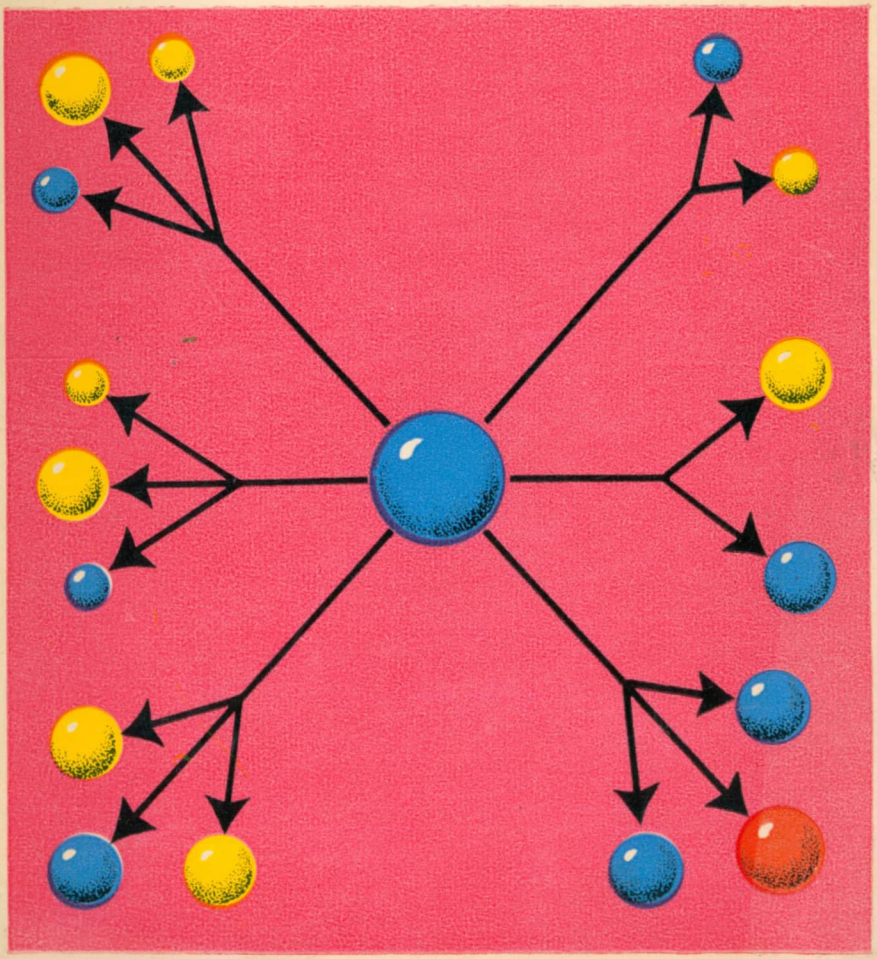
Wera A. Tschernogorowa

Geheimnisse der Mikrowelt



Wera Alexandrowna Tschernogorowa

Geheimnisse der Mikrowelt

Verlag MIR Moskau
Urania-Verlag Leipzig • Jena • Berlin

Titel der Originalausgabe:

В. Черногорова. Загадки микромира
Издательство «Молодая гвардия», Москва

In die deutsche Sprache übersetzt von Leo Korniljew

Gemeinschaftsausgabe des Verlages MIR Moskau
und des Urania-Verlages Leipzig/Jena/Berlin
Alle Rechte an dieser deutschsprachigen Ausgabe
bei Verlag MIR Moskau und Urania-Verlag Leipzig/Jena/Berlin
© Издательство «Молодая гвардия», 1973 г.
© 1976 Verlag MIR Moskau und Urania-Verlag Leipzig/Jena/Berlin
1. Auflage
VLN 212-475/10/76
LSV 1179
Einband und Schutzumschlag: Rolf F. Müller, Gera
Illustrationen: Rolf F. Müller, Gera
Zeichnungen: Rita Melzig, Leipzig
Satz und Druck: UdSSR
Best.-Nr. 653 396 1

EVP [redacted] Mark

Inhalt

DIE UNSICHTBARE WELT 7
Das neue Oberhaupt 7
Der bekannte Unbekannte 12
Zwei Anwärter 15
Das Dritte, das nicht überzählig ist 21
Die neue Rolle 24
König Laurins Mantel 31
Ungewöhnliche Bausteine 35
Das Zeitalter der Hyperonen 39
Eine Lotterwirtschaft 42
Die Herrschaft der Energie 46

DIE LETZTE HÜLLE? 52
Der Vogel Phönix 52
Spiel nach Regeln 54
Ein Punkt oder kein Punkt? 57
Die Sprache der Streuung 58
Die „Elektronenkundschafter" 61
Was weiter? 66

DER NEUE LINNÉ 68
Who is who? 68
Merkwürdige Ausstellungsstücke 70
Die Entscheidung der Jury 76
Die Jagd auf die Quarks 79
Der „Chor" der Quarks 86
Eine Momentaufnahme 88

VERLORENE ILLUSIONEN 91
Das „Theta-Tau"-Rätsel 91
Eine Reise in das Land hinter dem Spiegel 97
Die ersten „Opfer" 100
K-Mesonencocktail 105
Das Ein-Mann-Theater 109
Das verlorene Paradies 112

GROSSE HOFFNUNGEN 119
Konflikt oder gegenseitiges Verständnis? 119
Einfaltspinsel oder Genie? 122

Hier spricht Serpuchow 126
Die Ruhe vor dem Sturm 131
Wir wollen keine Detektive sein 133
Der „Makroblick“ in die Mikrowelt 136
Die gespenstische Partikel 142

DIE GROSSE WISSENSCHAFT 152

Einst und jetzt 152
Ein Bad in flüssigem Wasserstoff 154
Der Blitz in der Schachtel 157
Vom Monolog zum Dialog 160
Ein Wasserstoffstrahl als Target 164
Die „industrialisierte“ Wissenschaft 166
Der „Zauberstab“ 169
Fernphysik 176

WURZELN UND FRÜCHTE 184

Vom Feldstein zur Antimaterie 184
Universelle Maschinen 189
Der Beschleuniger als Energieerzeuger 193
Atome von Menschenhand 201
Dubna, das „Mekka“ der Mesochemie 207

EIN WELTALL IM KLEINEN 211

Ein Laboratorium für alle 211
Ein „Löffel“ für die Sonne 215
Die Neutrinowellen 219
Strahlen, so alt wie das Weltall 222
Gibt es Antiwelten? 226
Kreuzwege im All 233
Das kleine Weltall 236
Bildquellenverzeichnis

Die unsichtbare Welt

Das neue Oberhaupt

Sonderlinge verschönen mitunter das Leben. Unsere Welt wäre sehr blaß, gäbe es nicht jene Sonderlinge, jene ewig unersättlichen, entsetzlich unruhigen, ungewöhnlich hartnäckigen und grenzenlos neugierigen Menschen. Mit großer Beharrlichkeit suchen sie nach kaum verständlichen Problemen, schlagen sich damit herum und versuchen, in sie einzudringen. Ständig entdecken oder erfinden sie irgend etwas und versuchen es dann zu realisieren. Der kasachische Dichter Olshas Sulejmenow hat das sehr treffend formuliert:

Ein jedes Geschlecht bedarf eines Menschen,
geblendet vom Licht der strahlenden Sterne.
Schafft sie euch!

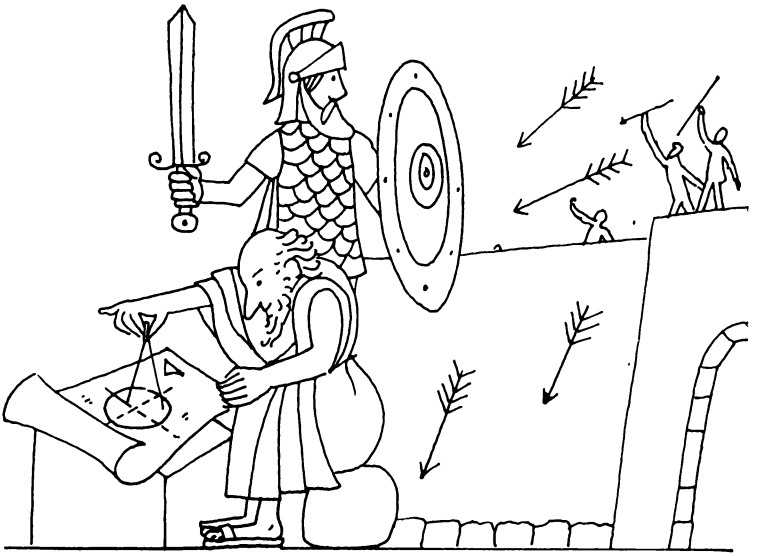
Wir brauchen nicht weit zu gehen, um solche Menschen zu finden. Jeder wirkliche Wissenschaftler ist zu einem geringen Teil auch ein Sonderling. Sein Wissensdurst ist unauslöschlich. Nichts — weder Kriege noch Hunger, weder Zerstörungen noch persönliches Mißgeschick — ist imstande, die Wißbegier des Wissenschaftlers, diesen kostbaren menschlichen Zug, zu dämpfen.

Im belagerten Syrakus löste Archimedes mathematische Probleme. Hinter Gefängnismauern schloß Kibaltschitsch seinen Raumschiffentwurf ab. Im Petrograd der Hungerjahre und im Leningrad der Blockade verlosch für keine Sekunde das Licht schöpferischen Geistes.

Viele Probleme wirft das Leben auf. Manche sind sehr leicht zu lösen, doch mit anderen kämpfen Wissenschaftler vieler Generationen. Trivial, geradezu kindlich mutet die Frage an: „Wie ist die Welt eingerichtet?“ Und doch suchen die Menschen nun schon über 2000 Jahre nach einer Antwort auf diese Frage.

Das Kind nimmt ein Spielzeug in die Hand und ist sofort von dem brennenden Gedanken erfüllt: Was ist da

eigentlich drin? Die Zeit der zerbrochenen Puppen, zerschlagenen Kreisel und demontierten Wecker beginnt. Manches Kind, das nicht etwas auf den ersten Blick wesentlich Erscheinendes entdeckt, wirft mit dem Spielzeug auch das Problem zur Seite und findet kein Interesse mehr daran. Bei einem anderen Kind dagegen kann die Frage nach dem inneren Aufbau des Spielzeugs zu einem Problem werden, mit dem es sich sein ganzes Leben lang beschäftigt, ein Problem, das schließlich in die Fragestellung nach dem inneren Aufbau der Welt mündet. Dieses Kind wird später bestimmt zu einem Wissenschaftler.



