuls des Teilchens ziehen, ebenso wie auf elektrische Ladung und andere charakteristische Größen.

Ein anderes Grundprinzip der Nachweisteknik besteht darin, daß die bei Kernprozessen entstehenden sekundären Teilchen entlang ihrer Flugbahn infolge bestimmter Substanzen aufgrund ihrer Wechselwirkung zur Aussendung von Lichtblitzen führen, die ebenfalls fotografisch festgehalten werden können. Diese Technik der sogenannten Szintillationsteleskope wurde in den letzten zehn Jahren ebenfalls weiterentwickelt. In den Kapiteln über Experimente der Neutrinoastronomie wurden solche Anlagen bereits vorgestellt.

Als ein Beispiel für derartige Großanlagen soll die sogenannte »Große europäische Blaskammer« (BEBC) des CERN vorgestellt werden, die für das Superprotonensynchrotron von 400 GeV entwickelt wurde. Ihr fotografierbares Volumen beträgt rund 22 m³, die Gesamtfüllung umfaßt 35 m³. Damit die bei den beschriebenen Zusammenstößen entstehenden, elektrisch geladenen Elementarteilchen auf genau definierte Bahnen gezwungen werden, erzeugen zwei supraleitende Spulen ein Magnetfeld von 35 Kilogaß. Es handelt sich dabei um einen der größten jemals nach dem Prinzip der Supraleitung gebauten Magneten. Entwicklung und Bau dieser Blaskammer haben über fünf Jahre beansprucht.

Das Kammerinnere kann wahlweise mit Wasserstoff, Deuterium oder Neon gefüllt werden. Zur Kühlung der Stromzuführung des Magneten werden in jeder Sekunde 2½ g flüssiges Helium bereitgestellt. Allein die Kälteanlagen zur Sicherstellung des Kammerbetriebes haben eine Leistung von 20 kW.

Seither wurden noch größere und kostspieligere Teilchendetektoren entwickelt und in Betrieb gesetzt. Sie erst ermöglichten es 1979, die Entstehung sogenannter Teilchenjets im Experiment nachzuweisen. Mit Hilfe des Festkörperdetektors Mark I gelang es beispielsweise am Linearbeschleunigerzentrum von Stanford in den USA 1974, das sensationelle J/Psi-Teilchen zu entdecken. Mit dem Funkenkammerdetektor TASSO am Hamburger Forschungszentrum DESY gelang es Ende der 70er Jahre, im Ergebnis der Elektron-Positron-Vernichtung die Jetstruktur bei weiteren Kernprozessen aufzuzeigen.

Die neuen Projekte der Hochenergiephysik werden voraussichtlich in der zweiten Hälfte dieses Jahrzehnts fertiggestellt sein. Dann darf mit großer Wahrscheinlichkeit mit neuen, bahnbrechenden Ergebnissen über die Struktur der Materie gerechnet werden. Sie werden ohne Zweifel in hohem Maße auch die weltanschaulichen Vorstellungen über den Bau der materiellen Welt beeinflussen.

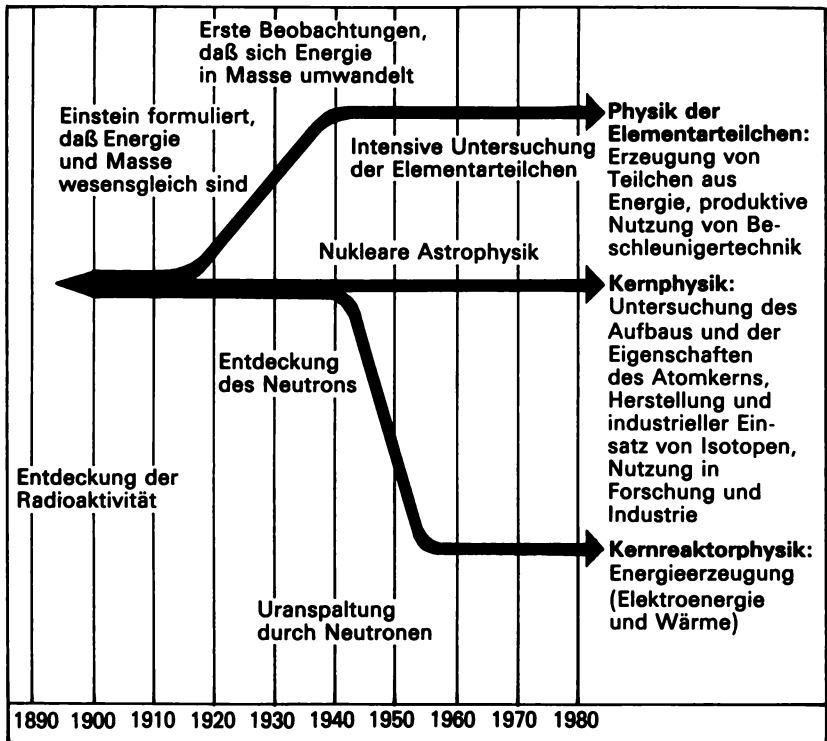
Wo liegt der praktische Nutzen?

Die Experimente der Physiker zu den großen Themen der Wissenschaft unserer Tage haben wahrhaft industrielle Ausmaße erreicht. Das trifft nicht nur auf die Größe solcher Anlagen zu, wie sie in den vorangegangenen Kapiteln erläutert wurden. Auch hinsichtlich der Kosten oder etwa des Energiebedarfs ist dieser Vergleich durchaus gerechtfertigt. Der Anfang 1980 in Stanford (USA) fertiggestellte Positron-Elektron-Speicherring, der einen Umfang von über 2 km besitzt, hat nicht weniger als 78 Millionen Dollar gekostet. Und der beim CERN geplante Mammutbeschleuniger von 30 km Umfang soll nach den Berechnungen von 1980 über 1 Milliarde Schweizer Franken kosten. Sein elektrischer Leistungsbedarf wird mit 30 bis 40 MW veranschlagt. Mit den anderen, älteren Anlagen beansprucht das CERN-Forschungszentrum dann eine Kraftwerkskapazität von 100 MW.

Lohnt sich dieser hohe gesellschaftliche Aufwand eigentlich? Was springt bei diesen Forschungen an Nutzen für die Praxis heraus?

Der auf vielfältige Weise gegebene praktische Nutzen läßt sich leider nicht in Mark und Pfennig angeben. Denn zunächst einmal sind diese Arbeiten wie auch die Forschung auf dem Gebiet der Astronomie und Astrophysik sogenannte Grundlagenforschung. Hier geht es vordergründig um neues Wissen, um neue Erkenntnisse der Gesetzmäßigkeiten in der Natur schlechthin. Der unmittelbare Nutzen besteht also in jeder neuen Erkenntnis selbst, in ihrem Beitrag zur weiteren Fundierung einer wissenschaftlich begründeten Weltanschauung.

Aber darüber hinaus läßt sich auf vielen Gebieten bis hin zur Technologie auch ein handfester Nutzen nachweisen. Die Zusammenhänge zwischen Forschung und Praxis auf diesem Gebiet sind etwa vergleichbar mit den Verhältnissen in der Raumfahrt. Dort wie hier werden für die extremen Erfordernisse des Forschungsgebietes neue Werkstoffe, bisher nie dagewesene Geräte oder Produktionsmethoden entwickelt, die sich dann erfolgreich im industriellen Alltag verwerten lassen. Beim Bau der Großbeschleuniger fallen hierunter die Fertigung leistungsstarker Magneten, die Weiterentwicklung der Kryotechnik, des Detektorbaus oder der Justage-



Erkenntnisfortschritt seit Entdeckung der Radioaktivität

technologie für großflächig ausgedehnte Bauwerke höchster Maßgenauigkeit.

Daneben zählen aber natürlich auch die Forschungsergebnisse selbst. Das, was vor 30, 20 oder 10 Jahren noch lediglich neue Erkenntnis war, hat über Nacht in diesem oder jenem Fall zu einer bedeutenden praktischen Anwendung in der Industrie oder in der Medizin geführt. Im Abschnitt über Astronomie wurde ein solches Beispiel bereits genannt – die Erdbebenvorhersage mit Hilfe von Quasaruntersuchungen. Im Bereich der Atom- und Elementarteilchenphysik ist die Vielzahl solcher Anwendungsfälle schon längst nicht mehr zu überblicken.

Da wäre zunächst das Feld des Einsatzes von Teilchenbeschleunigern aller Art in der Industrie. Seit langem werden Elektronenstrahlen genutzt, um die Plastummantelungen von elektrischen Leitungskabeln chemisch zu »vernetzen«. Die von der Teilchenstrahlung auf das Material übermittelte Energie ermöglicht darin

nachfolgend Reaktionen, die dazu führen, daß das Material insgesamt elastischer und temperaturfester, die Isolation somit dauerhafter, die Qualität der Kabel folglich besser wird.

Selbst in der Textilindustrie sind nach diesem Muster Einsatzmöglichkeiten gefunden worden, um Gewebe und Gewirke aus synthetischen Faserstoffen so zu veredeln, daß sie neuartige, bessere Eigenschaften erhalten. Die bisherigen Forschungen haben gezeigt, daß sich die bereits bekannten Textilfasern und andere hochpolymere Produkte, wie z. B. Plaste und Elaste, nämlich dann weiter veredeln lassen, wenn man einen zielgerichteten Teilchenbeschuß mit chemischen Reaktionsprozessen koppelt.

Unter der Einwirkung eines intensiven Elektronenstrahls kommt es in den verschiedensten Makromolekülen, aus denen Plaste und Elaste bestehen, zu bestimmten Veränderungen. Einzelne Glieder des Kettenmoleküls werden auf diese Weise zum Ansatzpunkt für nachfolgende chemische Reaktionen. So können sich von diesen Punkten aus von Makromolekül zu Makromolekül Brücken aus niedermolekularen Verbindungen bilden. Der Kunststoff wird praktisch miteinander vernetzt, die physikalischen Eigenschaften ändern sich. Dieser technologische Weg hat vor allem für die Herstellung von Plastformteilen große Bedeutung.

Für die Textiltechnologie von größtem Interesse ist hingegen die sogenannte Pffropfpolymerisation. Hier werden an die mittels Bestrahlung vorbereiteten Punkte neue Moleküle »angeheftet«. Die Eigenschaften der Moleküle der kleineren Seitenketten können sich dabei erheblich von denen der Makromoleküle unterscheiden. Ein Gewebe aus so behandelten Fasern zeigt völlig neue Eigenschaften. So kann derart bearbeitetes Kunstseidenmaterial plötzlich wie Wolle Feuchtigkeit aufsaugen. Es wird über diesen physikalischen Eingriff auch möglich, synthetische Fasern besser und billiger als bisher zu färben. Auf Gewebe- und Lackoberflächen lassen sich – eine andere Anwendungsvariante – interessante Struktureffekte erzielen. Anstrichfilme können mit Hilfe der Strahlen vernetzt, d. h. ausgehärtet werden. Für experimentelle Arbeiten zu diesem Themenkreis wurde am Institut für Kernphysik der Sibirischen Abteilung der Akademie der Wissenschaften der UdSSR in Nowosibirsk der Beschleunigerkomplex ELT 1,5 geschaffen. Der etwa 5,5 m hohe Beschleuniger besteht aus drei Funktionsteilen. Zunächst aus dem eigentlichen Beschleunigerteil mit einem Beschleunigungsrohr, um das die Wicklungen eines Hochspannungstransformators gelegt sind. Mit Hilfe einer Spannung von 1,5 Millionen Volt erlangen die Elek-

tronen in dem rund 1,8 m langen Rohr nahezu Lichtgeschwindigkeit.

Ähnlich wie in einer Fernsehröhre wird der Teilchenstrahl nach Verlassen des Rohres im sogenannten Scanner periodisch seitlich abgelenkt. In einem trichterförmigen, völlig luftleeren Gefäß kann er sich fächerartig ausbreiten. Am Fuße des Gefäßes durchdringt der Strahl schließlich auf 2,5 m Breite ein hauchdünnes Fenster aus Titanfolie. Unterhalb dieses Fensters werden die zu bestrahlenden Materialien vorbeigeführt.

Die universelle Auslegung der Anlage ermöglicht, im Bestrahlungsraum sowohl Stoffbahnen als auch biegesteife Platten zu behandeln. Eine dritte Möglichkeit besteht darin, mit 1 m $\times$ 1 m messenden Aluminiumpaletten auch Plastformteile und andere Erzeugnisse unter dem Strahlenfenster vorbeizuführen.

Die Steuerung der Anlage erfolgt von einem zentralen Pult aus. Die strahlengefährdeten Zonen werden während des Betriebes von Fernsehkameras überwacht. Die chemische Vor- bzw. Nachbehandlung erfolgt in Hallen, die an den Bestrahlungsraum angrenzen.

Nicht nur Elektronen, auch die Kernteilchen selbst sowie deren Verwandten sind in einigen Praxisbereichen seit längerer Zeit begehrte Helfer. So berichteten Wissenschaftler des Vereinigten Instituts für Kernforschung in Dubna bereits 1973 von ersten erfolgreichen Arbeiten für den klinischen Einsatz von Protonenstrahlen und Alphastrahlen zur Bekämpfung bösartiger Geschwülste. Zuvor waren ähnliche Ergebnisse auch in Berkeley (USA) und Uppsala (Schweden) erzielt worden.

Die »klassische« Strahlentherapie gegen Krebsgewebe nutzt vor allem die radioaktive Gammastrahlung oder Röntgenstrahlung, d. h. eine energiereiche elektromagnetische Strahlung. Diese Methode weist aber zwei prinzipielle Schwierigkeiten auf: Die Wirkung der Strahlen läßt beim Eindringen in Gewebe rasch nach. Während der größte Effekt auf der Haut erzielt wird, ist er bei tieferliegenden Tumoren nur noch sehr gering. Zum anderen zeigen sich gerade Tumorzellen gegen diese elektromagnetische Strahlung widerstandsfähiger als gesunde Zellen.

Beim Einsatz von Protonen- und anderer Strahlung liegen die Verhältnisse indessen anders: Ein Protonenstrahl hat den wesentlichen Vorteil, daß seine Energie und Abmessungen sehr genau eingestellt werden können. Wegen der elektrischen Ladung der Teilchen kann ein solcher Strahl darüber hinaus auch sehr gut gelenkt werden. Das ermöglicht, krankhafte Zellen exakt zu treffen und

umliegendes gesundes Gewebe weitaus besser als bisher zu schonen. Protonenstrahlen dringen zudem, je nach Strahlenenergie, bis zu 10 cm und mehr in das Gewebe ein, bevor sie als Folge von verschiedenen Wechselwirkungsprozessen ihre volle therapeutische Wirkung entfalten.

Der Einsatz dieser Behandlungsmethode setzt jedoch Protonenbeschleuniger voraus, wie sie vorerst nur in Kernforschungszentren zur Verfügung stehen. Sie müssen über einige zusätzliche Einrichtungen verfügen. Bei den Experimenten in Dubna wird der 680-MeV-Protonenstrahl nach seiner Auskopplung aus dem Beschleuniger zunächst von einem speziellen magnetischen Linsensystem auf ein Bremsmedium aus Wasser fokussiert. Mit Hilfe eines Bremsmagneten können nun fremde Teilchen aus dem Protonenbündel ausgesondert werden. Durch etwa 30 m lange Vakuumrohre wird der Strahl anschließend zu den klinischen Räumen geführt. Auf diesem Weg wird er mit Hilfe von weiteren Linsensystemen immer wieder neu gebündelt. Die zum Einsatz kommenden Teilchen verfügen jetzt noch über eine Energie von rund 200 MeV. Die Steuerung der Strahlauslenkung aus dem Beschleuniger erfolgt von einem speziellen Raum aus, von dem aus auch die medizinische Überwachung des Patienten möglich ist. Entsprechend der Geschwulstform kann der Strahlquerschnitt eingestellt werden.

Die präzise Steuerbarkeit eines Protonenstrahls ermöglicht es, selbst in der Nähe lebenswichtiger Organe, wie etwa dem Gehirn, zu bestrahlen. Die Treffsicherheit eines solchen Strahles liegt unterhalb von 1 mm.

Seither haben weitere Forschungszentren in der Welt an ihren Beschleunigern die für medizinische Zwecke notwendigen Geräteergänzungen vorgenommen. Gleichzeitig wurde geprüft, ob es nicht noch wirksamere Teilchenstrahlen für Therapie Zwecke gibt. Dazu bieten sich die sogenannten Pi-Mesonen an. Um jedoch Mesonenstrahlen ausreichender Intensität zu erhalten, reichen die bestehenden Beschleunigeranlagen noch nicht aus. Günstige Einsatzmöglichkeiten in dieser Hinsicht bietet das umgebaute Synchrozyklotron in Dubna. Neue Anlagen, sogenannte Mesonenfabriken, entstanden in den letzten Jahren in Los Alamos (USA), Vancouver (Kanada) und Zürich.

Eine medizinisch sehr erfolgversprechende Einsatzvariante moderner Elektronensynchrotrons und Speicherringe bietet die Röntgendiagnostik von Blutgefäßsystemen, beispielsweise in der Sibirischen Abteilung der Akademie der Wissenschaften der UdSSR in

Nowosibirsk sowie am Beschleunigerzentrum in Stanford (USA). Es geht dabei um den Einsatz intensiver Röntgenstrahlung im Bereich von 33 keV (Kiloelektronenvolt), die mit herkömmlichen Röntgenröhren nicht zu erzeugen ist. Solche Strahlung entsteht aber als zunächst unerwünschter Nebeneffekt in den modernen Beschleunigeranlagen für Elektronen. Die mit hoher Energie kreisenden Teilchen senden Synchrotronstrahlung aus, deren Spektrum sich bis in den gewünschten Röntgenbereich erstreckt.