Im 6. Jahrhundert vor unserer Zeitrechnung wurde die kindlich naive und zugleich philosophisch tiefe Frage nach dem inneren Aufbau der Welt zum ersten Mal von einem erwachsenen Menschen gestellt.

„Aus welchem Stoff besteht die Welt?“ fragte sich einer der Begründer der Wissenschaften, der im alten Griechenland beheimatete Denker Thales von Milet (625—545). Er und einige andere Wissenschaftler seiner Zeit glaubten, daß gewisse materielle Partikeln existieren müßten, irgendwelche durchaus greifbaren Elemente, aus denen sich alles Übrige zusammensetzt und aufbaut.

Ein Jahrhundert später kam einer der Nachfolger von Thales, Demokrit (460—370), zum ersten Mal tastend zu einer Antwort auf diese Frage. Demokrit nahm an, daß die Welt aus 2 Elementen, aus unsichtbaren kleinsten, nicht zerlegbaren Partikeln — den Atomen — und aus Leere, aufgebaut ist. Für Demokrit war die Natur eine „ungeordnete Bewegung" der Atome in alle möglichen Richtungen.

In wohlgefälliger dichterischer Form stellte der altrömische Philosoph und Materialist Titus Lucretius Carus (96—55) die atomistische Hypothese Demokrits dar. Durch seine Werke erfuhr die Welt von einer der bedeutsamsten Hypothesen, der Hypothese von den Atomen.

Fast 2 Jahrtausende lang gab man sich mit der rein spekulativen Hypothese von Demokrit bzw. Lucretius zufrieden. Erst im 19. Jahrhundert ging der englische Physiker und Chemiker John Dalton (1766—1844) an die experimentelle Überprüfung der atomistischen Anschauungen der Alten.

Ein Versuch folgte dem anderen. Sorgfältig und penibel wog Dalton die Stoffmengen ab, die in eine Reaktion eintreten, und verglich die Ergebnisse mit den Stoffmengen, die nach der Reaktion erhalten wurden.

Aus langewährenden chemischen Experimenten zog Dalton folgenden wichtigen Schluß: Jeder chemische Stoff verbindet sich nur in einem bestimmten Verhältnis mit einem anderen. Wie im Kaleidoskop aus ein und denselben Glassplittern eine ungeheuer große Zahl wunderlicher Kompositionen entsteht, bilden sich aus kleinsten „Stückchen" der verschiedenen Stoffe immer neue Moleküle.

Nun, der Appetit kommt mit dem Essen. Dalton hatte die Chemiker auf den Geschmack gebracht, ihre Kräfte an der Zerkleinerung der Stoffe zu versuchen. So begannen sie, die Materie buchstäblich „auf die Folter zu spannen". Hunderte chemischer Verbindungen wurden erhitzt, destilliert, verdampft und geschmolzen. Die Verbindungen zerfielen in einzelne „Bruchstücke" verschiedener Sorten. Diese „Stücke" hielten dann zunächst allen weiteren Einwirkungen stand und zerfielen nicht weiter. Was lag näher, als sie als elementarste Partikeln der Materie aufzufassen und anzunehmen, daß es kleinere Partikeln als diese nicht geben kann? Was lag näher, als sie mit den hypothetischen Atomen Demokrits zu identifizieren?

Auf diesem atomaren Niveau der Materiestruktur wurde das Periodensystem der chemischen Elemente entwickelt. Dmitri Iwanowitsch Mendelejew (1834—1907) schuf sein System gestützt auf nichts anderes als auf die Atomgewichte der zu jener Zeit bekannten Elemente und auf seine — wie später Niels Bohr (1885—1962) sagte — „erschütternde Intuition".

Das Periodensystem Mendelejews bereicherte uns in bezug auf unser Wissen über jene ganze Formenvielfalt der belebten und unbelebten Natur, die auf unserem Planeten herrscht. Dieses System war ein außerordentlich wichtiges Stimulans für die Chemie ebenso wie für die Physik jener Zeit; es war die Anregung, neue chemische Elemente zu suchen, für die das Periodensystem noch freie Plätze bereithielt. Heute dient es der Planung der Synthese neuer überschwerer Elemente und zur Vorhersage der Eigenschaften noch nicht entwickelter synthetischer chemischer Verbindungen. Auf seiner Grundlage ist die gesamte chemische Industrie und die Metallurgie aufgebaut.

Mendelejew selbst hatte allerdings ein unbefriedigendes Gefühl, weil er nicht wußte, welche Naturgesetze der von ihm erkannten Periodizität der chemischen und physikalischen Eigenschaften der Elemente zugrunde liegen. Jene Grundgesetze der Natur, die Gesetze der Quantenmechanik, deren Abbild das Periodensystem der Elemente ist, konnten erst entdeckt werden, als sich die Wissenschaftler der Erforschung der Materiestruktur auf dem nächsten, dem nuklearen Niveau zuwandten.

„Die Einsicht in die Ursachen der Erscheinungen, gewonnen aus ihrem äußeren Erscheinungsbild, ist vielleicht das Wichtigste, Teuerste und zugleich Anziehendste der gesamten Wissenschaft", bemerkte das Mitglied der Akademie der Wissenschaften der UdSSR, J. Seldowitsch.

Heute verfügt die Wissenschaft vom Aufbau der Materie über Möglichkeiten, mit deren Hilfe sie bis zu einer Größenordnung von 10^{-17} m ins Innere der Materie eindringen kann. Die Physiker sind bereits beim Studium der Eigenschaften „noch elementarerer" Bausteine der Materie als der Atome. Wozu soll das gut sein?

Wenn es ihnen einmal gelungen sein wird, jene Gesetze zu finden, die alle Einzelheiten ihres Verhaltens, alle ihre Qualitäten erklären, wenn sich aus diesen Gesetzen vor-

hersagen läßt, wie viele derartiger Bausteine existieren müssen, dann werden wir ein „Periodensystem" der Elementarteilchen erhalten. Dieses wiederum wird uns den Schlüssel zum Verständnis eines wesentlich weiterreichenden Kreises von Erscheinungen liefern, die die Mikrowelt ebenso wie die Kosmologie umfassen.

„Freilich bleibt eine einheitliche Theorie der Mikro- und Makrowelt", so sagte Werner Heisenberg (1901—1976), „bis zum heutigen Tage nach wie vor in erheblichem Maße' eine ‚Zukunftsmusik'." Doch der Komponist, der diese Musik zu schreiben imstande sein wird, ist wahrscheinlich bereits geboren.

Die Chemie schenkte uns nicht nur die Atome, sondern versah sie zugleich mit Etiketten. Ein Etikett, das Gebrauchsgütern aufgeklebt wird, „verkündet" dem Benutzer, welche Eigenschaften das Produkt besitzt und enthält außerdem die Gebrauchsanweisung. Das „chemische Etikett" an den Atomen erklärte deren Unveränderlichkeit und Unteilbarkeit zu ihrer grundlegenden Eigenschaft.

Die Unwiderruflichkeit der Auffassungen der Chemiker war seinerzeit der Grund für die entsprechend negative Einstellung zu den Atomen. Wenn die Atome tatsächlich unteilbar sind, warum sollte man Zeit darauf verschwenden, ihren Aufbau zu begreifen?

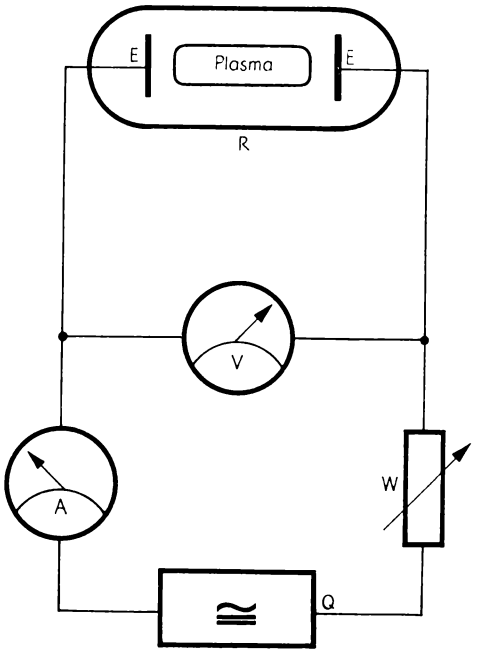
Isaac Newton (1643—1727) schrieb: „Ich glaube, daß Gott am Anfang den Stoff in Form fester, undurchdringlicher und beweglicher Partikeln schuf und daß er diesen Partikeln jene Größe, jene Form und jene übrigen Eigenschaften verlieh und sie in jenen Relativverhältnissen schuf, wie es zu dem Zweck nötig war, für den er sie geschaffen hat."

Alle bis dahin gewonnenen Erfahrungstatsachen führten immer wieder nur zu dem einen Schluß, daß eine chemische Beeinflussung der Atome unmöglich sei.

Warum betrachtete man aber nur eine chemische Beeinflussung? Wo waren die Physiker? Sie interessierten sich damals nicht für die Atomistik. Der Grund dafür war, daß sie zu jener Zeit keine Meßgeräte zur Beobachtung der Atome hatten. So sahen sie die Atome durch die Brille der Chemiker und vertrauten diesen unbedenklich in allem.

Der bekannte Unbekannte

Doch die Physiker hatten Glück. Sie brauchten kein neues Gerät zu erfinden und patentieren zu lassen. Auch die Errichtung einer so komplizierten und teuren Anlage, wie etwa eines modernen Beschleunigers, war nicht erforderlich. Alles war viel einfacher.



Modell einer Gasentladungsröhre

Ein zerbrechliches Glasrohr — einige Dutzend Zentimeter lang — mit eingeschmolzenen Elektroden hatte bereits mehr als einer Physikergeneration treue Dienste geleistet. Mit seiner Hilfe wurden elektrische Entladungen in Gasen bei vermindertem Druck untersucht. Es war die Gasentladungsröhre, wohl das populärste Gerät der Physik des 19. Jahrhunderts. Sie sollte zu dem Instrument werden, auf dem die ersten „Akkorde" der Atom- und Kernphysik erklangen.

Ruhig und ohne Hast untersuchten die Physiker elektrische Entladungen in Gasen. Ruhig und ohne Hast schrieben sie Tatsachen und Zahlen, die eine ihnen gewohnte Erscheinung charakterisierten, in ihre Laborbücher ein.

Ja, wenn sie etwas geahnt hätten! Aber niemand vermutete auch nur im geringsten, daß sich in dieser Röhre keineswegs Materie befindet, wie wir ihr im Alltag ständig begegnen, sondern daß die Materie hier vielmehr unter dem Einfluß der angelegten Spannung in einem neuen, der gelehrten Welt noch unbekannten Zustand entsteht, aufgespalten in negativ und positiv geladene Partikeln.

Bereits in der Mitte des vorigen Jahrhunderts hatte der englische Physiker und Chemiker William Crookes (1832—1919) die Entdeckung gemacht, daß in der Entladungsröhre ein Strom negativ geladener Partikeln von der Katode zur Anode fließt. Die Physiker nahmen diese Mitteilung sehr gleichmütig auf. Crookes selbst allerdings zog daraus einen ungewöhnlichen Schluß. „Wir haben", so schrieb er, „die unserer Kontrolle gehorchenden, unteilbaren Partikeln gewissermaßen bereits in der Hand, von denen man mit hinreichendem Grund annehmen darf, daß sie die physikalische Grundlage des Alls bilden." Die Wissenschaft brauchte 30 lange Jahre, um sich davon zu überzeugen, daß sich in der Gasentladungsröhre unter dem Einfluß der Spannung ein Strom von Bruchstücken der „unteilbaren" Atome dahinbewegt!

Joseph John Thomson (1856—1937), Professor am Cavendish-Laboratorium in Großbritannien, begann eine gründliche Untersuchung der Katodenstrahlen.

Alles fing mit dem für einen Physiker verständlichen Wunsch an, die Natur der in der Röhre entdeckten unbekannten Partikeln zu ergründen. J. J. Thomson — ein hervorragender Experimentalphysiker — stellte eine Reihe scharfsinnig ausgeklügelter Versuche an. Er fand heraus, daß die Katodenstrahlen einen Strom von Elektronen darstellen, Partikeln, die jeweils eine negative Ladungseinheit tragen. Später ermittelte er das Verhältnis zwischen Ladung und Masse und schließlich auch die Masse eines Elektrons.

Im Verlauf einer neuen Versuchsserie wollte J. J. Thomson feststellen, ob die Eigenschaften der Elektronen davon abhängig sind, welches Gas sich in der Entladungsröhre befindet.

Das Ergebnis versetzte den Wissenschaftler in Erstaunen. Alle Elektronen waren untereinander völlig gleich. Demnach mußten also neben den Atomen auch andere kleinste Partikeln Bestandteil aller Atome sämtlicher Elemente sein? Die Atome — einheitlich und unteilbar — waren also gar nicht ganz so einfach aufgebaut?

Der ruhige, ausgeglichene J. J. Thomson eignete sich wohl kaum für die Rolle eines Neuerers in der Wissenschaft — sowohl nach seiner Denkweise als auch nach seinem Charakter. Er besaß weder das energische Temperament eines Zerstörers aller Grundlagen, noch hatte er jemals den Wunsch gehabt, alle diese Grundlagen zu verletzen.

Neuerungen durchzusetzen ist das Schicksal der Jugend. Einem 40jährigen Professor am Cavendish-Laboratorium stand es besser zu Gesicht, die einmal errungenen, wohlerworbenen Lebenspositionen zu festigen. J. J. Thomson war in den besten Traditionen der klassischen Physik erzogen. Nie hatte er Zweifel an ihrer Allgemeingültigkeit und ihrer Leistungsfähigkeit gehabt.

Und nun war alles zusammengebrochen. Was war zu tun? Sollte man weiterhin die chemische Atomistik anbeten? Oder sollte man die Existenz irgendwelcher anderer Partikeln akzeptieren, die noch elementarer sein müßten als das „unteilbare" Atom selbst? Zur Ehre J. J. Thomsons sei gesagt, daß der Kampf zweier Seelen in seiner Brust — der des Neuerers und der des Konservativen — mit dem Sieg der ersteren endete. Der Experimentalphysiker, für den Tatsachen die einzig reale Sache auf der Welt waren, besiegte den Menschen, der mit Händen und Füßen an die ehernen Gesetze der zeitgenössischen klassischen Physik gefesselt war. So wurde der atomare Rubikon überschritten. Die einfachsten Bausteine des Weltgebäudes waren strukturiert und bestanden zumindest auch aus Elektronen.

Drei Jahre vor dem Ende des 19. Jahrhunderts kam es in der Wissenschaft zu einem Führungswechsel. Die Chemie mußte zur Seite rücken, und die Physik trat hervor. Allein die Entdeckung des ersten Elementarteilchens, des Elektrons, d. h. einer weiteren Form der Materie, läßt sich schwer mit irgend etwas anderem vergleichen. Mit der Zerstörung des Mythos von der Unteilbarkeit des Atoms brach ein ganzes philosophisches System zusammen. Die alte, von vielen Wissenschaftlergenerationen entwickelte Weltanschauung begann sich zu ändern.

Als die Physiker die „atomare Grenze“ überschritten, erhielten sie durch die klassische Mechanik Newtons keine Unterstützung mehr. Sie verloren den Boden unter den Füßen, auf dem Jahrhunderte hindurch das Gebäude ihrer Wissenschaft gestanden hatte.

Eine neue Theorie hingegen, die die soeben entdeckten atomaren Erscheinungen beschrieben hätte, gab es vorläufig nicht. Bis zur Entstehung der Quantenmechanik mußten noch einige Jahrzehnte verstreichen.

Zwei Anwärter

Die Entdeckung des Elektrons, für die J. J. Thomson den Nobelpreis erhielt, hatte die Hauptsache noch nicht erklärt. Die Frage „Wie ist das Atom aufgebaut?“ blieb offen.

Doch wir wollen nicht ungerecht gegen das Zeitalter unserer Großeltern sein. Buchstäblich auf der „Zielgeraden“ des vorigen Jahrhunderts erhielten die Physiker jenes Werkzeug, mit dessen Hilfe es ihnen — nun allerdings bereits in unserem Jahrhundert — gelingen sollte, in die Tiefe des Atoms vorzudringen.

Alles nahm seinen Anfang an der Universität von Neuseeland, wo der zukünftige Vater der Kernphysik, Ernest Rutherford (1871—1937), die Schulbank drückte. Der Student hatte die Kühnheit, den in der Chemie herrschenden Anschauungen über das Atom kein Vertrauen zu schenken. Zur Bekräftigung seiner „ketzerischen“ Anschauungen gab er seiner ersten wissenschaftlichen Arbeit den Titel „Die Evolution der Elemente“.

Nach Abschluß der Universität im Jahre 1894 ging Rutherford als Praktikant nach England. Er hatte großes Glück; er kam in das Cavendish-Laboratorium zu J. J. Thomson. Damals fand ein Ereignis statt, das der Verfasser der „Evolution der Elemente“ zwangsläufig mit größter Aufmerksamkeit registrieren mußte. 1896 entdeckte ein Vertreter der großen französischen Physikerfamilie Becquerel die natürliche Radioaktivität. Henri Becquerel (1852—1908) beobachtete den spontanen Zerfall der Atome. Dies untergrub die Autorität der Atome als kleinste unteilbare Partikeln der Stoffe endgültig.

Gemeinsam mit J. J. Thomson ging Rutherford an die Untersuchung der kürzlich entdeckten Strahlung. Schon bald stieß er auf eine vielversprechende Besonderheit. Rutherford konnte nachweisen, daß die radioaktive Strahlung zumindest aus zwei Komponenten besteht: aus den leichten, negativ geladenen β-Partikeln (Elektronen), in denen die Thomsonschen Elektronen wiederzuerkennen waren, und aus den schweren, positiv geladenen α-Partikeln (Kerne der Heliumatome).

Die „goldenen Tage" der Zusammenarbeit mit Thomson waren rasch zu Ende. Rutherford ging zunächst nach Kanada und später nach Manchester. Freilich verließ er das Cavendish-Laboratorium nicht mit leeren Händen. In der Hosentasche trug er — bildlich gesprochen — eine geladene Pistole.

Der Schuß fiel aber erst später. Rutherford war schon über 40 Jahre alt und ein allgemein verehrter Professor an der Universität Manchester, weithin bekannter Fachmann für Radioaktivität und Nobelpreisträger.

Er beschoß die Atome mit schweren α-Teilchen. Zwischen der α-Teilchenquelle und einer fotografischen Platte ordnete er dünne Folien aus verschiedenen Stoffen an. Der schwarze Fleck, der sich auf der entwickelten fotografischen Platte zeigte — das Ergebnis der aufgetroffenen α-Teilchen —, hatte in diesem Fall verwaschene Ränder. Die Atome des Folienmaterials lenkten die α-Teilchen ein wenig aus ihrer Flugrichtung ab.

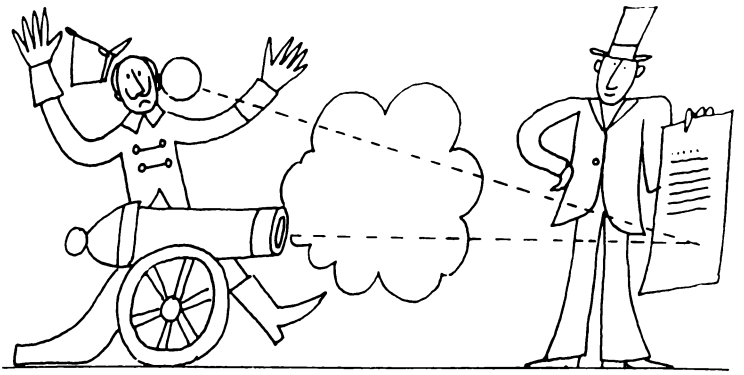
Die ersten Schüsse Rutherfords lagen nicht besonders gut. Die schnellen α-Teilchen passierten die sehr dünnen Folien rasch und wurden fast überhaupt nicht vom geraden Weg abgelenkt. Hatte J. J. Thomson also recht mit seiner Meinung, daß das Atom eine positiv geladene Kugel sei, vollgestopft mit Elektronen?

Thomsons Atommodell befriedigte Rutherford nicht gänzlich. Dieses Gefühl veranlaßte ihn zur Fortsetzung der einmal begonnenen Arbeit.

Er beauftragte seinen Schüler Marsden damit, die Versuche fortzusetzen. Er tat dies mit den Worten: „Ich erwarte zwar nicht, daß aus Ihren Experimenten etwas Vernünftiges herauskommt, aber passen Sie trotzdem auf, vielleicht finden Sie etwas Neues." Für Rutherford war die Wissenschaft ein in immerwährendem Wachstum begriffener Baum, den der Gärtner nach seinem Wunsch zie-

hen mußte. Der Gärtner mußte ständig verdorrte Zweige abschneiden, um Platz für neue Triebe zu schaffen.