Für Röntgenstrahlung in diesem Bereich besitzt das Element Jod ein sehr starkes Absorptionsvermögen. Und hier liegt das Problem: Injiziert man ein jodhaltiges Präparat in die Blutbahn, so hat es sich nach einiger Zeit in alle wichtigen Gefäße verteilt. Fertigt man nun zwei Röntgenaufnahmen – eine unterhalb von 33 keV, die andere darüber – und mischt beide Bilder elektronisch, so werden Strukturen mit diesem Kontrastmittel deutlich. Dabei kann die Jodkonzentration so gering sein, daß andere Röntgenverfahren darauf überhaupt nicht reagieren. Nach Ansicht von Experten eröffnet sich hiermit die Möglichkeit, ohne operativen Eingriff oder Kathetereinsatz – d. h. ohne Einführung einer Sonde in die Blutbahn – auch die Herzkranzgefäße sichtbar zu machen.

Ein technologisch interessantes Anwendungsgebiet der Strahlentechnik ist die Produktion ultrafeiner Filter höchster Genauigkeit. Filter werden in sehr vielen industriellen Prozessen entwickelt. Die Kerntechnik hat hinsichtlich Feinheit der Filterporen und Qualität neue Maßstäbe ermöglicht. In der UdSSR, den USA, Japan und anderen Ländern sind entsprechende Verfahren bereits im Einsatz. Als »Arbeitsgeschosse« dienen beschleunigte Ionen oder Protonen. Diese Partikeln durchdringen z. B. dünne Fäden aus Glimmer, Glas oder Plaste. Entlang ihrer Flugbahn hinterlassen sie starke Strahlungsschäden, die für eine chemische Nachbehandlung »anfällig« sind. In einem Ätzzvorgang entstehen dort durchgehende, feinste Kanäle, die zudem alle etwa den gleichen Durchmesser besitzen. So wurden bereits Filter mit Porendurchmessern von 4 millionstel Millimetern hergestellt, die für molekularbiologische Forschungen benötigt werden. Da Bakterien größer als 2 tausendstel Millimeter sind, lassen sich mit Hilfe dieser feinen Filter flüssige Nahrungsmittel wie Bier oder Wein auf kaltem Wege sterilisieren. Es können Zellen verschiedenen Typs voneinander getrennt oder keimfreies Trinkwasser über den Weg einfacher Filterung hergestellt werden. Was das riesige Gebiet der Isotopentechnik angeht, so kann im Rahmen dieses Buches nicht darauf eingegangen werden.

Energie nach Art der Sonne

Stärker als in den 70er Jahren sind zu Beginn der 80er wieder Fragen der energetischen Grundlagenforschung in das Blickfeld öffentlichen Interesses gerückt. Ursache hierfür sind ohne Zweifel die Energiekrise, die permanente Wirtschaftskrise in den westlichen Ländern sowie zunehmende Umweltprobleme. Die Aktivitäten der Forscher richten sich weltweit auf die Verbesserung vorhandener Technologien der Energetik, auf den Einsatz neuer Energiere Ressourcen, wie Sonne, Wind oder Erdwärme, auf die Entwicklung neuer Verfahren und Techniken, wie Kernheizwerke oder magnetohydrodynamische Kraftwerksgeneratoren.

Die größten Anstrengungen aber werden von einigen Ländern auf dem Gebiet der thermonuklearen Synthese, der Verschmelzung von Wasserstoffisotopen zu Helium, unternommen. Energie nach Art der Sonne – diesem Ziel haben sich seit mehr als drei Jahrzehnten Wissenschaftler in vielen Ländern verschrieben. Die Arbeiten zur gesteuerten Kernfusion, um die energieliefernden Prozesse der Sonne auf der Erde zu kopieren, haben sich in diesen drei Jahrzehnten aber als so schwierig erwiesen, daß auch zu Beginn der 80er Jahre noch kein Experiment möglich war, bei dem bei der Verschmelzung von Wasserstoffisotopen auch nur annähernd gleich viel oder gar mehr Energie freigesetzt wurde, als zum Betrieb der entsprechenden Forschungsanlagen aufgewandt werden mußte.

Zu Beginn der 60er Jahre lautete die Prognose der Optimisten unter den Forschern, daß es in etwa 20 Jahren möglich sein werde, die ersten Minisonnen im Labor zu zünden und die freigesetzte Kernbindungsenergie für die Erzeugung von Strom zu nutzen. Zwei Jahrzehnte später gaben die Experten für dieses »Jahrhundertereignis« das Jahr 2000 oder später an. Im Januar 1983 erklärte beispielsweise der Präsident der Akademie der Wissenschaften der UdSSR, Anatoli Alexandrow, in einem Interview: »Natürlich ist es noch ein weiter Weg bis zur Schaffung von Fusionskraftwerken. Wir rechnen damit, daß die Fusionsreaktoren, die alle Komponenten eines Kernfusionskraftwerks haben, erst 1995 existieren werden. Dann wird noch eine verhältnismäßig lange Zeit vergehen, etwa 15 bis 20 Jahre, bis große thermonukleare Kraftwerke entstehen.

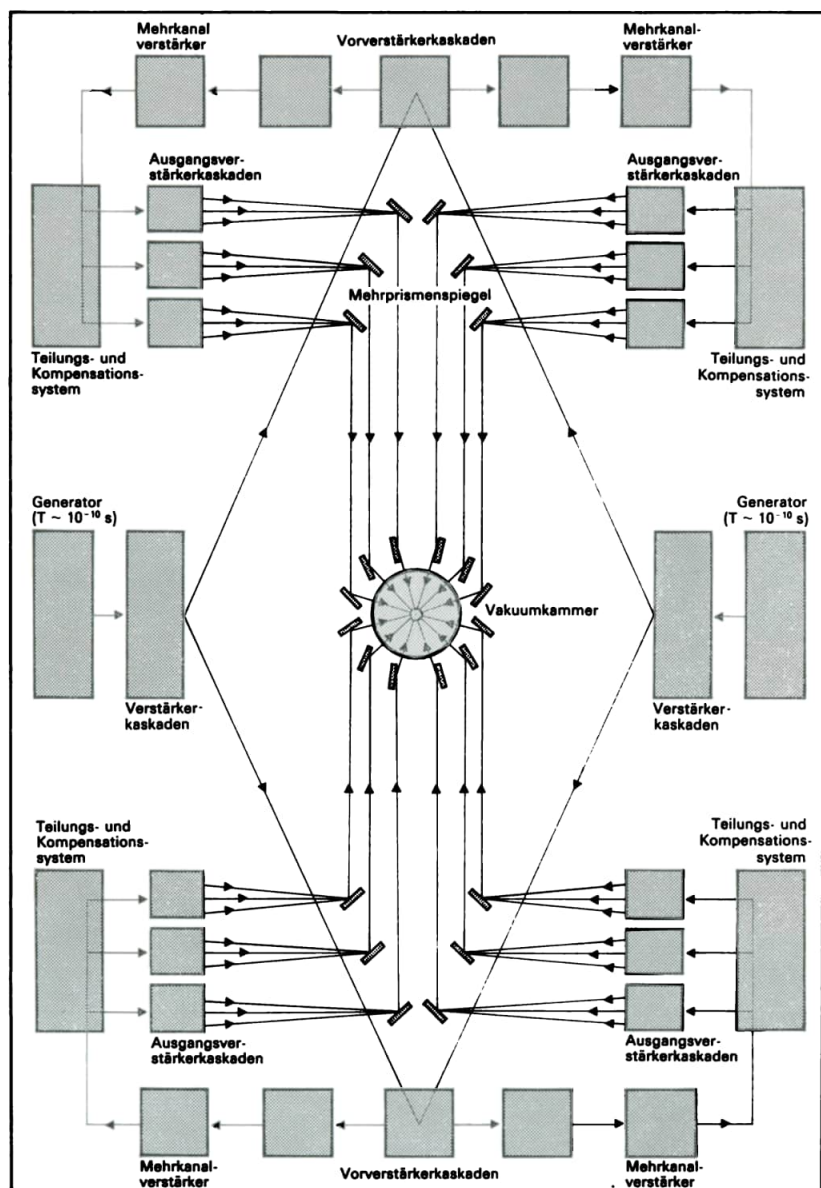
Ungefähr in den Jahren 2025 bis 2030 werden wir über solche leistungsfähigen Kraftwerke verfügen können. Wirtschaftlich zweckmäßig werden wahrscheinlich Anlagen von 10 bis 20 Millionen kW sein, das ist fast das Zehnfache der Leistung heutiger Großkraftwerke. Diese Kapazitäten wären jetzt noch zu groß, um an das gegenwärtige Energiesystem angeschlossen werden zu können. Ich glaube, erst Anfang des nächsten Jahrhunderts ist das einheitliche Energiesystem dazu in der Lage.«

Die Zeitspanne für die Prognose hat sich also überhaupt nicht verringert. Doch es wäre falsch, daraus den Schluß zu ziehen, die Wissenschaft sei bei der Bearbeitung des Problems auf der Stelle getreten.

Vor allem im letzten Jahrzehnt wurden – gegen eine Reihe erheblicher und unerwartet auftauchender Schwierigkeiten – wichtige Erkenntnisse in Theorie und Praxis gewonnen, entstanden immer gewaltigere und erfolgreichere Experimentieranlagen. Bis Mitte der 80er Jahre nahm in den auf diesem Gebiet führenden Ländern – der UdSSR, den USA, Japan und England – eine neue Generation von Kernfusionsanlagen den Betrieb auf, mit der nach Ansicht der Experten der letzte Schritt zu energieliefernden Demonstrationsreaktoren gelingen wird. Die erste Anlage dieser Art, der amerikanische Tokamak TFTR, wurde Anfang 1983 zum ersten »Probeschuß« angeschaltet.

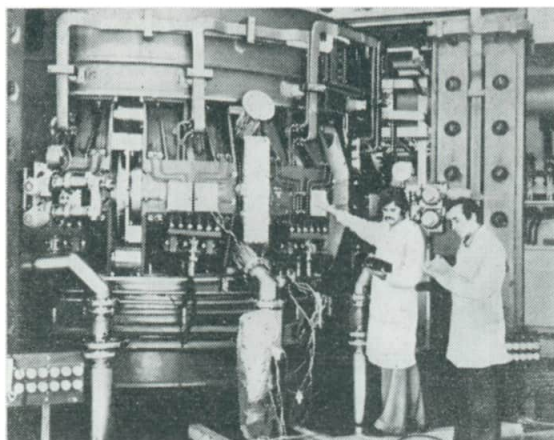
Damit unter irdischen Bedingungen die Isotopenverschmelzung gelingen kann, müssen im Reaktor zwei prinzipielle Bedingungen erfüllt sein: Es muß die elektrische Abstoßung der zu verschmelzenden, positiv geladenen Atomkerne überwunden werden. Das ist zu schaffen, wenn die Kerne eine hinreichend hohe kinetische Energie erhalten, d. h., wenn sie zuvor enorm aufgeheizt werden. Zweitens müssen bei dieser hohen Temperatur auch genügend Atome hinreichend lange zusammengehalten werden. Exakter ausgedrückt, heißt das, es muß das Produkt aus Dichte (Anzahl der Atome pro cm^3) mal Energieeinschlußzeit einen Mindestwert erreichen bzw. übersteigen.

Für die energetisch günstigste aller denkbaren Verschmelzungsreaktionen, nämlich die Fusion des natürlichen Isotops Deuterium mit dem künstlichen überschweren Wasserstoffisotop Tritium, heißt das: In einem Fusionsreaktor muß eine Temperatur von mindestens 46 Millionen K herrschen, bei einem Einschlußkriterium von mehr als $10^{14} \text{ s cm}^{-3}$. Die letztere Forderung wird von den Wissenschaftlern als Lawson-Kriterium bezeichnet.



Strahlführung in der Laserfusionsanlage »Delphine« des Physikalischen Instituts der Akademie der Wissenschaften der UdSSR in Moskau

Doch wie erzeugt man solch hohe Temperaturen? Und welcher Reaktorwerkstoff würde ihnen standhalten? Möglichkeiten, das Lawson-Kriterium zu erfüllen, gibt es: Entweder man erhitzt und



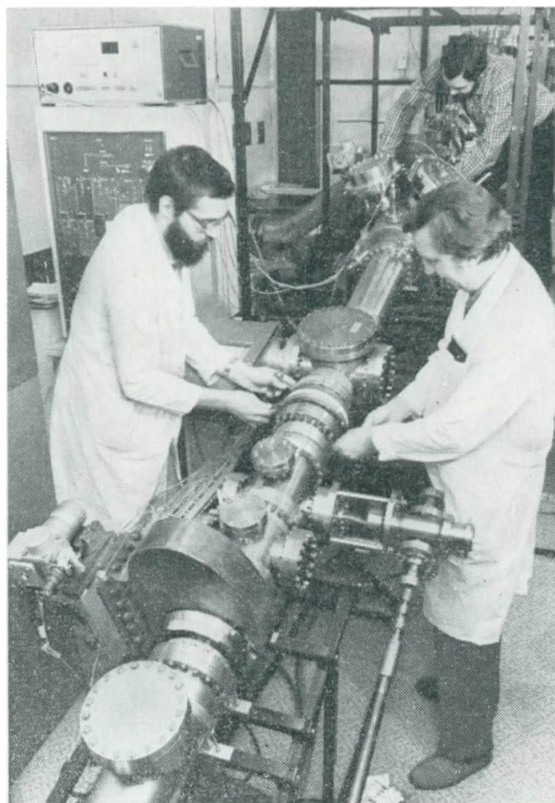
*Wichtige Ergebnisse
für die Kernfusions-
forschung brachte die
Anlage Tokamak 10
des Moskauer
Kurtschatow-Instituts.*

verdichtet ein Plasma kurzzeitig sehr hoch, indem man gleichzeitig aus vielen Richtungen hochenergetische Strahlen aus Laser- und Teilchenkanonen auf die Oberfläche eines Isotopenkügelchens schießt. Das superheiße Plasma bleibt hierbei aufgrund von Trägheitseffekten eine gewisse Zeit auf engstem Raum zusammen. Oder aber man heizt ein Plasma mit Hilfe elektrischer Ströme auf und hält es mittels superstarker Elektromagnete in einer Vakuumkammer zusammen. So kann es ebenfalls nicht mit dem Werkstoff der Reaktorinnenwand in Berührung kommen.

Der zweite Weg hat die bisher beeindruckendsten Ergebnisse gebracht, insbesondere bei den Anlagen vom Typ Tokamak. Sein Funktionsprinzip wurde Anfang der 50er Jahre von sowjetischen Wissenschaftlern ausgedacht und berechnet. Der Name Tokamak entstand aus den Abkürzungen der russischen Wörter für Toroid, Kammer und Magnetspulen. In einer solchen Anlage wird das Wasserstoffplasma in einer ringförmig geschlossenen Vakuumkammer mit bisher meist kreisförmigem Querschnitt mit Hilfe zweier sich überlagernder, starker Magnetfelder gehalten.

Die Aufheizung des Plasmas erfolgt nach dem Transformatorprinzip: Man ordnet den gasgefüllten Vakuumring als Sekundärwindung eines großen Transformators an. Ein starker Spannungsimpuls durch die Primärwicklung induziert dann in der »Sekundärwindung« einen ringförmigen, stark aufgeheizten Plasmastrom. Aber diese Heizmethode allein reicht nicht aus, um die erforderlichen Millionen Kelvin zu erhalten. 1967 wies der sowjetische Physiker Lew Arzimowitsch nach, daß auf diesem Wege nur eine

Eine Anlage für die Diagnose von Fusionsparametern an der neuen Anlage Tokamak 15 in Moskau entwickelten Mitarbeiter des Zentralinstituts für Elektronenphysik der AdW der DDR.



maximale Temperatur von rund 20 Millionen K möglich ist. Zu den wichtigen Erfolgen der bisherigen Fusionsforschung zählt es daher, Methoden zur zusätzlichen Aufheizung des Plasmas gefunden und erprobt zu haben.

Als erfolgversprechendste Varianten bieten sich hierfür die Einspeisung von Hochfrequenzenergie sowie der Einschluß hochenergetischer Neutralteilchenbündel in den Plasmaofen an. Die eingeschossenen Teilchen übertragen dabei ihre kinetische Energie über Stoßprozesse auf die Plasmaionen. Bei dem im Jahr 1986 in Betrieb gegangenen sowjetischen Tokamak T 15 werden z. B. jeweils 5 MW sowohl durch Hochfrequenzheizung als auch durch Neutralteilcheninjektion eingespeist. Die besten Heizwerte wurden bisher bei der Einspeisung von Neutralteilchen erzielt. Es gelang, stromstarke, hochenergetische Wasserstoffionenquellen zu entwickeln. Damit diese elektrisch geladenen Geschosse durch das starke Magnetfeld hindurch auch ins Reaktorinnere gelangen können, müssen

sie natürlich nach der Beschleunigung in speziellen Kammern zunächst neutralisiert werden. Der so erzielte Temperaturrekord liegt gegenwärtig bei 75 Millionen K, aufgestellt Ende 1979 mit dem USA-Tokamak PLT, der mit Hilfe von vier Teilcheninjektoren von jeweils 2,4 MW Leistung »nachgeheizt« wurde.

Allerdings genügten auch bei diesem Experiment die anderen Parameter noch nicht den harten Fusionskriterien. Denn es zeigte sich, daß der magnetische »Plasmakäfig« nicht so dicht ist, daß die eingeschlossenen Partikeln nach einer gewissen Zeit nicht dennoch entweichen würden. Um das für immer längere Zeiträume zu verhindern, muß die Energiedichte des halternden Magnetfeldes größer sein als der nach außen wirkende durch Dichte und Temperatur bestimmte Druck des Plasmas. Der ständigen Erhöhung des Magnetfeldes sind aber Grenzen gesetzt, aus technischen Gründen ebenso wie aus ökonomischen. Damit liegt zugleich die praktisch erreichbare Dichtegrenze in Tokamaks bei etwa 10^{14} bis 10^{15} Atomen pro cm^3 . Um mit diesem Wert dennoch das Lawson-Kriterium zu erfüllen, muß die Energieeinschlußzeit entsprechend groß sein und mindestens 1 s betragen. Die bisher erreichten Spitzenwerte, beispielsweise beim sowjetischen Tokamak T 10, liegen derzeit aber erst bei einer zehntel Sekunde.