Diese neuen Triebe tauchten sehr bald auf. Marsden fand heraus, daß einige α-Teilchen beim Eindringen in eine dünne Stoffschicht bis zu 90° und gelegentlich sogar um 180° abgelenkt werden!



Rutherford selbst schrieb später darüber: „Dieser Vorgang erschien uns ungefähr ebenso wahrscheinlich, als hätte jemand mit einem 15-Zoll-Geschoß auf ein Stück Zigarettenpapier geschossen und wäre dann von dem zurückprallenden Geschoß selbst getroffen worden."

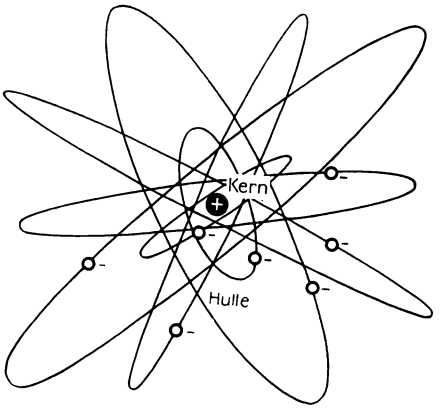
Was war geschehen? Die Antwort lag auf der Hand: Die α-Teilchen mußten mit einem massiven geladenen Körper zusammengeprallt sein, der weitaus schwerer als die Elektronen bzw. die α-Teilchen selbst sein mußte.

Die ersten im Hinterland der Materie abgesetzten „Kundschafter" brachten eine unerhörte Nachricht mit: Im Mittelpunkt des halbleeren Atoms lag ein positiv geladener Kern, dessen Größe nur ein Hunderttausendstel von der des Atoms betrug. Hinter dieser fast unüberwindlichen elektrischen Barriere waren wie hinter hohen Festungsmauern die Schätze des Atoms verborgen. Doch welche waren es? Befanden sich dort vielleicht unbekannte Partikeln mit positiver elektrischer Ladung?

Physiker sind begeisterungsfähige Menschen. Wird einmal irgend etwas Neues entdeckt, dann stürzen sich gleich alle darüber her.

Fortan galt Rutherfords gesamtes Interesse dem Atomkern. Wie sollte man näher an den Kern herankommen, wie seine Abstoßungskraft überwinden?

Rutherford und seine Mitarbeiter und Schüler dachten lange über dieses Problem nach. Als erster fand ein Enkel des großen Charles Darwin einen Ausweg. Er schlug vor, mit den Kernen der leichtesten Elemente zu beginnen, denn da ihre Ladung kleiner ist, ist auch ihre Abstoßungskraft weitaus schwächer.



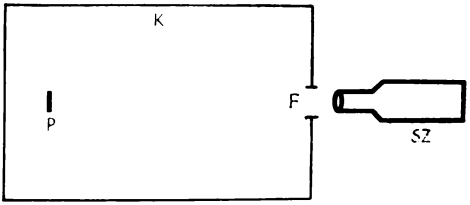
Rutherfords Atommodell

Das leichteste Element des Weltalls ist der Wasserstoff. So wurde eine Spezialkammer mit Wasserstoff gefüllt und damit begonnen, diese mit α-Teilchen zu beschießen. Die Ausführung der Versuche oblag nach wie vor Marsden.

Was bedeutet eigentlich „Ausführung"? Heute stehen den Physikern komplizierte Meßapparaturen zur Verfügung. Sie „machen" buchstäblich alles: Sie weisen nach, speichern, zeichnen auf, stellen grafische Darstellungen her und sind sogar imstande, die Versuchsergebnisse zu systematisieren.

Damals war alles ganz anders. Marsden saß stundenlang vor dieser Kammer. Auf dem Leuchtschirm blitzten nacheinander helle Sternchen auf. Um die α-Teilchen konnte es sich dabei nicht handeln, denn diese waren einfach außerstande, den Leuchtschirm zu erreichen. Also mußten

sie ihre Energie in der Kammer an die leichten Wasserstoffkerne abgeben, deren Lichtblitze auf dem Leuchtschirm erschienen.



$$^{14}_{7}N + ^{4}_{2}He \longrightarrow ^{17}_{8}O + ^{1}_{1}H$$

Rutherfords Anordnung zur Entdeckung der Atomumwandlung (*P* α-Präparat, *F* Fenster, *SZ* Szintillationszähler, *K* mit Stickstoff gefüllte Kammer)

Danach saugte Marsden den Wasserstoff aus der Kammer ab und füllte sie zur Kontrolle mit Stickstoff. Doch die Lichtblitze traten wiederum auf: Was war das, ein Fehler? Woher sollten in der stickstoffgefüllten Kammer Wasserstoffatome kommen? Vielleicht war die Kammer schlecht gereinigt worden? Dieser Fakt mußte unbedingt überprüft werden.

Der erste Weltkrieg zerstörte alle Pläne. Innerhalb weniger Tage war das Labor verwaist. Marsden kämpfte in der englischen Armee, und gegen ihn kämpfte in der deutschen Armee sein Freund und einer der nächsten Mitarbeiter Rutherfords, Hans Geiger. An der Front fiel Rutherfords Lieblingsschüler, Henry Moseley (1887—1915).

Rutherford ließ die Forschungsarbeiten sein und ging mit einigen Laboranten daran, ein Gerät zur Ortung von U-Booten zu entwickeln.

Doch in Gedanken kehrte er immer wieder zu den ungewöhnlichen Ergebnissen zurück, die Marsden unmittelbar vor Kriegsausbruch erhalten hatte. Was wäre denn, wenn die Kammer wirklich einwandfrei abgesaugt worden war, was, wenn Marsden auf dem Leuchtschirm gar keine Wasserstoffatome gezählt hatte?

Von Vorfreude und Furcht im Angesicht dieses Gedankens bewegt, kontrollierte Rutherford nächtelang die Versuche seines Schülers. Immer wieder pumpte er den Wasserstoff aus der Kammer, so daß diese schließlich — so schien es jedenfalls — kein einziges Wasserstoffatom mehr enthalten durfte. Wurde sie dann mit Stickstoff gefüllt, konnten auf dem Leuchtschirm wieder jene rätselvollen Lichtblitze beobachtet werden.

Wie sehr hätte Rutherford in diesen Minuten des Rates seiner europäischen Freunde bedurft, wie abscheulich war dieser Krieg! Nicht nur, daß er die Wissenschaftler voneinander losgerissen hatte, er bremste auch die Wissenschaft selbst.

Ende 1916 schrieb Rutherford an seinen Freund, den dänischen Physiker Niels Bohr: „Ich weise leichte Atome nach, die von den α-Teilchen in Bewegung versetzt werden, zähle sie und sehe, wie diese Ergebnisse helles Licht auf den Charakter und die Verteilung der Kräfte in der Nähe des Kerns werfen. Mit diesem Mittel versuche ich, das Atom aufzubrechen." Dann aber folgte das Wichtigste: „Ich habe einige, wie mir scheint, recht erstaunliche Ergebnisse erhalten, doch es wird noch harter und langer Arbeit bedürfen, um meine Schlüsse mit sicheren Beweisen zu versehen."

Von welchen Ergebnissen ist hier die Rede? Es handelt sich um nicht mehr und nicht weniger als um die erste nachgewiesene Kernreaktion auf der Welt! Es war die erste künstliche Spaltung von Stickstoffkernen mittels α-Teilchen, bei der ein leichtes Wasserstoffatom freigesetzt wird.

So wurde die Kammer nacheinander mit Stickstoff, Luft oder auch mit reinem Sauerstoff gefüllt. In allen Fällen zeigte der Leuchtschirm die Gegenwart von Wasserstoffkernen an. Doch die Liste der untersuchten Elemente brach sehr rasch ab: Die schwereren Kerne waren für α-Teilchen geringer Energie unzugänglich.

Rutherford freilich genügten die erzielten Resultate vollauf. Er hatte längst keine Zweifel mehr daran, daß er jenes positiv geladene „Bauteil" entdeckt hatte, das sämtliche Atomkerne enthalten.

Sein Ergebnis wurde auch von den Wissenschaftlern bestätigt, die die leichteste positiv geladene Partikel im Entladungsrohr suchten. Dort bewegte sich ein Strom von Gasionen in umgekehrter Richtung — von der Anode zur

Katode —, also Atome, denen einige Elektronen entrissen worden waren. Die leichteste Partikel unter diesen Ionen war der Kern des Wasserstoffatoms, der sein einziges Elektron verloren hatte.

So wurde das zweite Elementarteilchen „geboren", das Proton, der Kern des Wasserstoffatoms. Ein Proton ist 2000mal so schwer wie ein Elektron. Es entsprach der Vorstellung der Wissenschaftler von einem möglichen positiven Ladungsträger im Atom vollauf und paßte ausgezeichnet zu der vergleichsweise riesigen Masse des Atomkerns.

Diese Entdeckung war nicht begleitet von einem Kampf gegen die ehernen Gesetze der Wissenschaft, und auch psychologische Schranken mußten nicht überwunden werden. Man kann vielleicht so formulieren, daß das Elektron die ganze Wucht der wissenschaftlichen Schlachten auf sich gezogen hatte.

Nun lagen zwei „Grundbausteine" der Materie vor den Physikern, die mit diesem Ergebnis recht zufrieden waren. Ihr „Stoff" bestand aus Atomen, die Atome wiederum setzten sich aus Elektronen und Atomkernen zusammen.

Hier allerdings entdeckte man einen Pferdefuß. Der Atomkern war ohne Zweifel stabil. Aber wie sollte man sich einen stabilen Kern vorstellen, der nur aus Protonen bestand? Schließlich konnte man doch die elektrische Abstoßung zwischen gleichnamig geladenen Partikeln nicht außer Kraft setzen!

In jenen Jahren wußte man noch nichts über die Kernkräfte und über die Anziehung, die zwischen den Kernbestandteilen auftritt. So fand man den Ausweg in einer künstlichen, rein spekulativen Konstruktion, indem man annahm, daß der Kern Protonen und Elektronen enthalte, die die abstoßenden elektrostatischen Kräfte kompensieren.

Welch ein einfaches und augenfälliges Bild! Es gab kein Durcheinander von einigen Dutzend „einfachster unteilbarer" Atome, stattdessen nur zwei Elementarteilchen: das leichte Elektron und das schwere Proton.

Das Dritte, das nicht überzählig ist

In der Nähe eines Berylliumplättchens lag ein kleines Stück radioaktiven Materials. Die α-Teilchen traten durch das Beryllium und schlugen dabei Protonen los. Der Gei-

gerzähler, der inzwischen den Beobachter abgelöst hatte, der so leicht ermüdete und so leicht Fehler machte, zählte die aus der Folie herausfliegenden Partikeln.

Ein ganz gewöhnlicher Arbeitstag in einem physikalischen Laboratorium Deutschlands zu Beginn der 30er Jahre: Professor Walter Bothe und sein Mitarbeiter Becker brachten ihre Aufzeichnungen in Ordnung.

Als die Protonenzählung beendet war, rückte man den Geigerzähler ein Stück zur Seite, damit ihn die aus dem Beryllium austretenden Protonen nicht mehr erreichen konnten. Zur Bestimmung der Hintergrundstrahlung wurde nochmals Hochspannung angelegt.

Doch das Meßinstrument zählte weiter. Man rückte es noch ein Stück weiter weg. Immer noch arbeitete der Zähler. Das Erstaunen wurde von Verwirrung abgelöst. Was konnte denn der Zähler in einer so großen Entfernung registrieren?

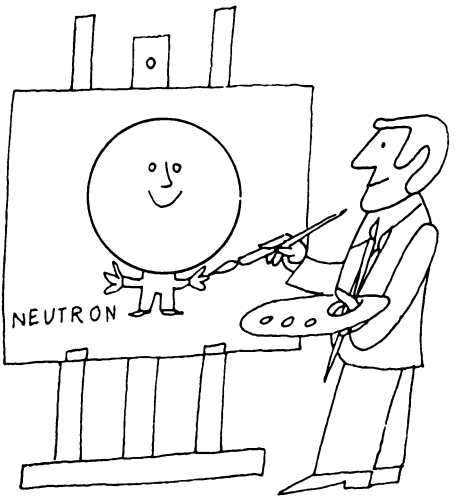
Vielleicht waren es γ-Quanten, eine elektromagnetische Strahlung (ähnlich der Röntgenstrahlung) von größerer Durchdringungskraft als die der Protonen? Gegen γ-Quanten ist eine Bleiplatte eine ausgezeichnete Abschirmung. Doch auch sie nützte nichts: Das Ticken setzte sich im gleichen Rhythmus fort. Auch eine zweite und dritte Bleiplatte zeigten keine Wirkung.

Der Geigerzähler wurde von irgendeiner ungewöhnlichen Strahlung getroffen, für die eine dicke Bleischicht kein größeres Hindernis war als ein Stück Zigarettenpapier. Bothe und Becker konnten sich jedoch nicht zum entscheidenden Schritt entschließen und sagen: „Wir haben neue, noch unbekannte Partikeln gefunden, die aus Berylliumkernen stammen!“ Sie schrieben stillschweigend in ihr Laborjournal: „Feststellung gewöhnlicher γ-Quanten mit hoher Energie“.

In Frankreich begann sich das Ehepaar Irène und Frédéric Joliot-Curie für die „Beryllium“-Strahlung zu interessieren. Aber auch die französischen Physiker wiederholten nur die Schlußfolgerung ihrer deutschen Kollegen: „Eine ungewöhnlich durchdringende γ-Strahlung“, so lautete das Ergebnis des Ehepaars Joliot-Curie. Dieser Schluß wurde ungeachtet der Tatsache gezogen, daß er ein Grundgesetz der Mechanik, das Gesetz der Erhaltung des Impulses, verletzte.

Die „Identität“ der zweimal übersehenen Partikeln

ermittelte dann ein Schüler Rutherfords, Mitglied der Londoner Royal Society und späterer Nobelpreisträger, James Chadwick (geb. 1891).



Im Februar 1932, einen Monat nach der Mitteilung des Ehepaars Joliot-Curie über „eine ungewöhnlich durchdringende γ-Strahlung" erschien in der englischen wissenschaftlichen Zeitschrift „Nature" ein kurzer Brief an die Redaktion, der von Chadwick unterzeichnet war.

„Diese experimentellen Ergebnisse", schrieb der Verfasser, „lassen sich auf Grund 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 entsprechende Masse, jedoch keine Ladung besitzen."

Chadwick lieferte damit ein fast exaktes „Porträt" des neutralen Elementarteilchens, des Neutrons. Dieses Teilchen besaß keine elektrische Ladung und war deshalb so ungreifbar.

Das Neutron, eine schwere neutrale Partikel, fand das größte Interesse der Physiker. Durch seine Entdeckung wurde die „unangenehme" Frage nach der Stabilität des Kerns aus der Welt geschafft. Mit dem Auftauchen der

Neutronen, die keine elektrostatischen Abstoßungskräfte erfahren, waren die Elektronen ein für allemal als Kernbestandteile unnötig.

Die Liste der atomaren Elementarteilchen war abgeschlossen. Aus schweren Protonen und Neutronen, die man jetzt auch als Nukleonen (Kernbestandteile) zu bezeichnen begann, bauten sich die Atomkerne aller chemischen Elemente auf. Die Elektronenhüllen gaben für das chemische Verhalten der Elemente den Ton an.

Die neue Rolle

Der Physiker baut sich sein Weltbild auf, indem er Atome und Atomkerne aus den verschiedenen Elementarteilchen zusammensetzt. Allerdings bleibt dieses Weltbild recht unvollkommen, wenn die einzelnen Komponenten durch nichts zusammengehalten werden. Wo steckt der „Zement" oder der „Klebstoff", der die Protonen und die Neutronen in den Kernen verbindet? Welche Kräfte sind es, die den Zusammenhalt bewirken?

Vielleicht sind es die Gravitationskräfte? Doch mit Hilfe dieser Kräfte könnte man die Protonen und Neutronen nicht in den Kernen festhalten, dafür sind ihre Massen zu klein. Auch mit den elektromagnetischen Kräften läßt sich die „Rolle" nicht besetzen. Die gleichnamig geladenen Protonen würden nach allen Himmelsrichtungen auseinanderfliegen. Aber was hält dann die Neutronen an ihrem Platz?

Nach Entdeckung des Atomkerns bemühte sich Rutherford, in das Geheimnis der Kräfte einzudringen, die im Innern des von ihm entdeckten Mikroobjekts wirken. Mit größter Aufmerksamkeit beobachtete er die „Begegnung" zwischen α-Teilchen und Kernen. „Wenn diese Kräfte nicht früher entdeckt wurden", überlegte Rutherford, „so bedeutet dies, daß sie in nur sehr geringen Entfernungen auftreten. Wie klein muß der Abstand sein, damit ihr Einfluß merklich wird?"

Versuch folgte auf Versuch. Jahre vergingen, doch eine eindeutige Beantwortung dieser Frage stand noch immer aus. Es gelang nicht, bei Annäherung der atomaren „Kundschafter" an die schweren Kerne etwas Besonderes zu ent-

decken, selbst bei einer Entfernung von 10^{-14} m nicht. Nur die ganz einfache elektrostatische Abstoßung war festzustellen, genau die gleiche Kraft, die bei zwei gleichnamig geladenen Kugeln zur Vorführung des Coulombschen Gesetzes im Schulversuch auftritt.

Da fanden plötzlich α-Teilchen, die sich Wasserstoffkernen bis auf einen Abstand von 10^{-15} m näherten, einen ungewöhnlichen „Empfang". Ihre Wechselwirkung trug keinen elektrostatischen Charakter. Hier geschah etwas völlig anderes. Der Raum in einer Entfernung von 10^{-15}m um den Kern wird von den Kernkräften kontrolliert, die weder mit der elektrostatischen Kraft noch mit anderen bekannten Kräften zusammenhängen. Ihr wichtigstes Merkmal ist ihre äußerst geringe Reichweite.

Im Verlauf eines einzigen Jahres, des entscheidenden Jahres 1924, gelang Rutherford mit seinen Mitarbeitern die Aufspaltung der Kerne nahezu aller leichten Elemente. Dabei beobachteten die Wissenschaftler in allen Fällen das Auftreten von Protonen mit einer Energie, die wesentlich größer war als jener Energiebetrag, der ihnen von den α-Teilchen übertragen wurde.

Warum war diese Energie höher? Sollte hier vielleicht doch eine Verletzung des Energieerhaltungssatzes vorliegen? Nichts dergleichen! Es war schlicht und einfach das Ergebnis der Wirkung von Kernkräften. Die Protonen erhielten einen zusätzlichen Impuls auf Kosten der Energiereserven des Kerns, genau jener Kernenergie, die wir heute bereits in den Kernkraftwerken nutzen.

So wurde der „Zement" entdeckt, mit dessen Hilfe die Natur die verschiedenen Stoffe erzeugt. Die Kernkräfte sind 1000fach intensiver als die elektromagnetischen Kräfte. Sie halten ein Proton und ein Neutron im Kern des Wasserstoffisotops Deuterium ebensofest zusammen wie einige 100 Protonen und Neutronen in den schweren Kernen etwa des Urans.

So hatten die Physiker neue Kräfte in der Natur gefunden und auch Namen dafür ausgedacht. Freilich bedeutet das noch längst nicht, daß die Wissenschaftler sich sogleich über das Wesen dieser Kräfte im klaren waren und ihren Charakter bis in den letzten Winkel durchschaut hatten. Man bezeichnete die neuentdeckten Kräfte als Kernkräfte. Aber kann man vielleicht aus dem bloßen Namen Müller erraten, was für ein Mensch sich dahinter verbirgt?

In bezug auf die Kernkräfte ist die Situation sogar noch schwieriger, denn wenn Sie einem unbekannten Herrn Müller begegnen, wissen Sie doch zumindest, daß es sich immerhin um einen Menschen handelt. Die physikalische Natur der Kernkräfte ist jedoch bis heute unbekannt. Auf das Problem dieser Kräfte wurden seit Rutherfords Zeiten unzählige Arbeitsstunden aufgewandt. Den Wissenschaftlern gelang die Ermittlung vieler Eigenschaften der Kernkräfte, doch eine strenge Theorie dazu existiert bis heute nicht.