Und hier liegt eine weitere entscheidende Erkenntnis der letzten Jahre: Die Einschlußzeit kann bei gleichem Magnetfeld erhöht werden, wenn der Querschnitt des Plasmarings vergrößert wird. Durch größere Dimensionierung der Tokamaks ist demnach das Lawson-Kriterium zu realisieren. Dieser Erkenntnis tragen die Tokamaks der neuen Generation bereits Rechnung. In der Sowjetunion ist das die Anlage T 15, in den USA das Projekt TFTR, in Japan der JT 60 und in England unter Beteiligung weiterer westeuropäischer Länder der Tokamak JET.

Die ersten Experimente am TFTR der Universität Princetown im USA-Bundesstaat New Jersey wurden um den Jahreswechsel 1982/83 vorgenommen. Die Fertigstellung der Anlage mit dem Einbau einer Neutralteilchen-Injektionsanlage zur zusätzlichen Aufheizung des Plasmas war für Mitte der 80er Jahre vorgesehen. Der Bau der Fusionsmaschine hat sieben Jahre gedauert und 314 Millionen Dollar gekostet. Damit sind zunächst Experimente mit dem schweren Wasserstoffisotop Deuterium, später mit dem Gemisch aus Deuterium und dem radioaktiven Tritium vorgesehen.

Mit diesem Reaktor wird sich die für die Fusion benötigte hohe Temperatur zwar erzeugen, nicht aber genügend lange Zeit auf-

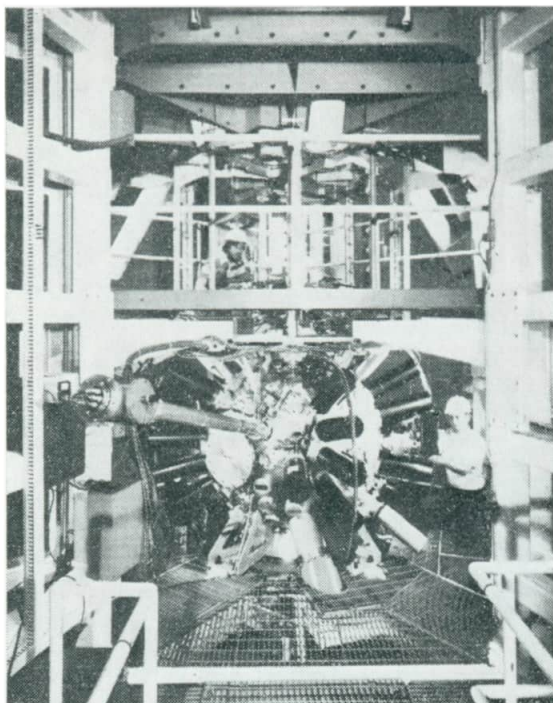
rechterhalten lassen. Westeuropäische Physiker setzen in dieser Hinsicht größere Hoffnungen in ihr JET-Projekt, das Ende 1982 in Betrieb ging. Bei ihm ist vorgesehen, im Laufe der etwa achtjährigen Betriebszeit die Heizleistung nach und nach immer weiter zu erhöhen. Die ersten »Schüsse« mit dem vielversprechenden Isotopengemisch Deuterium/Tritium sind beim JET aber erst 1987/88 eingeplant.

Der Tokamak T 15 soll mit Hilfe der bereits erwähnten Zusatzheizungen nach den Probelaufen eine Plasmatemperatur von 70 Millionen K bringen. Die Magnetwicklungen der Toroidalkammern bestehen aus einer supraleitenden Niob-Zinn-Legierung. Das ermöglicht es, den großen Aufwand an Elektroenergie für die ohmsche Aufheizung des Plasmas zu senken. Praktische Erfahrungen mit dem Einsatz supraleitender Magneten wurden am Moskauer Kurtschatow-Institut bereits mit dem Tokamak T 7 gewonnen. Während bei der Anlage T 10 für jeden »Schuß« kurzfristig die Leistung eines 200-MW-Kraftwerkes eingespeist werden muß, begnügte sich Tokamak T 7 mit einem Tausendstel dieses Wertes.

Im April 1984 wurde in Culham (Großbritannien) der »Joint European Torus« (JET) offiziell in Betrieb genommen. Die japanische Anlage JT 60 war Ende des gleichen Jahres in Naka, 100 km südöstlich von Tokio, fertiggestellt. Der Forschungsbetrieb begann im Frühjahr 1985. Beim JT 60, dessen Bau rund 950 Millionen Dollar kostete, dienen 14 Neutralteilcheninjektoren sowie ein 2-GHz-Mikrowellensender zum Aufheizen des Plasmas. Während der amerikanische TFTR und der westeuropäische JET Ende der 80er Jahre auch zu Versuchen mit Deuterium und Tritium übergehen sollen, plant man am japanischen JT 60 nur Versuche mit Wasserstoff und Deuterium.

Wissenschaftler entwarfen bereits ein noch kühneres Projekt. Da die Kosten für derartige Anlagen immer rascher wachsen und beim gegenwärtigen Stand die Summe von etwa 500 bis 1 000 Millionen Rubel bzw. Dollar je Tokamak erreicht haben, hat die Internationale Atomenergieorganisation in Wien einen Vorschlag der UdSSR aufgegriffen, das Konzept eines international entwickelten und betriebenen Tokamaks zu lenken und zu leiten.

Eine internationale Wissenschaftlergruppe aus den vier führenden Ländern der Fusionsforschung hat bereits konkrete Projektunterlagen für die Anlage INTOR vorgelegt. Sie könnte bei günstiger politischer Weichenstellung Fusionsexperimente mit positiver Energiebilanz, d. h. mit einem Gewinn an Elektroenergie unter dem

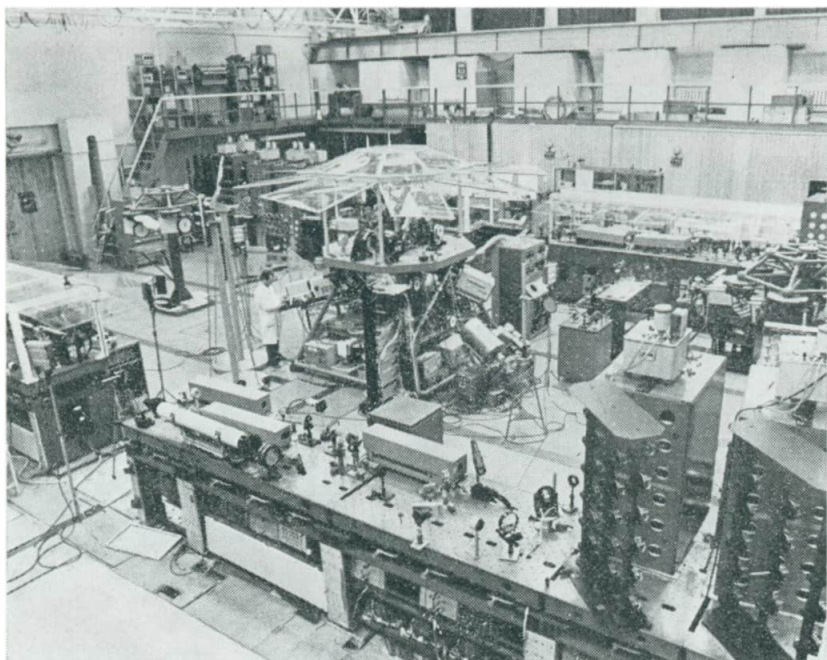


*Targetkammer für
die amerikanische
Laserfusionsanlage
Shiva – im Hinter-
grund rechts ein
Wissenschaftler*

Strich, ermöglichen. Der Durchmesser des Plasmaringquerschnitts soll nach den heutigen Plänen über 2,5 m messen. Der Durchmesser der Ringkammer selbst wird rund 10 m betragen. Durch den »Supertransformator« werden Stromstöße von 6,4 Millionen Ampere jagen und das von einem 5,5-Tesla-Magnetfeld gehaltene Plasma jeweils 100 s lang auf 100 Millionen K erhitzen. Leider kamen die vorbereitenden Arbeiten an diesem Projekt zu Beginn der 80er Jahre auf Grund des von den USA betriebenen Hochrüstungs- und Konfrontationskurses ins Stocken.

Wenn das Tokamakprinzip physikalisch-technisch ausgereift und vollendet realisiert ist, beginnen die ebenfalls umfangreichen technologischen Arbeiten, um den energetischen Zyklus zu vervollständigen, d. h., um die bei der Fusion freigesetzte Kernenergie letztlich in elektrischen Strom umzuwandeln. Zu lösen sind dabei Werkstoffprobleme, Anforderungen an den Maschinen- und Anlagenbau sowie Fragen des Strahlenschutzes und der Beseitigung radioaktiver Abfälle.

Während die Arbeitsergebnisse der Tokamak-Fusionsforscher heute von der Fachwelt optimistisch bewertet werden, sind die ent-

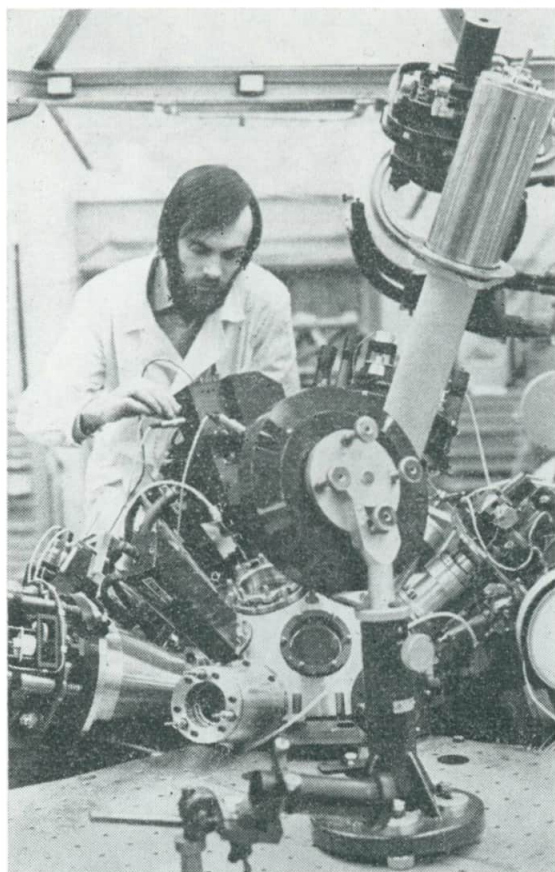


Experimentierhalle für die sowjetische Laserfusionsanlage Delphin

sprechenden Experimente mit Laser- und Teilchenkanonen auf eine Reihe unvorhergesehener Schwierigkeiten gestoßen. Noch zu Beginn der 70er Jahre hatten US-amerikanische Physiker am Lawrence Livermore Laboratory für die Mitte des Jahrzehnts eine positive Energiebilanz bei derartigen Experimenten vorausgesagt. Bis heute ist man diesem Wunschziel aber kaum nennenswert näher gekommen.

In Livermore wurde für derartige Experimente die 20strahlige Laseranlage »Shiva« errichtet, die es ermöglicht, kurzfristig eine Energie von 10000 Joule auf ein Kügelchen aus einem Gemisch gefrorenen Deuteriums und Tritiums zu übertragen. Doch die erzielten Resultate blieben weit unter den Erwartungen. Aufgrund dieser Ergebnisse waren amerikanische Physiker 1981 der Meinung, daß auch das für einen Kostenaufwand von 137 Millionen Dollar gebaute Nachfolgesystem »Shiva-nova«, das Mitte der 80er Jahre fertiggestellt wurde und mit dem Strahlenergien von 100 000 Joule übertragen werden können, keine durchschlagenden Ergebnisse erwarten läßt.

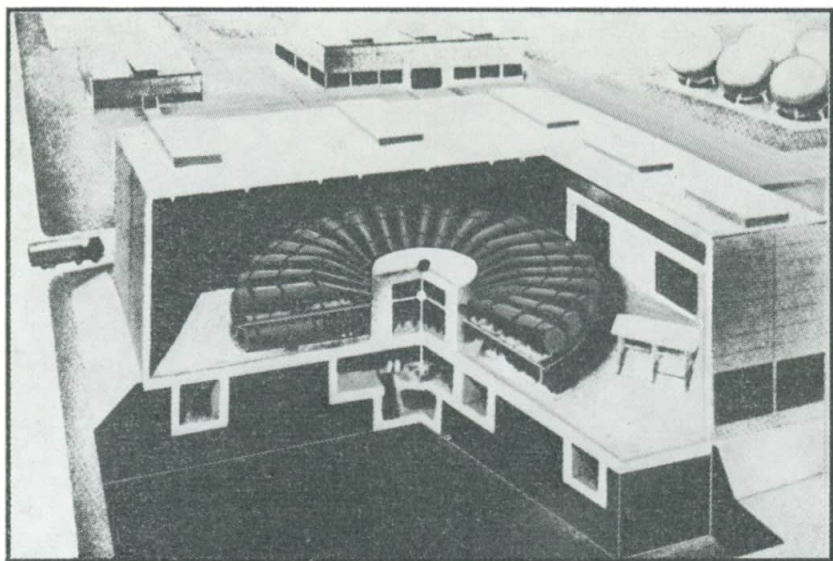
Zu ähnlichen Ergebnissen führten auch die analogen Fusions-



*Justierarbeiten an
der Fusionskammer
der Anlage Delphin*

experimente in Los Alamos. Während in Livermore Festkörperlaser zum Einsatz gelangen, arbeiten die Wissenschaftler im Fusionsforschungszentrum von Los Alamos mit CO_2 -Gaslasern. Auch dort sollen mit der neuen Anlage »Antares« einmal Strahlenenergien von maximal 100 000 Joule im Impulsbetrieb zur Verfügung stehen.

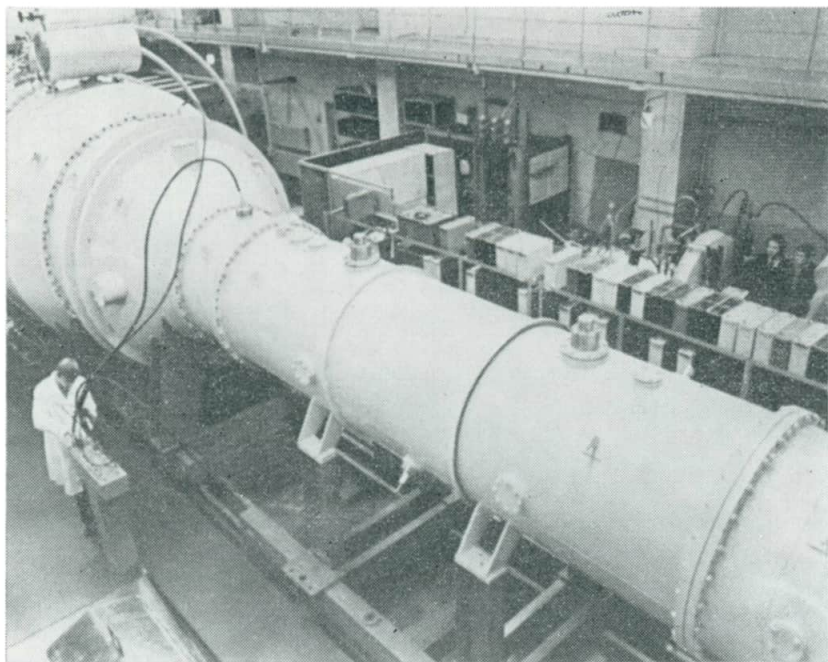
Die unerwarteten Schwierigkeiten rühren zum einen aus störenden Wechselwirkungen zwischen dem hochenergetischen Lichtstrahl sowie dem Werkstoff für die erforderlichen optischen Systeme her; zum anderen erweist sich die Reaktion zwischen Laserstrahl und Targetoberfläche als sehr kompliziert. Das bessere Verständnis dieser Wechselwirkungen, so wurde in letzter Zeit auf internationalen Fachtagungen unterstrichen, würde es ermöglichen, gleiche oder sogar bessere Fusionsergebnisse mit Lasersystemen geringerer Strahlleistung zu erzielen.



Schnitt durch die geplante Fusionsanlage Angara 5 des Kurtschatow-Instituts

Revidiert werden mußten in den letzten Jahren auch die theoretischen Vorstellungen über die Mindestbedingungen, bei denen eine durch Laserlicht induzierte Kernverschmelzung »zündet«, um dann gewissermaßen als Kettenreaktion selbsttätig weiterzulaufen. Die nötige Zündenergie wird von amerikanischen Wissenschaftlern nunmehr auf etwa 300 000 Joule geschätzt, das ist dreimal soviel, wie die neuen Lasergroßanlagen zu leisten vermögen. Skeptiker schließen aber nicht aus, daß Erkenntnisse der kommenden Jahre daraus leicht auch eine Million Joule werden lassen. Das hätte zur Folge, daß künftig noch größere Laserkanonen und auch größere Targets eingesetzt werden müßten. Die impulsartige Energiefreisetzung pro Laserschuß in solch großen Systemen wäre in ihrer Wirkung aber mit Explosionen von einer Tonne TNT gleichzusetzen. Daraus ergeben sich natürlich beträchtliche Probleme für die konstruktive Gestaltung und den Bau von industriellen Fusionskammern künftiger Kraftwerke.

Aber dennoch, auch auf diesem Gebiet der Fusionsforschung gehen die langfristig angelegten Forschungsprogramme zielstrebig weiter. Fortschritte sind beispielsweise nicht nur über die Laser selbst, sondern auch über die Gestaltung der Targets zu erzielen. Sie bestehen heute aus winzigen Kügelchen aus Glas oder Polymerenwerkstoff, die mit Deuterium oder Deuterium-Tritium gefüllt



Elektronenbeschleuniger für die Kernfusionsanlage Angara 5 des Moskauer Kurtschatow-Instituts

sind. Auch Mehrschichttargets sind in der Erprobung. Bei der Produktion solcher Mehrschichttargets können die unterschiedlichen Schichten in der Dicke mit einer Gleichmäßigkeit von zwei hunderttausendstel Millimeter ($2 \cdot 10^{-5}$ mm) aufgetragen werden, ein Wunderwerk moderner Experimentierkunst. Bei der Laserkompression werden diese Hüllen explosionsartig verdampft, wobei die entstehende Druckwelle den Inhalt der winzigen Kügelchen extrem verdichtet.

Was Laserstrahlung vermag, kann in energetischer Hinsicht auch andere Teilchenstrahlung verrichten. Im Moskauer Kurtschatow-Institut wird daher neben den Tokamakexperimenten auch intensiv an Kompressionsexperimenten mit Hilfe von Elektronenbeschleunigern gearbeitet. Bei der im Aufbau befindlichen Anlage »Angara 5« werden insgesamt 48 identische Linearbeschleuniger um einen axialen Punkt angeordnet. In ihm sollen einmal die Targets aus allen 48 »Rohren« gleichzeitig unter Beschuß genommen werden. Noch laufen erst Vorexperimente.

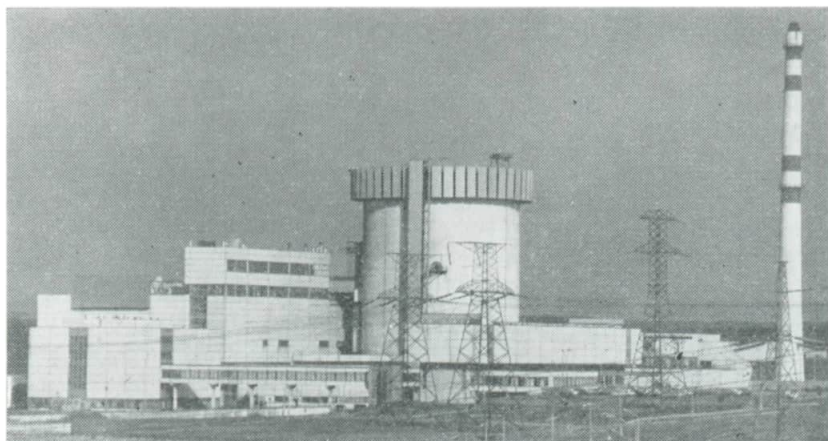
Heizen ohne Öl und Kohle

Kernkraftwerke zählen heute längst zum industriellen Alltag. Ende 1981 hatten bereits 23 Länder insgesamt 266 Kernkraftwerksreaktoren in Betrieb. Die dort installierte Leistung belief sich auf 166 000 MW. Im Vergleich zum Vorjahr betrug damals die Zunahme an nuklearer Kraftwerkskapazität weltweit rund 15 %. Gemessen am Anteil des durch Kernkraft erzeugten Stromes am Gesamtelektroenergieaufkommen, nahm Frankreich zu diesem Zeitpunkt mit 37,3 % die führende Position ein. Dort war eine nukleare Kraftwerkskapazität von 23 000 MW installiert. In den USA waren das 60 000 MW, in der Sowjetunion und Japan jeweils etwa 15 500 MW und in der DDR etwa 1 800 MW, die mit rund 11 % nuklearem Anteil an der Elektroenergieproduktion im vorderen Feld jener Länder mit Kernkraftwerken liegt.

Auch in den ersten drei Jahren dieses Dezenniums hat die Kernenergie weltweit beachtlichen Zuwachs gehabt, vor allem auch in jenen Ländern, in denen aus unterschiedlichen Gründen und von verschiedenen Seiten eine Antikernenergie-Kampagne geführt wird. In der BRD beispielsweise stieg die Produktion von »Atomstrom« 1981 im Vergleich zum Vorjahr um 22 % auf 53,5 Milliarden kWh und erreichte einen Anteil von 17 % an der gesamten öffentlichen Stromerzeugung. Im folgenden Jahr, also 1982, betrug die Steigerung erneut 20 %. Von elf Leistungskraftwerken wurden in jenem Jahr 63,6 Milliarden kWh Strom erzeugt.

In den USA wurde 1980 erstmals mehr Strom aus der Kernkraft als aus ölgefeuerten Werken gewonnen. In einzelnen Bundesstaaten des Mittelwestens und Nordostens der USA wurden zu dieser Zeit 50 % des Stromes auf der Basis der Uranspaltung gewonnen.

Obgleich Kernkraftwerke zur Erzeugung elektrischen Stroms bereits seit 1954, also seit nahezu drei Jahrzehnten, betrieben werden, ist der Einsatz von Kernkraft ausschließlich für Heizzwecke noch gänzlich unüblich. Das soll künftig anders werden. Denn auch hier lassen sich beträchtliche Mengen Erdgas, Erdöl oder Kohle einsparen, die zum Verbrennen ja eigentlich zu schade sind. Auch für Heizwerke gilt die Überschlagsrechnung, daß 1 kg Spalt-Uran die Energiemenge von etwa 9 000 t Steinkohle oder 24 000 t Braun-



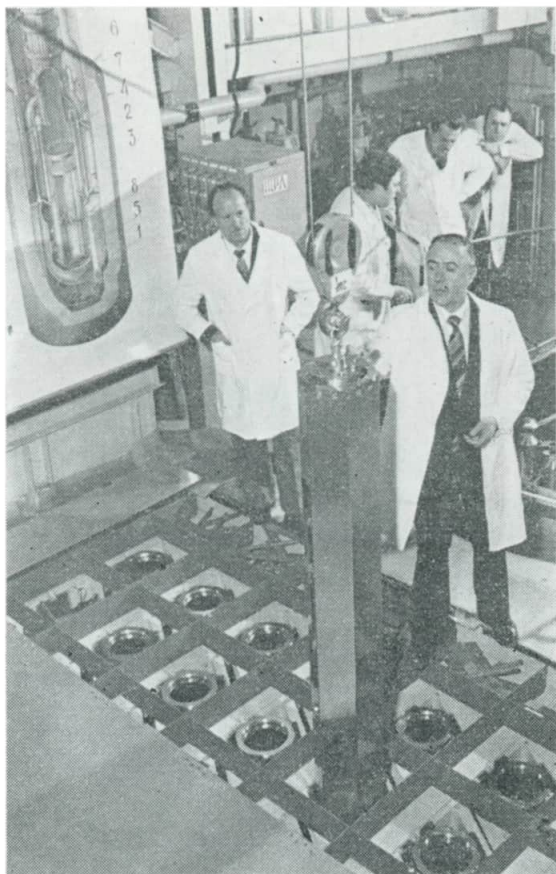
*Fünfter Block des Kernkraftwerkes Nowoworonesh mit
1000-MW-Druckwasserreaktor und Containment-Bauwerk*

kohle liefern kann. Für die Versorgung der Städte und Industrieanlagen mit Heißwasser und Dampf, so zeigen sowjetische Untersuchungen, werden im übrigen anderthalbmal mehr Brennstoffe benötigt als in den entsprechenden Kraftwerken für die Stromerzeugung. Parallel mit der Entwicklung der Rohstoffpreise auf den Weltmärkten und mit der Rohstoffsituation überhaupt rückten deshalb spezialisierte Kernheizwerke in den Mittelpunkt des Interesses.

Pionierarbeit leistet hier – wie so oft bei der friedlichen Nutzung der Kernenergie – die Sowjetunion. Bis 1986 sollen für die Städte Gorki und Woronesh die ersten nuklear »befeuernten« Heizwerke für Fernwärme fertiggestellt sein. Jedes dieser Werke wird zwei Kernreaktoren von je 500 MW thermischer Leistung haben. Obwohl in ihnen physikalisch der gleiche Spaltprozeß wie in Reaktoren für den Kraftwerksbetrieb abläuft, unterscheiden sich die nuklearen Ausrüstungen für Heizwerke von denen für Elektrizitätswerke erheblich. In Kraftwerken soll der erzeugte Dampf Turbinen antreiben, also mechanische Arbeit leisten. Dazu muß er unter hohem Druck stehen. Moderne Druckwasser-Leistungsreaktoren erzeugen immerhin Wassertemperaturen von über 300 °C bei Drücken bis zu etwa 16 MPa (160 at). Damit sind hohe Forderungen an die Festigkeit des eingesetzten Materials, an die Betriebssicherheit sowie den Havarieschutz gestellt.

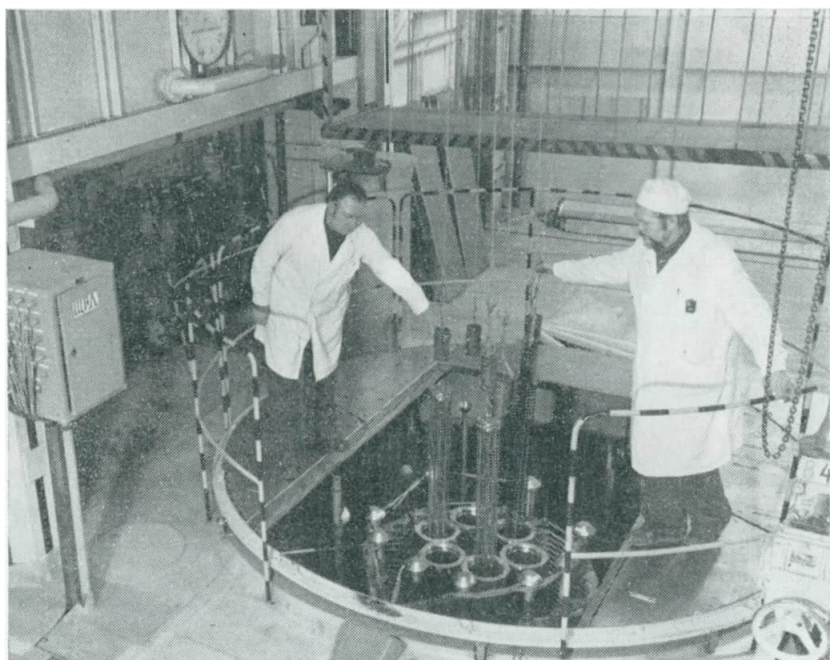
Bei Kernheizwerken hingegen interessiert nicht der Arbeitsdruck

*Demonstration an
einem experimentellen
Reaktor für ein
Kernheizwerk im
Kurtschatow-Institut*



des in speziellen Aggregaten erzeugten Dampfes, sondern nur die freigesetzte Wärme im Bereich bis maximal 150°C . Das ermöglicht es, den Reaktorinnendruck auf ein Zehntel zu reduzieren, auf etwa $1,6\text{ MPa}$ (16 at). Diese technologisch bedingte Vereinfachung führt dazu, daß der Investitionsaufwand bei Heizwerken deutlich unter dem für Kernkraftwerke bzw. kombinierte Heizkraftwerke liegt. Allerdings, so schränkte der Direktor des Moskauer Instituts für Kernenergie »I. W. Kurtschatow«, Prof. Dr. Viktor A. Sidorenko, in einem Aufsatz der sowjetischen Zeitschrift »Nauka i shisn« ein, nutzen Heizwerke den Kernbrennstoff energetisch schlechter aus als ihre bereits bewährten »Vorfahren«.

Ausgerüstet werden die neuen Heizwerke für Gorki und Woronesh mit Druckwasserreaktoren vom Typ AST 500. Im Druckgefäß des Reaktors befinden sich die Brennstoffkassetten. Sie werden von



Im Reaktor für Heizwerke herrscht ein vergleichsweise geringer Druck, was technisch einfache Lösungen ermöglicht.

Wasser umspült, das die gewonnene Kernspaltungswärme fortführt. Der Name Druckwasserreaktor rührt daher, daß darin durch entsprechende Druckerhöhung das Wasser auch oberhalb 100°C daran gehindert wird, Dampftröpfchen zu bilden.

Das im Reaktor überhitzte Wasser gelangt über Rohrleitungen nach draußen, wo es im Wärmetauscher seine Energie an einen zweiten Wasserkreislauf abgibt. Über einen weiteren Wärmetauscher wird die Wärme schließlich auf einen dritten Kreislauf übertragen. Nunmehr kann das heiße Wasser mit einer Temperatur zwischen 120° und 150°C bzw. der erzeugte Dampf zu den Verbrauchern in die Stadt geleitet werden.

Im Gegensatz zu Kraftwerksreaktoren ermöglichen es die Bedingungen für Heizwerksreaktoren, dort auf Umwälzpumpen für das Kühlwasser zu verzichten. Das Wasser zirkuliert von selbst durch die Reaktorordnung aufgrund der unterschiedlichen Dichte von heißerem und kälterem Wasser. Dieser natürliche Kühlmittelumlauf schließt von vornherein einige denkbare Havariemöglichkeiten aus, die z. B. beim Ausfall von Umwälzpumpen auftreten könnten und

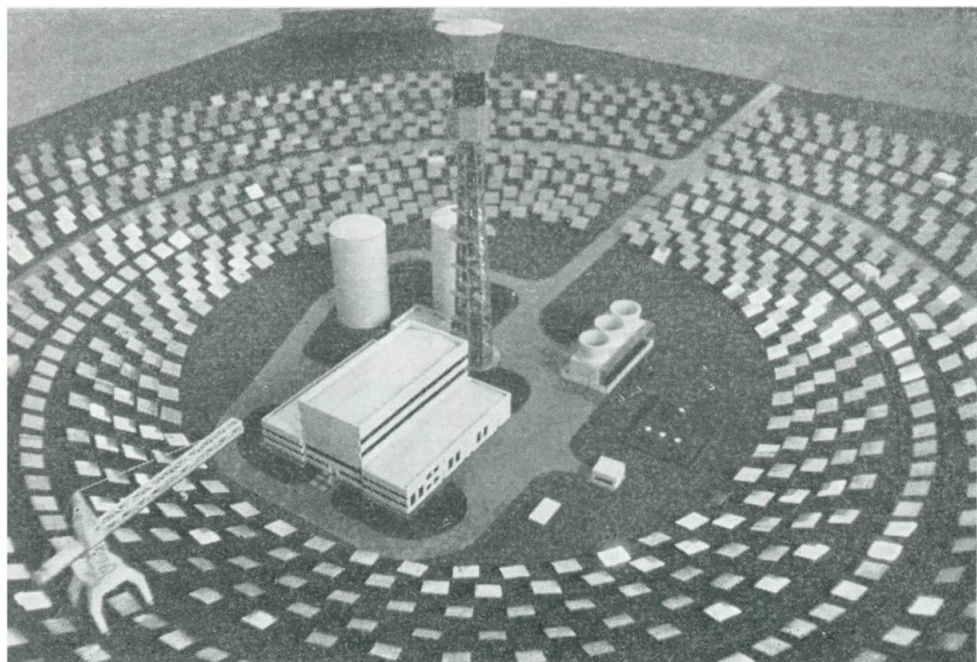


Kleines experimentelles Sonnenkraftwerk in Turkmenien

denen in Kraftwerken durch ein ausgeklügeltes und mehrfach angelegtes System von Havarieschutzeinrichtungen zuverlässig vorgebeugt wird. Da der Druck im Zwischenkühlkreis während des Betriebes niedriger sein muß als im Heizkreislauf, kann aus ihm selbst bei Lecken kein Wasser in die Wohngebiete gelangen.

Die von Natur aus gegebene hohe Betriebssicherheit von Kernheizwerken und ihr geringer Platzbedarf ermöglichen es, sie in unmittelbarer Nähe der Städte zu errichten. Das ist wegen der erforderlichen Rohrtrassen, die immer zu energetischen Verlusten führen, von großem Vorteil. Wie die Ergebnisse gründlicher Forschungsarbeiten in der UdSSR zeigen, gibt es gegen einen solchen Standort auch aus Gründen des Strahlenschutzes keine Bedenken.

Erfahrungen mit nuklearen Heizsystemen liegen seit Jahren vor. So wird die nördlich des Polarkreises gelegene sibirische Goldgräberstadt Bilibino seit 1974 mit Fernwärme beheizt, die aus Kernreaktoren stammt. Und in Schewtschenko, am Ufer des Kaspischen Meeres gelegen, liefert ein Kernkraftwerk mit schnellem Brutreaktor seit 1973 Energie, um Meerwasser-Entsalzungsanlagen zu beheizen. In beiden Fällen erzeugen die nuklearen Anlagen aber hauptsächlich Strom; die genutzte Heizwärme wird aus diesem Prozeß lediglich abgezweigt. Gleich anderen Anlagen gibt auch das 4000 MW-Kernkraftwerk bei Leningrad Niedertemperaturwärme für Heizungszwecke ab.



Modell eines 5-MW-Sonnenkraftwerkes, das auf der Krim errichtet wird

Die Werke von Gorki und Woronesh hingegen werden ausschließlich Heizenergie bereitstellen – nicht nur ökonomisch effektiv, sondern auch überaus umweltfreundlich, ohne die bei klassischen Heizwerken so lästige Ruß- und Rauchgasemission.

Während in der UdSSR die ersten Großheizwerke entstehen, sind ähnliche Vorhaben in anderen Ländern noch im Planungs- bzw. Projektstadium. In Schweden z. B. wurde ein Projekt ausgearbeitet, bei dem ein kleiner Druckwasserreaktor von 200 MW Wärmeleistung für den Heizenergiebedarf einer Stadt mit 100 000 Einwohnern vorgesehen ist. Der Reaktor erzeugt 115 °C heißes Wasser. Die Temperatur im Fernheizungsnetz soll dann schließlich noch 95 °C betragen. Auch bei diesem Projekt ist vorgesehen, die Anlagen in unmittelbarer Nähe der zu beheizenden Wohngebiete zu errichten, in unterirdischer Bauweise, wie die Fachzeitschrift »Nucleonics Week« berichtete. An der Entwicklung des Reaktors »Secure« sind schwedische und finnische Firmen gemeinsam beteiligt.