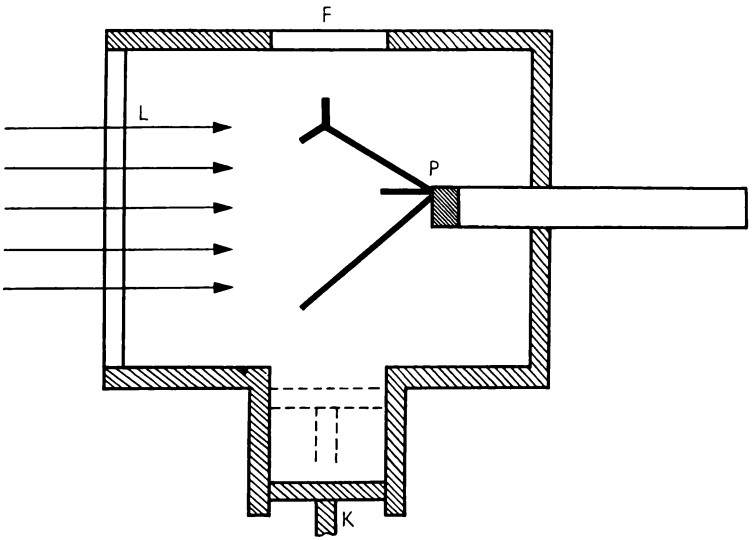
Die Physiker sind noch nicht in der Lage, das ungewöhnlich starke Zueinanderstreben der Protonen und Neutronen in exakte mathematische Formeln zu kleiden. Wäre es vielleicht wenigstens möglich, sich eine Vorstellung vom Wirkungsmechanismus der Kernkräfte zu machen? Doch wie wollte man versuchen, eine neue Erscheinung innerhalb der Mikrowelt zu beschreiben, solange es weder eine Theorie noch experimentelle Ergebnisse gibt?

Bei der Erforschung der Makrowelt bedienen sich die Physiker häufig bestimmter Analogien. Darf dieses Verfahren auch auf Kernprozesse angewendet werden? Jede Analogie stützt sich auf das Prinzip der materiellen Einheit der Welt. Wie erstaunlich die Elementarteilchen auch immer sein mögen, sie sind ihrer Natur nach alle materiell. Sie sind allesamt mit bestimmten Eigenschaften der Objekte der Makrowelt (wie Bewegung, Energie usw.) ausgestattet.

Gestützt auf das Analogieverfahren nahmen Akademiemitglied I. Tamm und Professor D. Iwanenko bereits 1934 an, daß die nuklearen Wechselwirkungen allem Anschein nach mit Hilfe eines Elektrons und eines Neutrinos übertragen werden, deren Emission beim β-Zerfall der Kerne eintritt. Es sollte ungefähr der gleiche Vorgang sein wie die Wechselwirkung geladener Körper untereinander, bei der es zu einem Austausch elektromagnetischer „Strahlungspartikeln“ (Photonen) kommt.

1935 griff ein Hochschuldozent aus Osaka in Japan, der 28jährige Theoretiker Hideki Yukawa (geb. 1907), diese Idee auf und tat einen neuen, außerordentlich kühnen Schritt. Innerhalb eines Jahres „schrieb er eine neue Rolle“ für ein noch nicht entdecktes Elementarteilchen, das Überträger der Kernkräfte sein sollte. Nach ausführlicher Beschreibung der Eigenschaften, die der Bewerber auf den

vakanten Platz haben sollte, forderte der japanische Theoretiker die Experimentalphysiker auf, dieses Teilchen in der kosmischen Strahlung zu suchen.



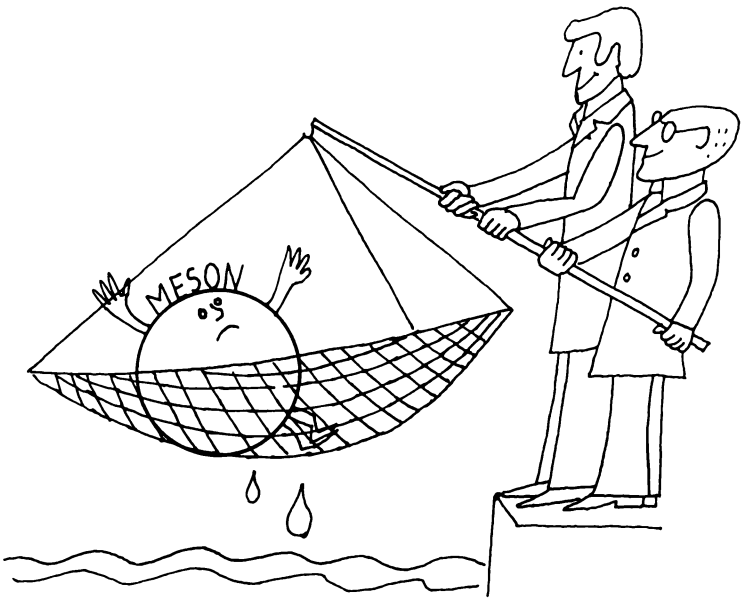
Schema einer Nebelkammer nach Wilson
(*L* Licht, *F* Beobachtungsfenster, *K* Kolben, *P* Präparat bzw. zu untersuchende Teilchen)

Bis zu diesem Zeitpunkt hatten die Physiker jedes Elementarteilchen erst einmal entdeckt und ihm dann seinen Platz im Gesamtbild der Materiestruktur zugewiesen. Hier begannen die Experimentatoren zum ersten Mal ihre Arbeit nach einer genauen Aufgabenstellung der Theoretiker.

Die Wissenschaftler hatten damals gerade begonnen, ernsthaftes Interesse für die kosmische Strahlung zu zeigen, die in den oberen Schichten der Erdatmosphäre entsteht. Sie erforschten den Wechselwirkungsmechanismus zwischen der kosmischen Strahlung und der Atmosphäre und versuchten, die Energie dieser Strahlung mit Hilfe der Wilsonschen Nebelkammer zu messen.

Dieses Meßgerät ist eine sehr interessante, einfache und überaus nützliche Anlage. In einer Kammer wird übersät-

tigter Dampf abgekühlt und kondensiert dann in Form feinster Nebeltröpfchen an Ionen, die die Kammer passierende geladene Partikeln entlang ihrer Flugbahn erzeugen. Bereits im Jahre 1911 von Ch. Wilson entwickelt, wurde das Gerät rasch populär und fand eine außerordent-



lich vielfältige Verwendung. Früher konnte man nämlich nur das Verhalten großer Partikelnmengen beobachten. Die Wilsonsche Nebelkammer ließ jetzt die Spuren einzelner „Bewohner" der Mikrowelt sichtbar und fotografierbar werden.

Die Experimentalphysiker „warfen ihre Netze aus", d.h., sie brachten die Wilsonsche Nebelkammer in die kosmische Strahlung und holten übers Jahr den „Fang" — eine unbekannte Partikel — ein. Sie war dem Teilchen, das Yukawa beschrieben hatte, sehr ähnlich. Ihre Masse lag zwischen der Masse des Protons und der des Elektrons. Deshalb bezeichnete man diese Partikel als Meson, vom griechischen Wort „mesos", was soviel bedeutet wie „das Mittlere".

Die Physiker jubelten, doch ihre Freude war nur kurz. Sie betrachteten sich die neue Partikel etwas aufmerksamer. Das μ-Meson, wie man sie inzwischen nannte, war eine Partikel aus der kosmischen Strahlung, die sich durch überaus große Durchdringungskraft auszeichnete. Es tritt sehr ungern mit Nukleonen in Wechselwirkung. Aus diesem Grunde paßte sie ganz und gar nicht in die Rolle des Yukawa-Teilchens.

In der Physik ist es wie im Alltag. Man sucht das eine und findet etwas ganz anderes. Wozu sind diese μ-Mesonen eigentlich gut? Welchen „Beruf" üben sie aus? Wohin mit dem Mesonenbaustein, den uns die großzügige Mutter Natur geschenkt hatte?

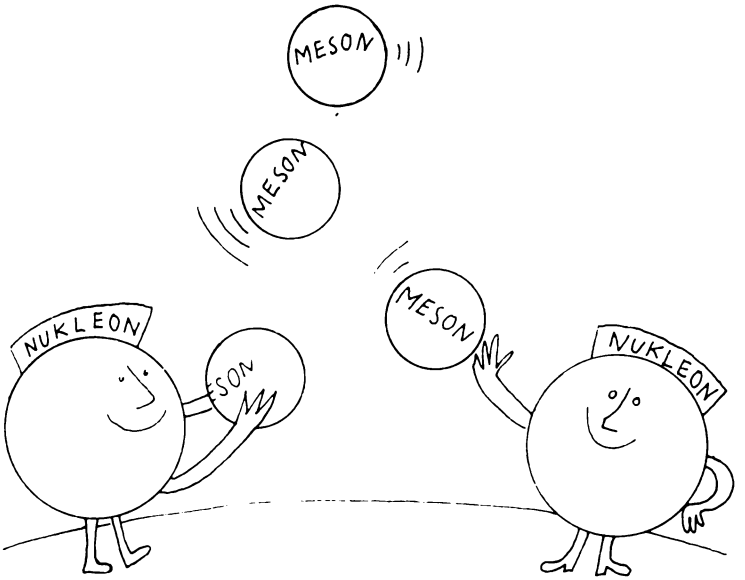
Die Situation, in der sich die Physiker hier befanden, erinnerte ein wenig an die schwierige Lage des neugierigen Äffchens aus der Krylowschen Fabel, das eine Brille ergattert hat, aber nicht weiß, was es damit tun soll.

Fast 4 Jahrzehnte lang bemühen sich die Physiker nun schon, hinter die besondere „Begabung" des μ-Mesons zu kommen, doch all ihre Anstrengungen waren vorläufig vergebens. Sogar eine neue Wissenschaftsrichtung, die Mesochemie, mit praktischem Einsatzgebiet ist inzwischen entstanden. Trotzdem bleibt der Charakter des μ-Mesons in Dunkel gehüllt. Bekannt ist nur, daß es in der „Rolle" eines Elektrons mit der etwa 200fachen Elektronenmasse auftritt. Das Rätsel des μ-Mesons ist bis heute ungelöst.

Wieder vergingen 12 Jahre. Da plötzlich entdeckte man beim Zusammenstoß schneller Protonen mit Atomkernen eine weitere Partikel. Schwerer als das μ-Meson, besitzt sie alle Parameter, mit denen sie auf die Rolle der Yukawa-Partikel Anspruch erheben könnte. Im Unterschied zu den μ-Mesonen zeigt sie eine starke Wechselwirkung mit Atomkernen.

Das Entzücken der Physiker kannte keine Grenzen. Die neuentdeckte Partikel, die den Namen π-Meson erhielt, entsprach genau jenem Bild, das sich die Wissenschaftler von den Überträgern der Kernkräfte gemacht hatten. Unter ständigem Austausch von Mesonen bilden die Nukleonen im Kern eine einheitliche Gruppe, die man vielleicht mit einer Gruppe von Jongleuren im Zirkus vergleichen kann, die sich gegenseitig mehrere Gegenstände gleichzeitig zuwerfen. Doch während die Jongleure mit durchaus stabilen

Requisiten arbeiten, werfen sich die Nukleonen Mesonen zu, die ihrerseits zu momentaner Emission und Absorption befähigt sind. Neutronen und Protonen tauschen sowohl positiv als auch negativ geladene Mesonen miteinander aus, während Protonen untereinander und ebenso Neutronen untereinander ungeladene — neutrale — Mesonen benutzen.