Das Stadium des erfolgreichen Großversuchs hat auch ein Projekt in der BRD erreicht, bei dem später ebenfalls nuklear erzeugte Fernwärme eingesetzt werden soll. Wärmeträger ist hier aber nicht

erhitztes Wasser, sondern ein Gas. Das recht aufwendige und komplizierte System hat seine Funktionsfähigkeit in einem 600stündigen Probelauf unter Beweis gestellt und soll nun von der Kernforschungsanlage Jülich weiter betrieben werden.

Bei diesem BRD-Projekt »Nukleare Fernwärme« werden zunächst unter Energiezufuhr Methan und Wasserdampf in Wasserstoff und Kohlenoxide umgewandelt. Die in diesem kalten Gas gespeicherte chemische Energie wird mit dem Gas über Rohrtrassen zum weit entfernten Verbraucherort geleitet und dort in speziellen Anlagen wieder in Wärme zurückverwandelt. Die für diesen Prozeß benötigte Primärenergie soll in der Endphase einmal ein gasgekühlter Hochtemperaturreaktor liefern, wie er als spezielle Forschungsanlage bereits existiert.

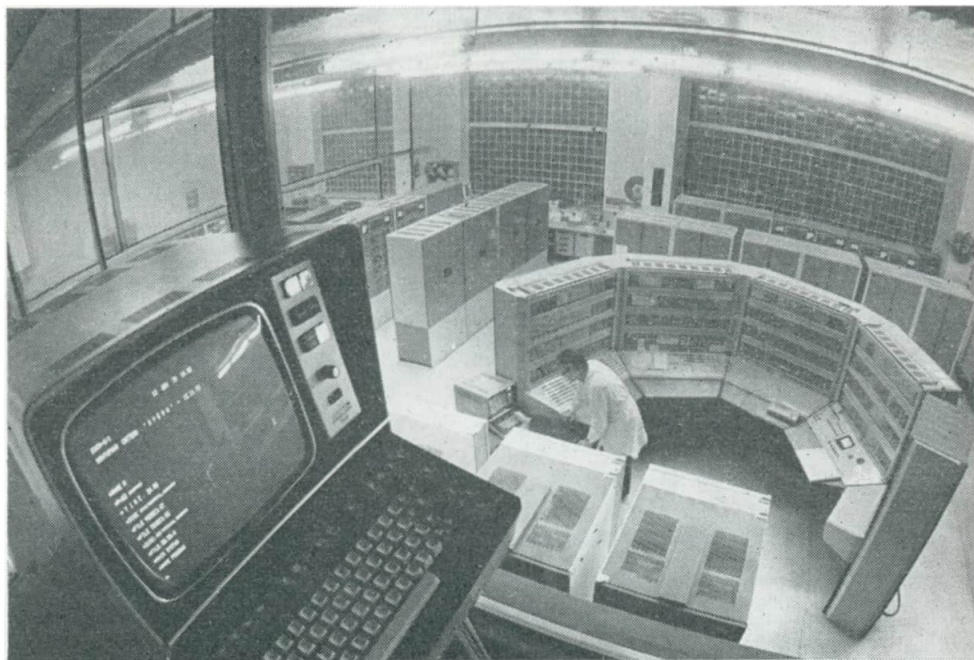
Mit nuklear erzeugter Fernwärme sind die künftig interessanten und wirtschaftlich effektiven Einsatzmöglichkeiten der Kernenergie noch längst nicht erschöpft. Vor ihrer Verwendung für Prozesse der Metallurgie oder der Großchemie bleibt aber noch eine Vielzahl von Forschungsaufgaben zu lösen.

Wie entsteht Mikroelektronik?

Zu den für die gesellschaftliche Praxis bedeutsamsten Ergebnissen physikalischer und technischer Forschung im letzten Jahrzehnt zählt ganz ohne Frage die Mikroelektronik. Ihr liegt keine einzelne grundlegende Entdeckung der jüngeren Zeit zugrunde. Das genutzte physikalische Grundprinzip ist eine besondere Eigenschaft an den Grenzflächen bestimmter Halbleitermaterialien, die von vorhandenen elektrischen Potentialen abhängig ist und beeinflusst werden kann. Dieses Grundprinzip wurde vor rund 40 Jahren für den Bau der ersten Transistoren technisch verwirklicht.

Wie man solche Grenzflächen herstellt, ihre elektronischen Eigenschaften wunschgemäß verändert, wie man vor allem die Größe der elektronisch wirksamen Halbleiterbereiche dramatisch reduziert, das ist seit den 70er Jahren Gegenstand einer intensiven und überaus erfolgreichen halbleiterphysikalischen und technologischen Forschung. Die Entwicklung der Mikroelektronik von der Erfindung des Transistors im Jahre 1948 bis zur höchstintegrierten Schaltkreistechnik (VLSI – Very-Large-Scale-Integration) am Anfang der 80er Jahre hat in der Geschichte der Technik kein Beispiel. Sie ist Ergebnis einer ganzen Serie von Entdeckungen und Erfindungen auf vielen Gebieten. Und sie ist ein Resultat der Tatsache, daß Gerätetechnik und Methoden physikalischer Grundlagenforschung – wie Einsatz von Beschleunigern und Teilchenstrahlen – Einzug in die Praxis des industriellen Alltags gehalten haben. So wurde es möglich, daß auf der Fläche, die 1948 für nur einen Transistor benötigt wurde, rund 30 Jahre später über 100 000 solcher elektronisch aktiver Übergangsbereiche herstellbar waren und ein Ende dieser Entwicklung noch nicht abzusehen ist.

Der technologisch grundlegende Erfolg der Forschung besteht darin, daß man in den letzten Jahren gelernt hat, in immer kleinere Bereiche der für das Auge unsichtbaren Mikrowelt vorzudringen, Strukturen von winzigen Bruchteilen eines Millimeters sichtbar zu machen, »Werkzeuge« zu schaffen, um dort Veränderungen herbeizuführen und Meßoperationen vorzunehmen. Ein Beispiel ist die Entwicklung der Elektronenmikroskopie. Damit sieht man heute sogar Atome auf dem Bildschirm.



Computer und andere moderne Mittel und Verfahren der Informationsverarbeitung sind heute eine grundlegende Voraussetzung für erfolgreiche Grundlagenforschung – hier das Rechenzentrum des VIK Dubna.

Einen vorläufigen »Rekord« markierten 1980 japanische Wissenschaftler der Universität von Osaka: Erstmals konnten sie einzelne Atome des Elementes Gold abbilden. Das war immerhin eine wissenschaftliche Sensation! Die Forscher verwendeten dazu ein speziell umgebautes 100-keV-Elektronenmikroskop mit einem Rekorderauflösungsvermögen von 0,5 Angström (0,000 000 05 mm!). Mit dem Strahl dieses Gerätes durchleuchteten sie eine nur 15 millionstel Millimeter dicke Goldschicht. Um damit auf dem Bildschirm des Gerätes einzelne Atome abzubilden, bedurfte es freilich einiger elektronenoptischer Tricks, bei denen physikalische Besonderheiten der Elektronenbeugung an Kristallgittern ausgenutzt wurden, sowie eines nicht unerheblichen Rechneraufwandes.

Das Resultat war um so verblüffender: Das Bild zeigte deutlich erkennbar in geordneten Reihen die einzelnen Goldatome. Schwarze Flecke kennzeichneten die Bereiche der Atomkerne, die von weißen, unregelmäßigen Flecken umgeben waren – die Bereiche der Elektronenhüllen. Deutlich zu erkennen war auf dem Mikroskopbild-

schirm auch das Vibrieren der einzelnen Goldatome im Gitter, von denen einige von Zeit zu Zeit spontan ihre Plätze tauschten.

Solche Arbeiten sind mit der Mikroskopie früherer Jahrzehnte längst nicht mehr zu vergleichen. Nicht nur die Leistungsfähigkeit der Geräte wurde wesentlich gesteigert, sondern zugleich wurden auch immer weitere Spezialverfahren für den Einsatz von Elektronenstrahlen in der Mikroskopie sowie Verfahren der elektronischen Bildbearbeitung und Bildauswertung entwickelt. Neben den klassischen Durchstrahlungsmikroskopen, bei denen der Strahl das abzubildende Objekt durchdringt, ist die Rasterelektronenmikroskopie eines der bekanntesten neuen Verfahren. Mit ihr lassen sich insbesondere Bilder von Oberflächen bei erstaunlicher Tiefenschärfe und Vergrößerung gewinnen.

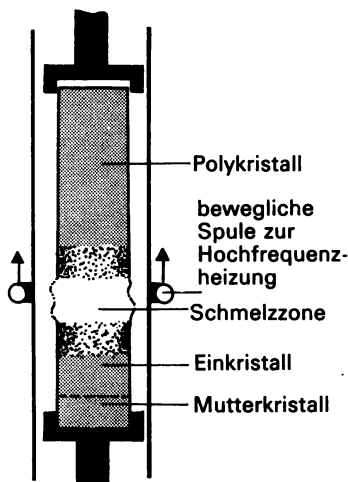
Um welche gerätetechnischen Dimensionen es sich heute in der Elektronenmikroskopie handelt, wird deutlich, wenn man weiß, daß die leistungsfähigsten Durchstrahlungsmikroskope mit Beschleunigungsspannungen für den Teilchenstrahl von mehr als 1 Million Volt arbeiten.

Das Prinzip des Elektronenmikroskops läßt sich andererseits auch variieren, um eine Meßsonde für die Untersuchung winzigster Materialbereiche zu erhalten. Ein hochbeschleunigter, scharf gebündelter Teilchenstrahl wird dazu präzise auf den zu untersuchenden Materialpunkt gelenkt. Aufgrund der nun entstehenden Wechselwirkungsreaktionen können Rückschlüsse auf die physikalisch-chemischen Eigenschaften »vor Ort« gewonnen werden. Parallel dazu gibt es heute viele weitere Analysemethoden für die Untersuchung winziger Ortsbereiche. Und der Elektronenstrahl ist auch zu einem wichtigen Hilfsmittel für die Mikroelektronik geworden, zur Herstellung immer leistungsfähigerer Chips.

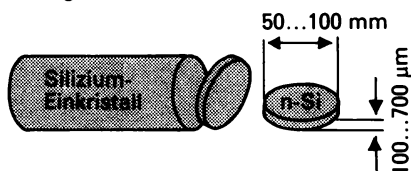
Im Gefolge von technologischen Neuerungen gelang es in den 70er Jahren, die Strukturabmessungen in integrierten Schaltkreisen etwa alle zwei Jahre zu halbieren. Außer technischen Gesichtspunkten im Detail, auf die nicht näher eingegangen werden soll, bedeutet das zweierlei: Erstens wird die Kompliziertheit von Schaltungsentwürfen, d. h. die Zahl der zu »verdrahtenden« Punkte, immer größer und ist heute vom Schaltkreisentwerfer nur noch mit Computerhilfe zu bewältigen. Zweitens werden die auf einen realen Schaltkreis zu übertragenden »Schaltpläne« immer winziger, haben nur noch Strichabstände von tausendstel Millimetern und weniger und sind von keinem Graphiker oder Graveur der Welt mehr auszuführen. Und dennoch wird sich das skizzierte Entwicklungstempo

Zyklus 0

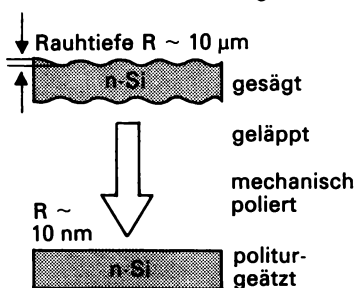
Silizium-Einkristallzüchtung



Zersägen in Scheiben



Oberflächenbehandlung der Scheibe



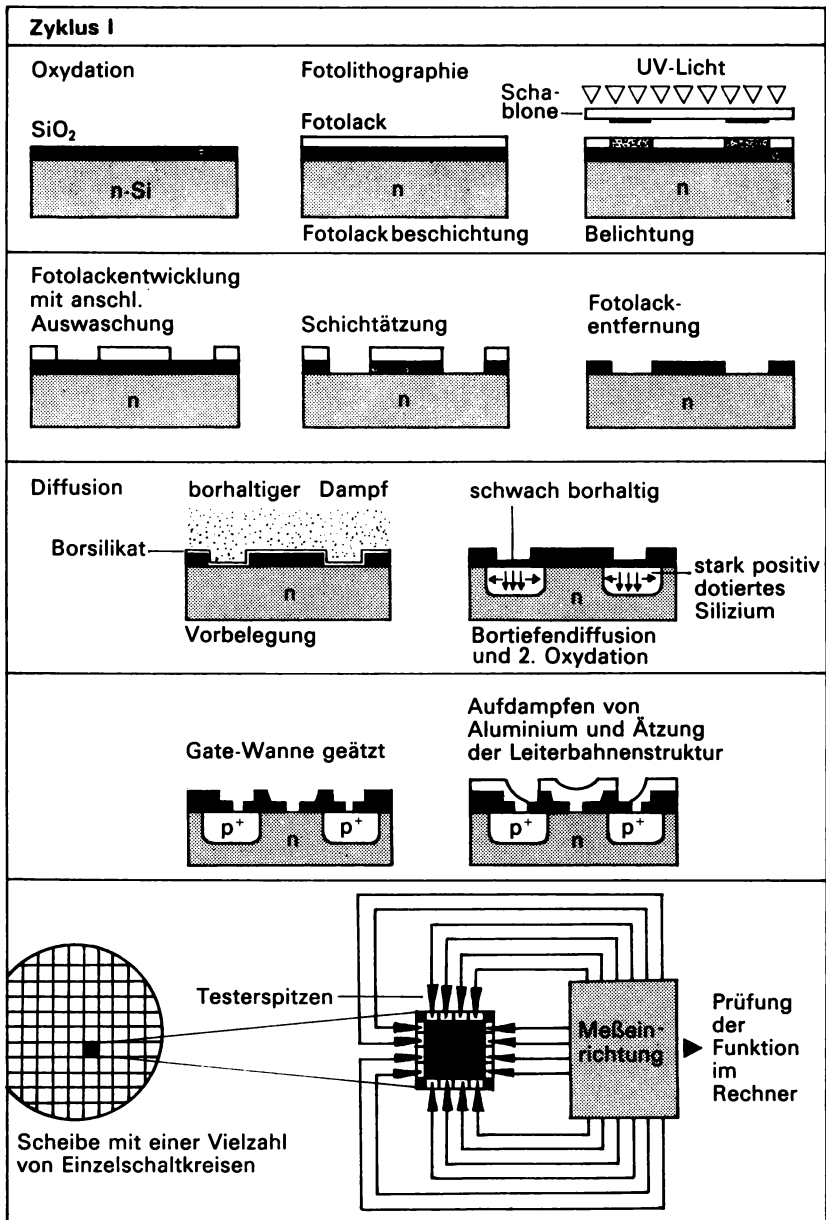
Zyklus Null der Mikroelektroniktechnologie: Herstellung der Siliziumscheiben als Grundmaterial

bei der weiteren Verkleinerung der Schaltkreisstrukturen auf noch nicht absehbare Zeit fortsetzen. Die Computer der kommenden Jahre werden also immer kleiner, im Stromverbrauch sparsamer, in den Kosten billiger, im Rechentempo schneller und in der Rechenleistung besser.

Was sind das für Verfahren und Ausrüstungen, die es ermöglichen, komplizierteste Schaltkreisstrukturen mit Elementabmessungen in der Größenordnung eines Hundertstel des Durchmessers eines Menschenhaares unter den Bedingungen einer industriellen Massenproduktion zu erzeugen?

Die Mikrolithographie, so nennt man diese Technik, hat ihre Wurzeln in einem Ende des 18. Jahrhunderts erfundenen Druckverfahren – der Lithographie, zu deutsch Steindruck. Sie hat aber mit ihrem Vorgänger nur noch den Namen gemeinsam.

Das Wesen dieses Verfahrens besteht darin, daß die Oberfläche des zu strukturierenden Materials, in der Regel eine Silizium-Einkristallscheibe mit einem Durchmesser von 75 bis 100 mm, mit einer hauchdünnen Schicht eines lichtempfindlichen Materials – des



*Zyklus I der Mikroelektroniktechnologie:
 Auftragen bzw. Einätzen der Schaltkreisstrukturen,
 Test der elektronischen Funktion*

Fotoresists – belegt wird. Durch eine vorgefertigte Maske hindurch, die Fotoschablone, in welche das Muster des zu produzierenden Schaltkreises auf fotolithographischem Wege eingraviert wurde, wird diese Scheibe dann mit UV-Licht im Wellenlängenbereich um 400 nm bestrahlt.

Die Prozesse der Schablonenherstellung und der Übertragung des Schablonenbildes auf die Siliziumscheibe erfordern eine ganze Kette spezieller Geräte und Ausrüstungen des optischen Gerätebaus.

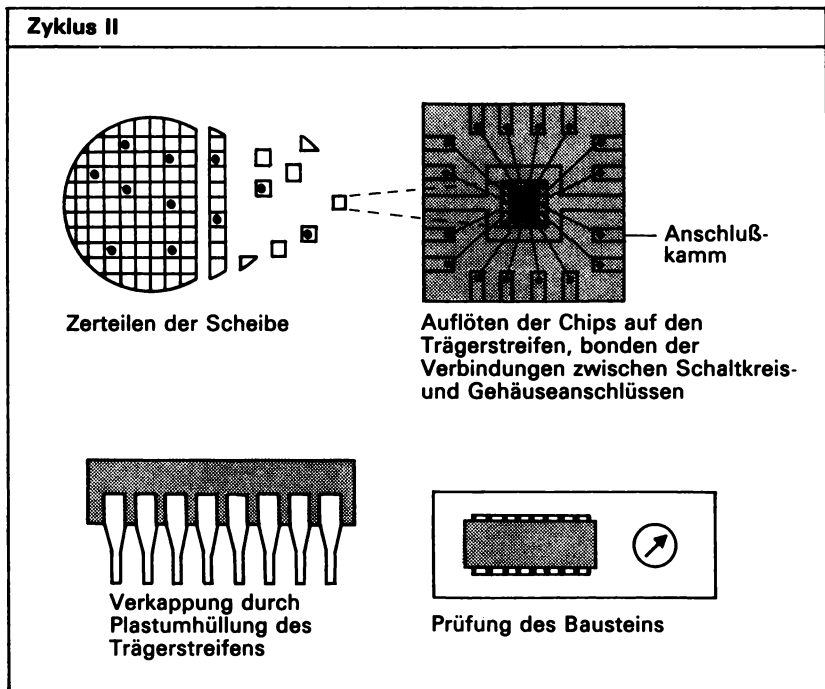
In der Praxis ist es üblich, zunächst ein zehnfach vergrößertes Bild des Einzelschaltkreises herzustellen. Das erfolgt weitgehend automatisch. Entsprechend der vom Entwerfer und vom Computer hergestellten Schaltkreisvorlage wird auf einer Fotoplatte mit Hilfe von winzigen Elementarfiguren – Rechtecken mit variablen Seitenlängen – die Schaltung wie ein Mosaik zusammengesetzt. Die anschließend entwickelte Fotoplatte dient jetzt dazu, im sogenannten Fotorepeatprozeß die Schaltung auf ein mit Fotolack beschichtetes Glaschrom-Substrat zu projizieren, diesmal aber im Maßstab 10 : 1 verkleinert.

Das Substrat wird dabei mittels eines automatisch gesteuerten Kreuztisches mäander- oder kammartig schrittweise bewegt, so daß in rasterförmiger Anordnung eine Vielzahl gleicher Einzelschaltkreise in natürlicher Größe mit einer Lagegenauigkeit von weniger als einem Zehntel Mikrometer zur Originalschablone zusammengesetzt wird. Da moderne Schaltkreise in mehreren Ebenen gefertigt werden, muß für jede dieser Schaltkreisebenen eine entsprechende „lithographische“ Schablone mit entsprechend hoher Überdeckungsgenauigkeit hergestellt werden.

Der Übertragung des Bildes der Schablone auf die Siliziumscheibe und der hochgenauen Überdeckung der für den Strukturierungsprozeß notwendigen Bildinhalte weiterer Schablonen dienen sogenannte Justier- und Belichtungseinrichtungen. Die verbreitete Kontaktübertragung des Schablonenbildes ist für die Produktion höchstintegrierter (VLSI-) Schaltkreise nicht mehr einsetzbar, weil durch den Kontakt zwischen Schablone und Siliziumscheibe so viele kleinste Defekte im Schaltkreismuster erzeugt werden, daß die Gutausbeute zu gering wird.

Deshalb wurden Projektions-Justier- und Belichtungseinrichtungen entwickelt, in denen das Schablonenbild kontaktlos durch ein Hochleistungsobjektiv auf die Halbleiteroberfläche projiziert wird. Anders als die vom Fotofilm her bekannten Vergrößerungsgeräte wird hierbei aber das Bild weiter verkleinert. Das ermöglicht

Zyklus II



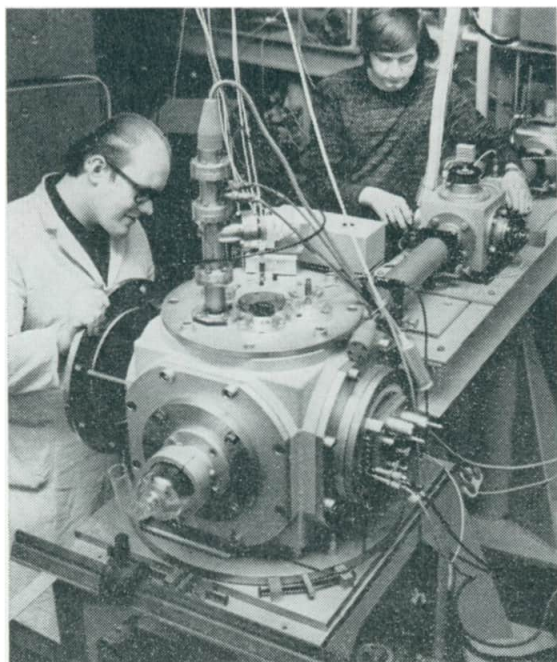
Zyklus II der Mikroelektroniktechnologie: Zersägen der fertigen Siliziumgrundscheibe in einzelne Schaltkreischips, Einbringen ins Gehäuse

die wirtschaftliche Produktion von Schaltkreisen mit kleinsten Elementabmessungen im Bereich von 1 bis 2 μm .

Aber diese Technik unter Zuhilfenahme der Lichtoptik reicht für höhere Ansprüche nicht mehr aus. Die Wellenlänge des sichtbaren Lichtes ist so groß, daß Beugungserscheinungen und andere physikalische Effekte eine weitere Verkleinerung der abzubildenden Objektstrukturen prinzipiell unmöglich machen. Will man Strichabstände von einem halben tausendstel Millimeter und darunter »zeichnen«, benötigt man kurzwelligere Strahlung, beispielsweise hartes, ultraviolettes Licht. Auch die weitere Verkleinerung der Wellenlänge bis hin zum Bereich des weichen Röntgenlichtes kann hier Erfolge bringen, ohne wesentliche Abstriche am Grundtyp der eingesetzten hochpräzisen Fototechnik machen zu müssen.

In vielen Labors wird aber bereits der nächste Schritt getan, weg von der elektromagnetischen und hin zur Teilchenstrahlung als »Arbeitsinstrument«. Praktische Ergebnisse liegen bereits vor. Im Bereich der Laborentwicklung oder der Kleinserienfertigung

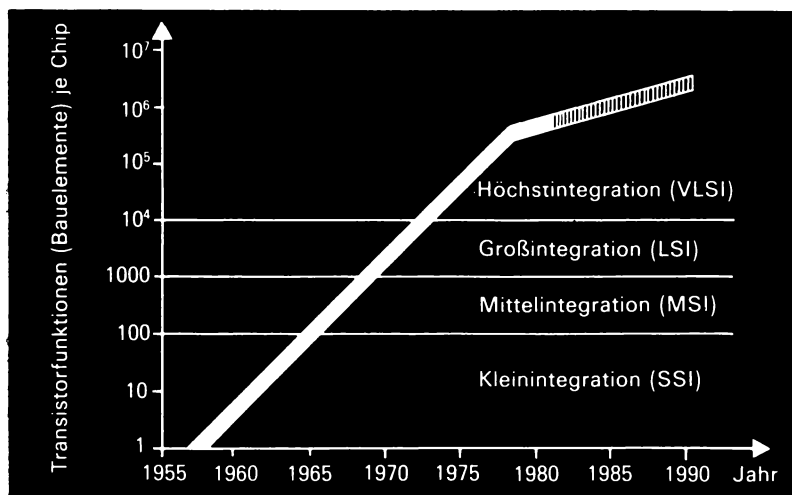
Vorbereitung für ein Experiment zur Bestrahlung von Halbleiteroberflächen mit beschleunigten Elektronen an der Friedrich-Schiller-Universität Jena. Diese grundlegenden Untersuchungen sollen Möglichkeiten für die Mikroelektronik bringen, auf einem Chip noch mehr Bauelemente als bisher unterzubringen.



von Schaltkreisen im Strukturierungsbereich unterhalb eines tausendstel Millimeters hat sich die Elektronenstrahlolithographie bereits einen festen Platz erworben.

Die überlegene Auflösung und große Schärfentiefe elektronenoptischer Systeme hat schon Ende der 60er Jahre zu ersten Anwendungen des Elektronenstrahls zur Strukturierung von Halbleitersubstraten geführt. In Elektronenstrahl-Belichtungsanlagen wird das Schaltkreismuster durch einen fein fokussierten Teilchenstrahl direkt auf die Halbleiterscheibe gezeichnet, seine Ablenkung und Intensitätsmodulierung wird von einem Prozeßrechner gesteuert. Dabei werden extreme Anforderungen an die Genauigkeit der Lage jedes einzelnen Bildelements gestellt. Zum Vergleich: Wollte man mit gleicher Genauigkeit einen Fußball auf einem Fußballfeld platzieren, so müßte dies mit der Präzision einer Haaresbreite geschehen.

Dem Einsatz der Elektronenlithographie in der Massenfertigung höchstintegrierter Schaltkreise steht bisher die noch ungenügende Arbeitsgeschwindigkeit dieser Technik im Wege. Gute Aussichten bietet hier das in der Elektronenstrahl-Belichtungsanlage ZBA 10 des VEB Carl Zeiss erstmals verwirklichte neuartige Arbeitsprinzip

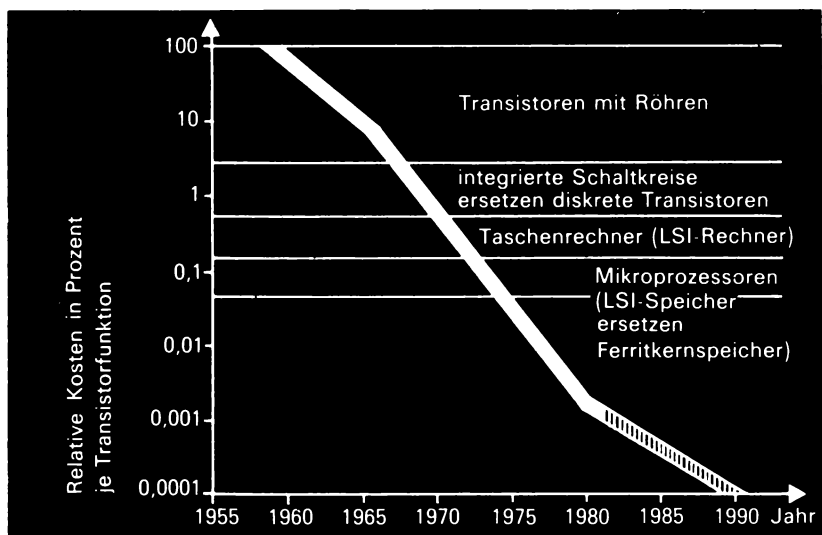


Entwicklung der Bauelementedichte (Transistorfunktion je Chip)

des »variablen Formstrahls«, bei dem die zu belichtenden Schaltkreismuster nicht – wie bei herkömmlichen Anlagen – aus einzelnen Bildpunkten mit einem Durchmesser kleiner als die minimale Strukturbreite aufgebaut wird, sondern aus Elementarrechtecken, deren Kantenlänge variiert werden kann, wie es bei den lichtoptischen Systemen praktiziert wird.

Über einen neuen »Rekord« im Zeichnen dünnster Linien mit Hilfe eines »Elektronengriffels« berichteten 1981 Wissenschaftler des Mikrostrukturzentrums der Cornell-Universität in Ithaca (USA). Sie erzielten Strichbreiten von einigen Nanometern. Über ähnliche Experimente informierten Ende 1982 auch Forscher der Technischen Hochschule Aachen (BRD). Ihr Arbeitsinstrument ist ein sogenanntes Raster-Durchstrahlungsmikroskop, dessen Teilchenstrahl nur einen Durchmesser von 2,5 nm aufweist. Mit ihm lassen sich – wie bei einem Fernsehgerät – die Punkte des gewünschten Bildes auch ohne Maske gezielt ansteuern. Es gelang bereits, Linien von etwa 12 nm Breite herzustellen, allerdings bei so hohen Materialdefekten im Halbleiter, daß diese nicht mehr weiter verwendbar sind. Die halbleitertechnisch nutzbare Auflösung bei den Aachener Experimenten betrug Ende 1982 etwa 0,1 μm (100 nm).

Um diesen neuen Bereich für die Mikrolithographie zu erschließen, nutzt man seit einiger Zeit auch Strahlen beschleunigter Ionen. Während bei den bisher genannten Verfahren auf den Halb-



Kostensenkung je Transistorfunktion bei zunehmender Miniaturisierung

leitergrundplättchen immer zunächst nur Abbildungen der Schaltkreise erzeugt werden, denen Ätz-, Diffusions- oder Aufdampfprozesse folgen, können bei der Ionenbestrahlung mehrere Fliegen mit einer Klappe geschlagen werden. Ziel der der Mikrolithographie folgenden technischen Schritte ist es ja unter anderem, an jeweils bestimmten Punkten des Schaltungsmusters das Halbleitermaterial durch genau dosierte Zugabe fremder Atome zu »dotieren«, d. h., gewollt zu verändern oder dort Schichten eines anderen Materials aufzutragen. Diese Dotierung kann unmittelbar durch den »zeichnenden« Ionenstrahl erfolgen, wählt man als Teilchenart gerade Ionen jenes Elements, mit dem das Silizium der Chip-Grundscheibe dotiert werden soll. Neben diesem Verfahren der Ionendotierung arbeiten Wissenschaftler auch an Methoden der Ionenätzung. Dabei wird auf das Halbleiterplättchen zunächst wieder die zu erzeugende Struktur als Lackmaske auftragen. Durch die Fenster der Maske können dann die Geschosse eines räumlich ausgedehnten Ionenstrahls die Materialoberfläche angreifen und dort entsprechende Strukturen einätzen. Auch auf diesem Weg hofft man, technisch verwendbare Halbleiterstrukturen mit einer Strichdicke unterhalb eines tausendstel Millimeters zu erzielen.

So werden schrittweise die Voraussetzungen für immer kleinere

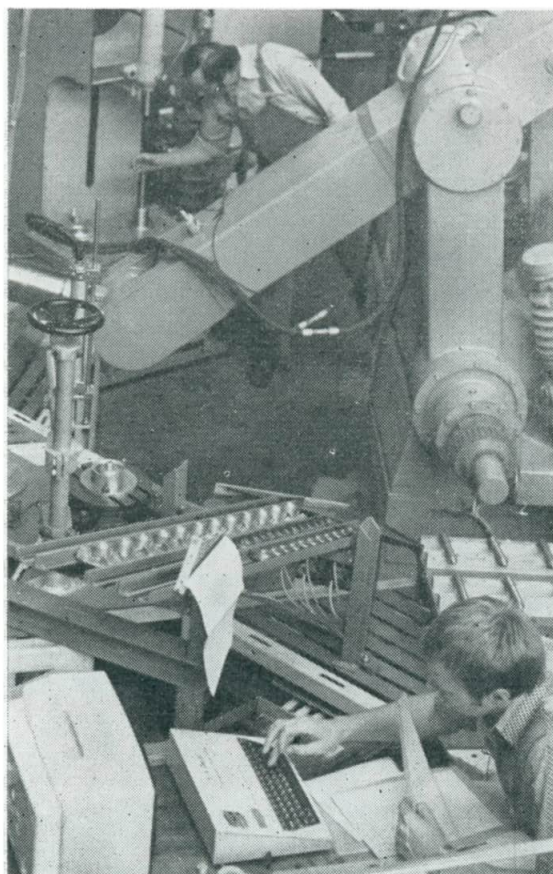
und schnellere mikroelektronische Bausteine geschaffen. Sie ermöglichen den Bau immer leistungsfähigerer Großrechner und gestatten in wachsendem Maße, Informationsprozesse des Alltags zu automatisieren. Sogenannte Mikroprozessoren – gekoppelt mit entsprechender Sensor- und Steuertechnik – übernehmen die Betriebsführung von Automaten und Maschinensystemen und ersetzen in der Industrie bereits massenhaft menschliche Arbeitskraft. Eine ähnliche Entwicklung zeichnet sich auf dem Gebiet der Büro- und Schreibtechnik ab. Die dank der Mikroelektronik gegebene Möglichkeit, sehr kleine Rechner zu bauen, führte in den letzten Jahren zur Realisierung eines alten Menschentraumes – des Baus und des Einsatzes unermüdlich arbeitender Roboter, deren fortgeschrittenste Exemplare sehen, tasten, riechen und hören können und sich bereits in erstaunlichem Maße zielgerichtet in variablen Umweltverhältnissen zurechtfinden können. Eine Wurzel dieser die moderne Industrie revolutionierenden Technik liegt darin, daß es der Mensch gelernt hat, in die Geheimnisse der Mikrowelt einzudringen und diese immer wirksamer auszunutzen.

Aus der Grundlagenforschung in die Praxis

Die Kräfte der Mikrowelt – starke und schwache Wechselwirkung – sind ihrem Wesen nach noch nicht gründlich genug erforscht. Überraschende Anwendungsmöglichkeiten in der Technik kann man nicht ausschließen. Längst nicht mehr wegzudenken aus allen Sphären unseres Alltags ist die Nutzung der elektromagnetischen Kräfte, sei es für Beleuchtung, elektrische Antriebe aller Art, Nachrichten- oder Computertechnik. Dennoch bietet sich auch hier Raum für revolutionierende Entwicklungen, wie das Thema Mikroelektronik eindrucksvoll belegt. Es gibt viele Beispiele solcher Art, wo auf der Grundlage technologischer Fortschritte bereits lange Zeit vorliegende Erkenntnisse gewissermaßen über Nacht ein geradezu stürmisches Interesse der Praxis finden.

Von vielen unbemerkt, vollzieht sich seit Beginn der 80er Jahre beispielsweise auf dem Gebiet der Nachrichtentechnik, insbesondere der Nachrichtenübertragung, eine solche Revolution. Eines von vielen Indizien hierfür war z. B. die Leipziger Frühjahrsmesse 1983. Hier stellte das Schwermaschinenbaukombinat »Ernst Thälmann« (SKET) Magdeburg Maschinen aus, mit denen Lichtleitkabel für die Nachrichtentechnik produziert werden können; Kabel, über die sich bis zu 100 000 Telefongespräche oder eine Vielzahl von Fernsehprogrammen oder Daten für Rechenzentren gleichzeitig übertragen lassen. In diesen Kabeln sucht man Kupfer, metallisches Material überhaupt, vergebens. Trennt man ihre Schutzhülle auf, kommt Glas zum Vorschein –, haarfeine Fasern dieses elektrisch nichtleitenden Materials sind zu einem flexiblen Kabel zusammengefaßt.