Für diese Entdeckung wurde Hideki Yukawa im Jahre 1947 mit dem Nobelpreis geehrt.

1950 bestand die Welt in der Vorstellung der Physiker aus Protonen, Neutronen, Elektronen, μ-Mesonen, π-Mesonen und Photonen. Die Wissenschaftler wußten, wie sich die gigantische Pyramide der Makrowelt aus diesen Bausteinen zusammensetzt. Sie verstanden auch, warum nicht jeder beliebige Materiebrocken in seine Elementarteilchen zerfällt.

Nur eins wußten sie nicht: Wo sollte man den „Baustein" μ-Meson anbauen?

König Laurins Mantel

In einer der letzten Nächte des Jahres 1846 fand der deutsche Astronom Johann Galle an dem von dem Mathematiker Urbain Leverrier vorhergesagten Platz im Sonnensystem einen neuen Planeten. Er erhielt den Namen Neptun. Diese Entdeckung war ein Triumph der klassischen Physik.

„Die Physik unserer Tage", schrieb 1956 der amerikanische Wissenschaftler Philipp Morrison, „wartet auf eine andere vergleichbare Entdeckung. Unter den Elementarteilchen existiert ein eigener Neptun, eine erstaunliche Partikel, die die Physiker in jeder Übersicht erwähnen, obwohl sie bis heute noch nicht gefunden worden ist."

Was war das für ein Teilchen, das die Physiker suchten? Wozu brauchten sie es? Nach der Entdeckung von Neutron, Proton und Elektron hatte es den Anschein, als sei die immerwährende Frage nach dem Aufbau der Materie nun endlich beantwortet. Damit hätte man dieses Problem von der Tagesordnung absetzen können, wenn da nicht eine kleine, aber sehr ernste Schwierigkeit gewesen wäre.

Die Energie eines Elektrons, das aus einem radioaktiven Kern herausfliegt, läßt sich leicht berechnen. Die beim Zerfall freiwerdende Energie verteilt sich, wie man vor 40 Jahren annahm, nur auf die Elektronen und den Kern selbst. Dabei erfolgt diese Verteilung stets nach dem strengen Gesetz der Mechanik umgekehrt proportional zu den Massen der beteiligten Partikeln.

Als die Physiker jedoch darangingen, die Elektronenenergie auch zu messen, gerieten sie in Verwirrung. Dieses Bild hatte niemand erwartet: Die Elektronen trugen weniger Energie aus dem Kern fort als ihnen zustand. Doch damit nicht genug, der Energiebetrag war jedesmal ein anderer.

Der erste und naheliegendste Gedanke war natürlich, daß es sich um einen Fehler handeln müsse. Mit verbissenem Eifer machten sich die Wissenschaftler auf die Fehlersuche. Zur Widerlegung der merkwürdigen Ergebnisse wurden immer neue Versuche angestellt. Doch keinerlei Listen halfen. Die Experimente bestätigten nur immer wieder, daß ein Teil der Energie verschwindet, wie in einem Faß ohne Boden.

So entstand die sensationsumwitterte Story vom „Energieschwund“ beim β-Kernzerfall.

Damals hatten einige Physiker den „ketzerischen“ Gedanken, daß das Gesetz von der Erhaltung der Energie bei verschiedenen Kernprozessen möglicherweise keine Gültigkeit habe. Dieser Gedanke war so „gotteslästerlich“, daß man ihn verscheuchte wie eine Fliege und sich Mühe gab, nicht daran zu denken.

Die Wissenschaftler waren verwirrt. Nur einer unter ihnen, der Schweizer Physiker Wolfgang Pauli (1900—1958), fand einen geeigneten Ausweg aus den Schwierigkeiten und räumte die Gefahr fort, die dem Energieerhaltungssatz drohte.

Im Dezember 1930 sandte er einen Brief an das Wissenschaftliche Seminar in Tübingen, der mit den Worten schloß: „... nur wer wagt, gewinnt, so muß jeder beliebige Weg zur Rettung mit größter Sorgfalt beraten werden. Also, liebe Radioaktive, prüft und richtet!“

Pauli hatte angenommen, daß noch eine weitere, bis dahin unentdeckte Partikel existiert, die beim β-Zerfall der Atomkerne gemeinsam mit dem Elektron aus dem Kern herausfliegt. Sind bei diesem Ereignis nämlich 3 Teilnehmer vertreten — das Elektron, der Atomkern und die unbekannte Partikel —, dann verteilt sich die Energie willkürlich, genau so wie sich die Energie des Schießpulvers willkürlich auf die Körner einer Schrotladung verteilt, wenn diese das Gewehr verlassen.

Nun war alles wieder an seinen Platz gerückt. Wenn das Elektron den Kern mit geringerer Energie verließ, dann mußte jener andere fehlende Energieanteil von der rätselhaften Unbekannten entführt werden.

Paulis Hypothese wurde keineswegs allgemein anerkannt. Es entstand ein großer Streit unter den Physikern. Einerseits fiel es sehr schwer, auf den fundamentalen Energieerhaltungssatz zu verzichten. Andererseits wäre es notwendig gewesen, wohl oder übel noch eine weitere und überdies so ungewöhnliche Partikel in das eigentlich sehr vollständige Atom einzuführen.

Urteilen Sie selbst: Alle übrigen Partikeln hatten nichts Außergewöhnliches an sich. Man konnte sie mit dem Geigerzähler nachweisen, und auch in der Wilsonschen Nebelkammer hinterließen sie ihre Spuren. Die Neutronen oder die γ-Quanten schließlich verraten ihre Anwesenheit

dadurch, daß sie Protonen anstoßen oder Elektronen aus den Atomen herausschlagen.

Doch die geheimnisvolle Partikel ließ sich von den Experimentalphysikern nicht greifen. Pauli aber hatte inzwischen, gerade so, als wolle er sich über sie lustig machen, einen „Personalausweis" für sie zusammengestellt, in dem die wesentlichen Merkmale der Unbekannten angeführt wurden: Die Partikel sollte sehr leicht sein, ihre Masse nahezu Null betragen, und eine elektrische Ladung sollte sie auch nicht haben, eine neutrale Partikel also.

Aber das ist doch der „Steckbrief" des Neutrinos! „Etwas Kleines und Neutrales", so läßt sich dieser Begriff aus dem Italienischen ins Deutsche übersetzen.

Beim Durchqueren eines dichten Stoffes legt ein Neutron mehrere Meter zurück, ohne auch nur einen einzigen Kern zu berühren. Das ist sehr viel. Das Neutrino dagegen hat eine weitaus höhere, eine geradezu phantastische Durchdringungsfähigkeit, denn da es weder Masse noch Ladung besitzt, kann es alle Materie nahezu ungehindert passieren. Darin liegt das wichtigste Geheimnis dieses Elementarteilchens.

Im Leben begegnen wir anderen Wechselwirkungsarten. Eine davon ist die gravitationsbedingte Anziehung. Diese Art der Wechselwirkung lernen wir bereits in frühester Kindheit kennen, wenn wir uns die bei einem Sturz zerschundenen Knie reiben. Doch die Schwerkraft läßt uns nicht nur zur Erde niederstürzen, sondern hält uns auch auf der Erde fest. Sie ist es, die den Mond zum Begleiter der Erde und die Planeten zu Sonnenbegleitern macht.

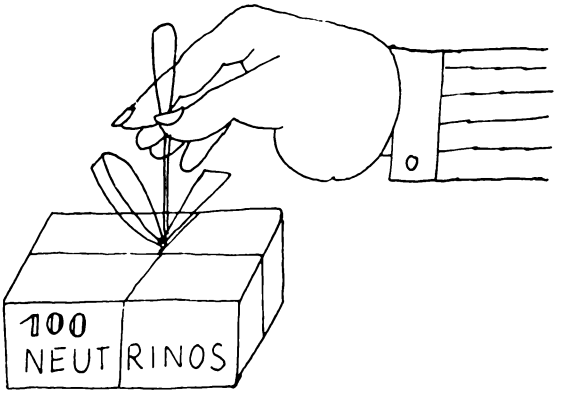
Eine andere Art, die sogenannten starken Wechselwirkungen, kennen wir vom Beispiel der Kernkräfte her, die die Protonen und Neutronen im Kern festhalten. Bei geringen Abständen sind sie 1000fach stärker als die elektromagnetischen Kräfte.

Das Neutrino jedoch ließ uns eine neue Art der Wechselwirkung erkennen, die sogenannten schwachen Wechselwirkungen. Alle übrigen Elementarteilchen sind imstande, miteinander in unterschiedliche Arten von Wechselwirkungen zu treten. Das Neutrino dagegen hat die Natur betrogen, hat es der freien Wahl beraubt. Sein „Los" besteht nur in der schwachen Wechselwirkung.

Die sehr schwache Wechselwirkung des Neutrinos — die nur wenige Hundertmilliardstel der elektromagneti-

schen Wechselwirkung beträgt, hat das Neutrino ganz ungewöhnlich „ungesellig“ werden lassen. Ein Vierteljahrhundert (!) lang gelang es den Experimentatoren nicht, diese ungewöhnliche Partikel nachzuweisen. Das ungreifbare Neutrino rutschte durch die Geräte wie kleine Jungfische durch ein weitmaschiges Netz.

Doch die Bedeutung dieser Partikel nahm mit dem Verständnis der Rolle schwacher Wechselwirkungen ständig



zu. Schon war klar, daß Neutrinos bei den Kernreaktionen auf der Sonne und auf fernen Sternen entstehen. Das Neutrino ist allgegenwärtig. Jeder Quadratzentimeter der Erdoberfläche wird in jeder Sekunde von einigen Milliarden Neutrinos getroffen. So leben wir eigentlich in einem bodenlosen Neutrinoozean.

Nicht allzulange vor der Entdeckung des Neutrinos überreichte einer der Teilnehmer jenes Versuches seinen Kollegen ein Weihnachtsgeschenk: Unter einer festlichen Umhüllung lag eine buntbemalte Streichholzschachtel mit der Aufschrift „Enthält mit Sicherheit mindestens 100 Neutrinos“.

Die Physiker vermochten die kleine Unbekannte, die sich so geschickt in König Laurins Mantel hüllte, erst zu entdecken, als ihnen Kernreaktoren zur Verfügung standen, die hochintensive Neutrinoquellen darstellen. Nur eine Partikel von 10^{20}, die das Gerät passieren, bleibt darin

hängen. Doch der Neutrinostrom war so intensiv, daß dieser Anteil zur Entdeckung des Neutrinos ausreichte.