Die Übermittlung von Signalen in Form von verschlüsselten elektrischen Impulsen entlang von Kupferkabeln, seit über 100 Jahren praktiziert, hat ernsthafte Konkurrenz bekommen. Weit effektiver geht es nämlich mit Licht, das durch die haarfeinen Glasfasern geschickt wird. Die Vorteile sind vielfach: Wofür in der Lichtleitertechnik 1 g Glas ausreicht, dafür wird bei herkömmlicher Leitertechnik etwa 1 kg Kupfer eingesetzt. Glas ist zudem gegen Korrosion beständig. Und schließlich werden die durch die Glasseele jagenden Lichtimpulse von elektrischen oder magnetischen

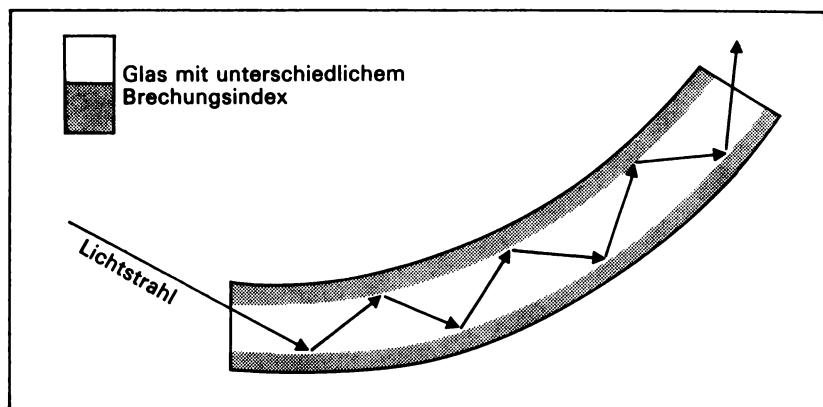


*Industrieroboter —
hier in einem
Forschungslabor der
Technischen
Universität Dresden —
wurden erst durch die
Kombination von
Mikroelektronik und
modernen
Methoden der
Informationsverar-
beitung möglich.*

Störfeldern, wie sie z. B. bei Gewittern auftreten können, überhaupt nicht beeinflußt. Über eine haarfeine Glasfaser schließlich läßt sich ein Vielfaches der Informationsmenge übertragen, die über ein fingerdickes Koaxialkabel in herkömmlicher Hochfrequenztechnik möglich ist.

Die neue Technik hat natürlich ihren Pfiff: Man kann nämlich nicht irgendwelches Licht nehmen. Es muß Laserlicht sein, das von Dioden ausgestrahlt wird, deren Emission sich gezielt und millionenfach in der Sekunde beeinflussen läßt. Entsprechend einem vereinbarten Code kann der so variierte Lichtstrahl dann Informationen übermitteln. Solche Dioden und entsprechende Halbleiter-Lichtempfänger wurden in den letzten Jahren entwickelt.

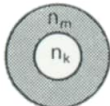
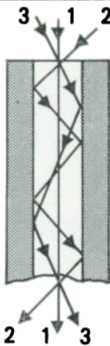
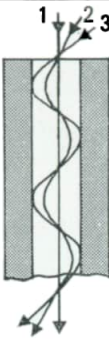
Die Glasfaser wiederum kann nicht aus irgendeinem Glas bestehen,



Prinzip der Lichtausbreitung in der Glasfaser

sondern nur aus dem Besten vom Besten, z. B. aus superreinem Quarzglas. Aber das allein genügt noch nicht. Sie muß innen Glas anderer Qualität haben als am äußeren Rand. Konkret: Die Zieh-technologie für das kilometerlange »Glashaar« muß gewährleisten, daß der optische Brechungsindex im Inneren anders ist als an der Peripherie. Koppelt man nämlich am Stirnende eines solchen Stranges Licht unter einem gewissen Winkel in die Faser ein, so tritt es nicht mehr aus der Glashülle aus. Wegen des anderen Brechungsindex wird es vielmehr im Innern des Glasstranges an dessen äußerer Schicht reflektiert, d. h. ins Faserinnere zurückgespiegelt. An der gegenüberliegenden Wand wiederholt sich dann der gleiche Vorgang. Von Reflexion zu Reflexion legt der Laserlichtstrahl dabei im Kabel ein Stück Weg zurück – mit Lichtgeschwindigkeit.

Das Prinzip des Lichtleitkabels selbst ist nicht neu. Schon in den 30er Jahren gab es Radios, die solche Glasfasern ausnutzten, um beispielsweise die Senderskala auszuleuchten. Aus jüngster Zeit sind Fasern aus durchsichtigem Plast bekannt, die ebenfalls – scheinbar – Licht um jede Ecke leiten können. In der Medizin bewähren sich solche Fasern seit längerem, um innere Körperhöhlen – z. B. den Magen-Darm-Trakt oder Blutgefäße – auszuleuchten und sie für das Chirurgenauge unmittelbar sichtbar zu machen. Diese Fasern reichen für Zwecke der Nachrichtentechnik aber längst nicht aus. Nach wenigen 10 oder 100 m wäre das Licht so sehr abgeschwächt oder verzerrt, daß seine Intensität nicht mehr ausreichte, um die hochempfindlichen Empfangsdioden in Gang zu setzen.

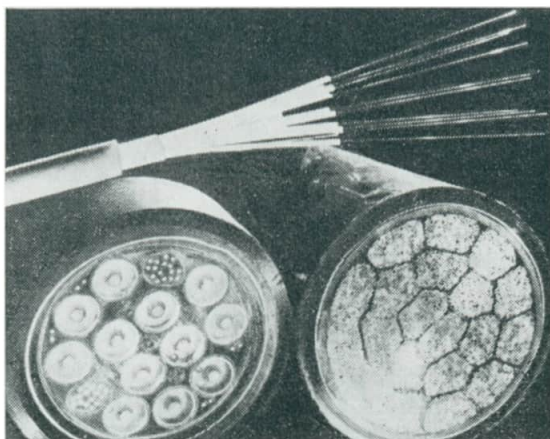
Fasertyp	Multimoden-Lichtleiter		Monomode-Lichtleiter
			
Verlauf der Lichtanteile (Moden)			
Kerndurchmesser (in μm)	50...100	30...70	3...6
Manteldurchmesser (in μm)	80...150	90...150	50...150
Bitrate in Megabit pro s und je km	5...50	100...1000	5000...50 000

Lichtleitertypen und unterschiedliche Möglichkeiten der Lichtausbreitung in der Glasfaser. Am leistungsfähigsten sind monomode Lichtleiter, deren optisch wirksamer Kern nur drei bis sechs tausendstel Millimeter Durchmesser hat.

Lichtleiter von Nachrichtenqualität heute herstellen zu können, darin liegt – auch international gesehen – der eigentliche Erfolg der Forschung und Entwicklung in den letzten Jahren. Mitte der 70er Jahre kostete 1 m Glasfaser für Nachrichtenzwecke auf dem internationalen Markt noch etwa 60 Dollar. Die Glasqualität war dennoch so »schlecht«, daß der Strang nach etwa 2 bis 4 km Länge derart »undurchsichtig« war und die Lichtwelle entsprechend »deformiert« wurde, daß nach diesen Entfernungen jeweils Signalverstärker erforderlich waren, ehe die Lichtwelle ihren Weg fortsetzen konnte.

Die Situation hat sich rasch geändert. 1981 lieferten britische und amerikanische Firmen Glasfasern mit weitaus besseren optischen Eigenschaften – zum Meterpreis von unter 30 Cents. Nunmehr brauchten nur noch alle 7 bis 10 km Zwischenverstärker in

*Größenvergleich
zwischen Lichtleiter-
kabel (oben) und
herkömmlichen
Signalkabeln*



den Glasstrang eingebaut zu werden. 30 bis 50 km Abstand scheinen heute bereits möglich. 1982 berichtete British Telecom sogar von Versuchen, bei denen nach 100 km Glasstrecke ohne Zwischenverstärkung am anderen Ende noch brauchbare Signale herauskamen.

Bei diesem Experiment wurde eine sogenannte Monomodefaser verwendet. Ihr Glaskern ist so extrem fein ($5\text{ }\mu\text{m}$), daß sich darin die elektromagnetische Lichtwelle nur in einer Schwingungsrichtung ausbreiten kann. In Fasern größeren Querschnitts sind mehrere Schwingungsmoden möglich. Die Ausbreitung der Lichtwelle in jeder Mode erfolgt indessen mit geringen Geschwindigkeitsunterschieden. Das führt nach einigen Kilometern dann zwangsläufig dazu, daß die Signalimpulse »verschmiert« werden, nicht mehr eindeutig zu trennen und zu lesen sind. Neben diesem Effekt kommt dann noch die bereits erwähnte Dämpfung des Lichtes durch das Material hinzu. Bei guten Glasfasern wird hierfür bei einer Kabellänge von 10 km ein Wert von 20 dB (Dezibel) angegeben, d. h., ein Hundertstel der ursprünglichen Lichtleistung kommt noch an.

Mit ihrer Monomodefaser haben die britischen Techniker auch erfolgreich auf technologischem Gebiet experimentiert. Sie bauten eine 31,6 km lange Übertragungsstrecke. Das Lichtkabel wurde aus jeweils 2 km langen Glassträngen zusammengeschweißt. Dabei erfolgte die Justierung des nur $5\text{ }\mu\text{m}$ starken Faserkerns so genau, daß an jeder Schweißstelle nur Dämpfungsverluste von 0,11 dB auftraten. Bei den dann folgenden Übertragungen wurden Datenraten von 140 bzw. 565 Megabit/Sekunde bzw. 7680 Telefongespräche gleichzeitig über eine Faser gegeben.

Von den amerikanischen Bell Telephone Laboratories wurden unterdessen bereits konkrete Pläne für ein Transatlantik-Nachrichtenkabel aus Glas erarbeitet. Etwa alle 35 km ist bei diesem Projekt ein Zwischenverstärker vorgesehen. Bei den derzeit noch üblichen Kupfertrassen ist etwa alle 9 km ein Verstärker zwischengeschaltet. Je weniger solche Geräte aber zum Einsatz kommen, desto störungssicherer funktioniert die Nachrichtenstrecke. Bei dem Glasprojekt soll jeder Verstärker ohnedies drei Laserdioden in Reserve haben. Sie werden augenblicklich und automatisch in Betrieb gesetzt, wenn der »diensthabende« Sender zur Erzeugung der Lichtimpulse versagt. Als Laser wurden Indium-Gallium-Arsenid-Phosphid-Dioden ins Auge gefaßt. Die Experten hoffen, daß die gläserne Nachrichtenader im Meeresgrund im Durchschnitt etwa acht Jahre lang ohne Panne arbeiten kann. Gleichzeitig soll sie 4000 Telefongespräche vermitteln können, gegenüber nur 200 bei den herkömmlichen Transatlantikstrecken.

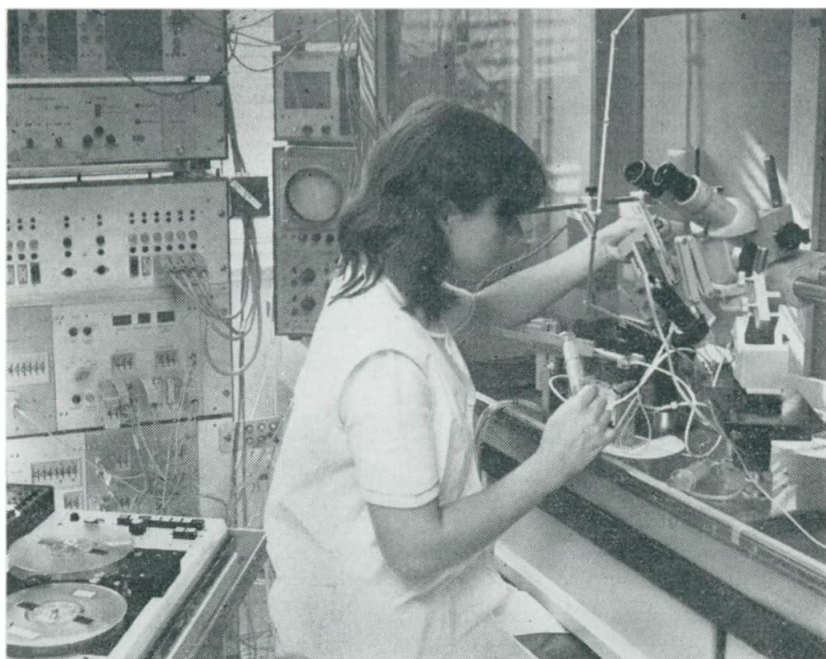
Rund 120 Jahre, nachdem die legendäre »Great Eastern«, das mit 22000 Bruttoregistertonnen damals gewaltigste Schiff, das erste gebrauchsfähige Unterwasserkabel zwischen Europa und Amerika verlegt hatte, wurde in Loch Fyne in Schottland ein 9 km langes Unterseekabel auf Glasbasis getestet – Generalprobe für die ins Auge gefaßte gläserne Kontinentverbindung.

Ein besonderes Tempo beim Einsatz gläserner Nachrichtenstrecken wird in Japan vorgelegt. Von 1980 bis 1982 hat sich die Zahl solcher Systeme verdoppelt. Gegenwärtig betreibt die staatliche Fernmeldegesellschaft NTT zwölf Glasfaser-Kabelstrecken mit einer Gesamtlänge von 110 km. 1984 sollte eine 2000 km lange optische Nachrichtenstrecke zwischen Sapporo auf Hokkaido und Fukuoka auf Kyushu fertiggestellt sein.

Erst im Dezember 1981 hatten japanische Techniker in den Außenbezirken von Tokio eine 18 km lange Teststrecke in Betrieb genommen.

Auch in der DDR ist das Thema Lichtwellenleiter intensiv bearbeitet worden, wie die erwähnte Messeofferte des SKET ausweist. Entsprechende Forschungsarbeiten wurden und werden u. a. vom Institut für Nachrichtentechnik und Einrichtungen der Akademie der Wissenschaften betrieben. Im März 1981 verlegten Techniker eine 16 km lange gläserne Teststrecke aus dem Stadtzentrum nach Berlin-Schöneeweide. Damit werden Gespräche des öffentlichen Fernsprechverkehrs übertragen.

Allerdings kann die neue Technik in bestehende Nachrichtennetze



Die Signalverarbeitung im Nervensystem von Insekten wird an der Technischen Hochschule Ilmenau studiert – Grundlage für die Suche nach neuartigen Strukturen für Computerentwicklungen.

nur schrittweise eingebaut werden. Sie nutzt andere physikalische Prinzipien, erfordert eine völlig neuartige Technik, die sich an die vorhandenen Anlagen nicht ohne weiteres anpassen läßt. Wie der internationale Trend zeigt, werden gläserne Nachrichtenstränge vorerst bei der Verbindung von Hauptämtern im Fernverkehr oder von Rechenzentren und anderen wissenschaftlich-technischen Einrichtungen ihre Bewährungsprobe bestehen müssen.

Es gibt in einigen Ländern darüber hinaus erste Überlegungen und Experimente, auch Haushalte mit der neuen Faser zu verkabeln. Das hat natürlich nur Sinn, wenn die Übertragungskapazität des Lichtkabels auch annähernd ausgenutzt wird, d. h., wenn außer dem Telefonanschluß der Haushalt über eine solche Faser auch mit Fernseh- und Rundfunkprogrammen und anderen künftig denkbaren Informationsnetzen verknüpft wird. Wann und ob überhaupt diese Einsatzvariante realisierbar ist, kann in diesen Ländern angesichts des enormen Investitionsbedarfs heute niemand sagen.

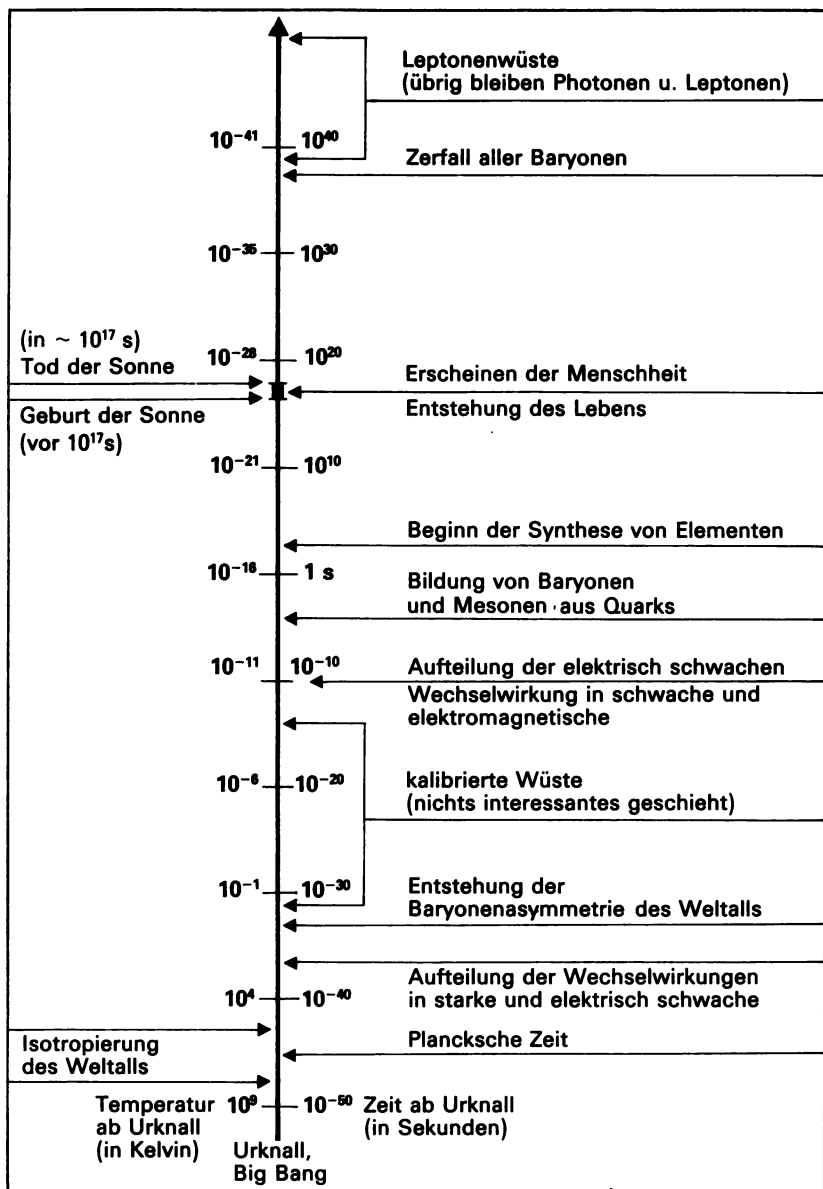
Grenzen der Forschung

Die physikalische Forschung unserer Tage ist weit vorangeschritten. Kenntnisse über die Milliarden Jahre währende Vergangenheit der Natur liegen bereits vor; was die Welt in ihrem Innersten zusammenhält, wird immer besser verstanden. Der Bauplan des Mikro- und Makrokosmos zeichnet sich in seinen Konturen deutlicher ab. Nähern wir uns dem Zeitpunkt, wo auf dem Gebiet der Physik alles erforscht ist? Diese Frage verlangt eine eingehende Antwort; ein kurzes und entschiedenes Nein wäre zu wenig.

Sicher, gelänge es, eine einheitliche Theorie der Naturkräfte zu finden, wie es in vorangegangenen Kapiteln erörtert wurde, wäre auf diesem Grundlagenterritorium Klarheit geschaffen, hätte die Forschung ein Ende. Aber nur bezüglich der gegenwärtigen Fragestellung. Denn natürlich würden sich – die mehrtausendjährige Geschichte der Wissenschaft und des menschlichen Denkens überhaupt belegen das eindrucksvoll – sofort neue, andere Fragen ergeben, die aus dann aufgedeckten, bisher unbekannten Widersprüchen zwischen realer Wirklichkeit und theoretischem Modell herrühren.

Die Natur ist in der Vielfalt ihrer Erscheinungsformen, ebenso wie in ihrer Existenz in Raum und Zeit, unendlich. Das Wesen der Wissenschaft besteht gerade darin, die Natur in ihren Gesetzen immer besser zu verstehen, die Gegebenheiten der Materie immer genauer, immer präziser im menschlichen Denken widerzuspiegeln und sie dann zielstrebig und planmäßig für die Tätigkeit des Menschen, für Technik und Industrie, zu nutzen. Wissenschaft ist die Suche nach Wahrheit. Jede neue Erkenntnis der Wissenschaft vergrößert den Fundus der Wahrheit, ist, wie W. I. Lenin sagt, ein Annähern an die absolute Wahrheit, die aber nur durch unendlich viele Erkenntnisschritte zu erreichen wäre, eben wegen der Unendlichkeit der materiellen Welt. Den Tag, an dem alles erforscht ist, kann es nicht geben.

Doch nicht nur diese philosophische Überlegung begründet das Nein auf die gestellte Frage. Beispiele wie Lasertechnik, Mikroelektronik oder Nachrichtenwesen belegen ebenso eindrucksvoll, welch überraschend neue Felder immer wieder auch der physika-



Der Werdegang des Universums seit dem Urknall für den Fall eines offenen Einstein-Friedmann-Kosmos (nach D. Kirschnitz und A. Linde, Moskau).

lischen Forschung erschlossen werden. Freilich, die Grundlagen-gebiete früherer Jahrzehnte, wie kinetische Gastheorie oder klassische Mechanik etwa, bieten, für sich allein genommen, kaum

Neues. Das Forschungsinteresse hat sich längst auf sogenannte Grenzgebiete verlagert, auf jene Felder, die von Physikern, Technikern, Chemikern, Biologen und Vertretern vieler anderer Gebiete gemeinsam beackert werden müssen. Dieser Trend hält weiter an und verstärkt sich noch.

Der Gegenstand moderner Forschung, die Themen, werden immer komplexer. Die Grenzen klassischer Wissenschaftsgebiete verwischen zunehmend. Der Verweis auf das Unerforschte und die gegenwärtigen Erforschungsgrenzen der Wissenschaft dürfen freilich nicht dazu verführen, das Fundament bereits erworbener Naturerkenntnis zu verlassen. In den 70er Jahren hat es in vielen Ländern verstärkt Versuche gegeben, die Existenz übersinnlicher Erscheinungen zu beweisen, Effekte vorzuführen, die angeblich außerhalb der Naturgesetze liegen sollen. Man hat sogar einen Namen gefunden, um diesem Hokuspokus den Anstrich einer soliden Wissenschaftsdisziplin zu geben – Parapsychologie.

Ihr Gegenstand sind so erstaunliche Phänomene wie Gedankenübertragung, Bewegung von Gegenständen nur mit der Kraft des konzentrierten Gedankens oder die Kommunikation mit Verstorbenen. Immer mehr bedient man sich in den parapsychologischen Laboratorien auch moderner physikalischer Experimentiertechnik und weiß über positive Ergebnisse zu berichten, die sich dann »bedauerlicherweise« in Kontrollexperimenten nicht wiederholen lassen.

Solange naturwissenschaftliche Forschung von der Grundmethode her aber nicht auf der wissenschaftlich begründeten Prinzipkette Arbeitshypothese – Experiment – Auswertung – Kontrollexperiment beruht, rückt sie in die Nähe von Mystizismus und Spiritismus. Beides hat es schon immer gegeben, und selbst bekannte Forscher der Vergangenheit haben sich ihnen – aus welchen Motiven auch immer – verschrieben.

Vor rund 200 Jahren sorgte beispielsweise der schwedische Mystiker Emanuel Swedenborg (1688–1772) für spektakuläres Aufsehen. Er gab vor, mit der Geisterwelt in geheimer Verbindung zu stehen. Als Vertreter des Spiritualismus erregte er auch das Interesse von Immanuel Kant, des in die Geschichte eingegangenen großen Philosophen. Er sammelte einige Nachrichten über Swedenborg und ließ sich für die Summe von 7 Pfund Sterling aus London das »große Werk« des Geistermediums schicken.

Kant kam jedoch bald zu dem Schluß, daß es sich bei den »Arcana Coelisia« (Geheimnisse des Himmels) um acht Bände »voll Unsinn«

handelte, und machte aus seinem Ärger über das vergeudete Geld das Beste, was er machen konnte: Er verfaßte eine Antischrift »Träume eines Geistersehers, erläutert durch Träume der Metaphysik«. Sie erschien 1766 anonym in Königsberg. Darin entlarvte Kant – nicht nur leidenschaftlicher Inspirator der deutschen Aufklärung, sondern auch unbestechlicher Hüter ihrer progressiven Denkart – die unlauteren und rückschrittlichen Absichten des Mystizismus. »Der Verfasser dieser Schrift«, so resümierte Kant, »bekennt mit einer gewissen Demütigung, daß er so treuherzig war, der Wahrheit einiger Erzählungen von der erwähnten Art nachzuspüren. Er fand – wie gemeiniglich, wo man nichts zu suchen hat – er fand nichts.«

Mitte der 70er Jahre unseres Jahrhunderts machte – um nur ein Beispiel von vielen herauszugreifen – in westeuropäischen Ländern das »parapsychologische Medium« Uri Geller mit showähnlichen Auftritten auf sich aufmerksam. Mit seinen magischen, »übersinnlichen« Geisteskräften verbog er Gabeln oder ließ kaputte Uhren wieder ticken, vor den Augen eines staunenden Publikums. Ein populärwissenschaftliches Magazin in der BRD wußte zugleich von »einer entscheidenden Umwälzung in der Naturwissenschaft« zu berichten, die »nur mit dem Schaffen Albert Einsteins zu vergleichen« sei.

Materialprüfer, denen eine gellersche Biegeprobe zur Begutachtung übergeben wurde, waren weniger beeindruckt. Verbiegung und anschließender Bruch, so lautet ihr sachliches Urteil, ist Ergebnis einer vorangegangenen Benetzung der späteren Bruchstelle mit einer Quecksilbernitratlösung. Mit Chemie geht eben alles besser.

Der Mystizismus im wissenschaftlichen Gewand hat sich heute gerade solch komplizierte Gebiete wie die Hirnforschung, die Mikrobiologie und Biochemie ausgesucht – Gebiete also, in denen in den letzten Jahrzehnten große Fortschritte erzielt wurden, in denen aber noch viele Probleme weiter erforscht werden müssen.

Hier liegt eine Gemeinsamkeit mit dem Mystizismus vergangener Jahrhunderte. Ungelöste wissenschaftliche Fragen waren von jeher Quellen für Spekulationen, die mit der Erkenntnis der realen Welt nichts zu tun hatten. Fehlendes Wissen über Elektrizität und atmosphärische Prozesse verleiteten einst dazu, Erscheinungen wie Blitz und Donner als Werk der Götter anzusehen. Und die geringen Kenntnisse über den menschlichen Organismus haben in vergangenen Jahrhunderten bekanntlich zu höchst untauglichen Behandlungsmethoden und zur »Gesundbeterei« geführt.

Naturwissenschaftliche Forschung wird nicht ohne Philosophie betrieben. Empirisch gewonnene Daten werden niemals allein aus sich heraus interpretiert. Fundierte, an dem bisherigen Erkenntnisstand orientierte Arbeitshypothesen sind unerlässlich. Heute setzen die Parapsychologen teilweise modernstes Forschungsgerät in Gang, um doch noch experimentelle Beweise für ihre mystischen Arbeitshypothesen zu finden. Der Erfolg indessen ist oftmals der gleiche wie vor 200 und 100 Jahren. Denn nicht selten ergeht es diesen Forschern wie jenem William Crookes, dem Entdecker des Elements Thallium, von dem Friedrich Engels in seiner »Dialektik der Natur« schrieb: »Herr Crookes fing gegen 1871 an, die spiritistischen Manifestationen zu untersuchen, und wandte dabei eine ganze Reihe physikalischer und mechanischer Apparate an, Federwaagen, elektrische Batterien usw. Ob er den Hauptapparat, einen skeptisch-kritischen Kopf, mitbrachte oder bis zum Ende im arbeitsfähigen Zustand erhielt, werden wir sehen. Jedenfalls war Herr Crookes in nicht gar langer Zeit ebenso vollständig eingefangen wie Herr Wallace«, ein anderer Naturforscher jener Zeit, der sich dem Spiritismus zugewandt hatte.

»In der Tat ist die bloße Empirie«, so bemerkte Engels in der »Dialektik der Natur«, »unfähig, mit den Spiritisten fertig zu werden. Erstens werden die ‚höheren‘ Phänomene immer erst dann gezeigt, wenn der betreffende ‚Forscher‘ schon soweit eingefangen ist, daß er nur noch sieht, was er sehen soll oder will . . . Zweitens aber macht es den Spiritisten nichts aus, wenn Hunderte angeblicher Tatsachen als Prellerei und Dutzende angebliche Medien als ordinäre Taschenspieler enthüllt werden. Solange nicht jedes einzelne angebliche Wunder weggeklärt ist, bleibt ihnen Terrain genug übrig.«

Auch ohne Parapsychologie und Spiritismus steht die Physik, die wissenschaftliche Forschung überhaupt, heute vor großen und faszinierenden Aufgaben, die für den Fortschritt der Menschheit von größter Bedeutung sind. Heute wie in früheren Jahrzehnten und Jahrhunderten kann Wissenschaft, die Suche nach dem noch nicht Bekannten, zum Abenteuer werden, das junge Menschen begeistert und anzieht und nicht wenige immer wieder zu einem überragenden Lebenswerk anspornt.

Sachwortverzeichnis

- Alexandrow, A. 173
Alphastrahlung, -teilchen 104, 131
Ambarzumjan, V. 59
Apertursynthese, -teleskop 66, 73 ff.
Aristoteles 40, 119
Arzimowitsch, L. 176
- Baarden, J. 24
Baryonen 112 ff., 128 ff.
Bassow, N. 22
Becquerel, H. 102, 103
Beta-Zerfall 97, 98, 100
Blasenkommer 79 ff., 134, 164 ff.
Bloembergen, N. 22
Bohr, N. 95, 105
bootstrap-Hypothese 123
Boson 147, 148, 152
Bothe, W. 105
Braginski, W. 82
Brattain, W. 24
Bruno, G. 40
Bunsen, R. 41
- Chadwick, J. 103, 106
Chaikin, S. 68
charm-Quark 132, 133, 136
Chip 201
Copernicus, N. 40
Cowan, C. 96
Cronin, J. 15
Curie, I. und F. 105
Cusanus 40
- Dalton, J. 102, 103
Demokrit 119
Deuterium 25
Dirac, P. 103, 107, 126
Doppler, Ch. 52
Doppler-Effekt 8, 52, 64
- Einstein, A. 8, 11, 15, 27, 42, 45, 48, 80, 108
Einstein-Friedmann-Modell 44, 52 54, 93, 94
Einstein-Turm 49
Engels, F. 55, 214
Epikur 119
- Farbenregel 136
Farbsingulett 136 ff.
Faraday, M. 144, 145
Feldquanten 150
Fermi, E. 88, 96
Feynmann, R. 132
Fitch, V. 15
Fowler, W. 15
Friedmann, A. 8, 44 ff.
Friedmann-Modell 44, 52, 54, 93, 94
- Galaxienflucht 52
Galaxis 56, 60
Galilei, G. 26, 40
Gamow, G. 53
Geiger, H. 103, 104
Gell-Mann, M. 103, 110, 127 ff., 153
Glashow, S. 15, 147, 153
Gluon 139, 149
Gravitation 45
Gravitationstheorie 48, 57, 80
Gravitationswellen 80 ff.
Gravitonen 147
- Hadronen 111 ff., 128 ff.
- Hadronen 111 ff., 128 ff.
Hafele, J. 50
Heisenberg, W. 127
Herschel, F. 26
Hoyle, F. 91
Hubble, E. 7, 27, 52
Humasson, M. 8, 27, 52
- Isospingruppe, -multiplett 147
- Jansky, K. 62
J/Psi-Teilchen 109
Jet 138, 149
- Kant, I. 212
Kapiza, P. 22
Keating, R. 50
Kernfusion 25, 100, 173 ff.
Kernheizwerk 186
Kirchhoff, R. 41

Labeyrie, A. 78
 Laser-Fusion 175, 181 ff.
 Lemaitre 53
 Leptonen 97, 117 ff., 132, 139,
 140, 143, 148 ff.
 Leukip 119
 Leverrier 48
 Lichtleitertechnik 203 ff.
 Lord Oxmantown, Earl of Rosse 27
 Lukrez 120

magnetischer Monopol 126
 Marsden, E. 103, 104
 Maxwell, J. 15, 145, 153
 van der Meer 16
 Mendelejew, D. 102, 103
 Merkurperihel 47 ff.
 Mesonen 112 ff., 128 ff.
 Mesonenfabrik 171
 Metagalaxis 10, 57, 58, 61
 Mikroelektronik 32 ff., 192 ff.
 Mikrolithographie 195 ff.
 Mößbauer, R. 99
 Myon 97, 107, 111, 132, 140
 neutraler Strom 133
 Neutrino 19 ff., 84 ff., 97 ff., 102,
 107, 111, 132
 Neutrinoastronomie 42, 83 ff.,
 95 ff.
 Neutrinooszillation 92, 98
 Neutrinoteleskop 20, 83 ff.
 Neutron 106, 115, 135, 142
 Neutronenstern 81
 Newton, I. 15, 40, 42, 45
 Nowikow, I. 59

Oerstedt, H. 144

Partonen 132
 Pauli, W. 19, 87, 96, 103, 107
 Penzias, A. 7, 21
 Photon 115, 117, 145, 148
 Pontecorvo, B. 96, 97, 99
 Prochorow, A. 22
 Proton 21, 100, 102, 109, 115,
 135, 142
 Pulsar 56

Quark 13, 14, 17, 110 ff., 115 ff.,
 122 ff., 127 ff., 143, 148 ff.
 Quasar 64

Radioteleskop 65 ff.
 Raumexpansion 10, 43 ff., 52 ff., 93

Raumkrümmung 43 ff.
 Raumspiegelung 17
 Raum-Zeit-Struktur 45, 93
 Reines, F. 96, 99
 Relativitätstheorie 8, 42, 45, 52,
 150
 Reststrahlung 7
 Richter, B. 14, 103, 109
 Roter Riese 79
 Rotverschiebung 52
 Rubbia, C. 16, 147, 161
 Rutherford, E. 103 ff.
 Ryle, M. 73

Salam, A. 15, 18, 147, 153
 Salut-Station 76
 Schawlow, A. 22
 Schmidt, M. 63
 Schwartz, M. 97
 Schwarzes Loch 56, 81
 Seldowitsch, J. 59
 Shapiro, I. 50
 Siegbahn, K. 22
 Singularität, kosmische 54, 55
 Speckle-Interferometrie 78
 Speicherringe 160
 Spin 96, 128
 Subrahmanyam, Ch. 15
 Symmetrie 17, 150
 Szintillationsdetektor 97, 165

Ting, S. 14, 103, 109
 Tokamak 176 ff.
 Thomson, J. 102, 103
 Townes, Ch. 22

Uhrenvergleich 50
 Urknall 9, 11, 52, 58, 95

Vektorbosen 147
 VLSI-Technik 192

Warschalowitsch, D. 33
 Weber, G. 63, 80
 Wechselwirkung 15, 45, 113, 115,
 147
 Weinberg, S. 15, 147, 153
 Weltmodell 9, 56 ff.
 Wilson, R. 7, 21

Yang, C. 18, 151

Zeitumkehr 17