1956 konnten F. Reines und K. Cowan aus dem Laboratorium von Los Alamos (USA) dem Neutrino die Tarnkappe entreißen.

Ungewöhnliche Bausteine

So ist es immer: Wo sich der Gärtner über den Regen freut, verflucht ihn der durchnäßte Tourist. Allen Menschen recht getan, ist eine Kunst, die niemand kann.

Vor der Entdeckung des Neutrons glaubten die Physiker, daß der Atomkern aus Protonen und Elektronen bestehe. Das wiederum betrübte die Theoretiker sehr, weil ihre Berechnungen überhaupt nicht stimmten. Völlig gelassen waren dagegen die Experimentatoren, die den radioaktiven β-Zerfall der Kerne untersuchten. Sie brauchten sich ja auch nicht den Kopf darüber zu zerbrechen, woher die Elektronen kommen.

Mit seinem Erscheinen brachte das Neutron alles durcheinander. Nun freuten sich die Theoretiker, weil das Neutronen-Protonen-Modell für den Kernaufbau alle ihre Schwierigkeiten aus dem Wege räumte. Doch diese Freude verblaßte schnell, wenn man an jene Physiker dachte, die sich mit der Untersuchung der Radioaktivität befaßten. Sie wollten nur die Antwort auf eine einzige, dafür aber außerordentlich schwierige Frage finden: Woher stammen die Elektronen beim β-Zerfall der Kerne, wenn es dort keine Elektronen gibt?

Sollte man wiederum ein so fabelhaft einfaches Bild vom Kernaufbau fallenlassen und einen Schritt zurück tun? Sollte man jetzt, wo sich endlich ein Silberstreifen am Horizont zeigte, wieder in die Flut unverständlicher und nicht zueinander passender Tatsachen eintauchen?

Die auf Biegen und Brechen gestellte Frage: „Woher stammen die Elektronen im Kern?“ veranlaßte die Physiker, einen großen Schritt vorwärts zu tun. Dieser Schritt war vielleicht nicht weniger entscheidend als seinerzeit die Anerkennung der Elektronen.

Vor 23 Jahrhunderten „verlieh“ Demokrit den Atomen

die Unteilbarkeit und Unveränderlichkeit. Am Ende des 19. Jahrhunderts hatten die Physiker den Atomen dieses „Etikett" abgerissen und es dann den Elementarteilchen angeklebt. Die Physiker konnten sich eben die Bausteine der Materie ohne ein solches Ruhe und Sicherheit ausstrahlendes „Etikett" nur schwer vorstellen.

Der Begründer der Quantenmechanik, Werner Heisenberg, löste als erster das Rätsel des Kerns. Er nahm an, daß sich das Neutron im Kern gelegentlich in ein Proton plus ein Elektron und ein Neutrino verwandeln kann. Das Proton verbleibt im Kern; die übrigen „entstehenden" Partikeln verlassen ihn. Äußerlich sieht diese Umwandlung wie ein radioaktiver β-Zerfall aus.

Daher also stammten die Elektronen! Zum ersten Mal hatten die Erforscher der Mikrowelt die wechselseitige Umwandelbarkeit der Elementarteilchen entdeckt. Wie sich später herausstellte, bleibt ein Neutron außerhalb des Kerns höchstens 12 Minuten lang erhalten, um dann in ein Proton, ein Elektron und ein Neutrino zu zerfallen. Mit einem freien Proton geschieht nichts dergleichen. In einem radioaktiven Kern dagegen ist die energetische Situation so beschaffen, daß sich sogar das stabile Proton in ein Neutron, ein Positron und ein Neutrino verwandeln kann. Dieses Vorkommnis im „Leben" eines radioaktiven Kerns wird als Positronenzerfall bezeichnet.

Das Positron ist eine neue Partikel und kommt uns doch so vor, als kennen wir sie längst. Sie stellt die genaue Kopie eines Elektrons dar, nur mit umgekehrtem Vorzeichen. So brauchte man dieses Teilchen eigentlich gar nicht zu erwähnen, wenn man seiner nur zur Erklärung des Positronenzerfalls der Kerne bedürfte.

Doch diese Partikel spielt in der Geschichte der Elementarteilchenphysik eine ganz besondere Rolle. Die Entdeckung des Positrons hatte die Tür, die in die Welt der Antiteilchen führte, spaltbreit geöffnet. Sie führte uns noch eine weitere Eigenschaft der Materie vor, die Fähigkeit, sich aus der wägbaren Form (Masse) in die Energieform umzuwandeln.

Alles begann damit, daß 1931 ein junger Physiker der Universität Cambridge namens Paul Dirac (geb. 1902) eine Gleichung ableitete, die die Elektronenbewegung beschrieb. Schon bald entdeckte er, daß diese Gleichung zwei Lösungen besitzt, oder mit anderen Worten, daß sie geeignet

ist, nicht nur das Elektron, sondern auch eine weitere Partikel zu beschreiben. Dabei ergab sich, daß diese Partikel ein komplettes Analogon des Elektrons sein mußte, nur mit positiver elektrischer Ladung.

Damals — und dieser Vorgang liegt nun über 45 Jahre zurück — hatte noch niemand etwas von den Antiteilchen gehört und die einzige positiv geladene Partikel, die die Physiker kannten, war das Proton. Wegen seiner großen Masse entsprach das Proton jedoch nicht der zweiten Lösung der Diracschen Gleichung.

Zunächst meinte man, eine rein mathematische Kuriosität vor sich zu haben. Doch alle Versuche, die zweite Lösung zu eliminieren, waren erfolglos. Nun gab es nur zwei Möglichkeiten. Entweder traf Diracs Theorie nicht zu, oder in der Natur existierte ein positiv geladenes Elektron.

Diracs Vorhersage war so ungewöhnlich, daß sie selbst von den bedeutendsten Gelehrten erst nach langem Zögern akzeptiert wurde. Der weltbekannte sowjetische Physiker Lew Landau (1908—1968) beispielsweise hörte in Charkow einen Vortrag Diracs über Antiteilchen und brummte dabei vor sich hin: „So ein Esel, der Dirac!“ Drei Jahrzehnte später allerdings erklärte er: „Wer wollte bestreiten, daß Dirac in wenigen Jahren für die Wissenschaft mehr geleistet hat als alle in diesem Raum Anwesenden während ihres ganzen Lebens?“

Ein Jahr später, 1932, wurde das Positron in der kosmischen Strahlung entdeckt. In der Wilsonschen Nebelkammer fand man die Spur eines Teilchens, die nur von einem Elektron verursacht sein konnte, aber von einem Elektron mit positiver Ladung.

Zur Untersuchung der kosmischen Strahlung mit Hilfe der Wilsonschen Nebelkammer benutzten die Experimentatoren ein Verfahren, das bereits 1927 von dem sowjetischen Physiker D. Skobelzyn vorgeschlagen worden war. Man ordnete die Nebelkammer zwischen den Polen eines Elektromagneten an. Damit hatte man die Möglichkeit, nicht nur die Spur des jeweiligen Elementarteilchens zu betrachten, sondern auch seine Ablenkung im Magnetfeld; die Energie des Teilchens konnte gemessen und das Vorzeichen seiner elektrischen Ladung ermittelt werden. Auf den Fotos, die mit Hilfe der Wilsonschen Nebelkammer erzielt wurden, war eindeutig zu erkennen, daß das Elek-

tron und das Positron in jeweils entgegengesetzter Richtung abgelenkt werden.

Das Experiment bestätigte die Theorie. 30jährig wurde Paul Dirac Nobelpreisträger.

Nach der Entdeckung des Positrons entstand die Frage: Hat nicht vielleicht jedes Elementarteilchen ein Antiteilchen?

Die Experimentatoren begannen in der kosmischen Strahlung Antiprotonen zu suchen. Das Elektronen-Positronen-Paar stützte Diracs Theorie ganz offensichtlich. Trotzdem schlich sich unterschwellig der Gedanke ein, es könne sich vielleicht um eine Ausnahme handeln, die die Natur diesen beiden Teilchen zuliebe gemacht habe.

„Der zeitliche Abstand zwischen der Vorhersage des Antiprotons und seiner Beobachtung im Jahre 1955 war zu groß", sagte Akademiemitglied J. Seldowitsch, „und bei einigen Theoretikern haben die Nerven versagt; in den letzten Jahren sind tatsächlich Versuche gemacht worden, eine Theorie ohne Antiprotonen zu entwickeln."

Erst ein Vierteljahrhundert nach Diracs Vorhersage entdeckte eine Gruppe amerikanischer Wissenschaftler unter der Leitung von E. Segrè und O. Chamberlain das Antiproton. Ein Jahr später fanden sie auch das Antineutron.

Nachdem die Physiker einmal das „Positronenende" erwischt hatten, begannen sie zunächst langsam, dann aber immer schneller ein ganzes „Netz" voll Antipartikeln an Land zu ziehen. Heute zweifelt niemand mehr daran, daß jedes Elementarteilchen auch einen Schatten, nämlich ein Antiteilchen, besitzt.

Beim Studium der Positronenspuren in der Wilsonschen Nebelkammer entdeckten die Physiker, daß sich ein Elektron und ein Positron gegenseitig vernichten, wenn sie aufeinandertreffen: Sie annihilieren. Die Natur braucht dabei nichts zu befürchten, denn sie erleidet keinen Verlust. Die Masse beider Partikeln verwandelt sich in eine andere Materieform, in Energie, deren Menge sich nach der bekannten Formel Albert Einsteins (1879—1955) $E = mc^2$ berechnen läßt.

„Dieses Ergebnis der neuesten Physik", schrieb Nobelpreisträger Max von Laue (1879—1960), „ist das erschütternste von allem, was die Entwicklung der Naturforschung irgendwann einmal hervorgebracht hat."

Wie seltsam muteten die elementaren Bausteine der Materie nun an! Selbst so stabile Partikeln wie ein Proton oder ein Elektron konnten gemeinsam mit ihren Antiteilchen „verschwinden". Unwillkürlich drängte sich der Gedanke auf: Wieso blieben eigentlich die alten Gesteine bis in unsere Zeit hinein erhalten, da sie doch aus einem so unbeständigen Material bestehen?

Der Grund ist einfach. Die Elementarteilchen sind zu den erwähnten Umwandlungen nur unter ganz spezifischen Verhältnissen bereit, wie sie in radioaktiven Kernen vorliegen. Außerdem müssen sie mit ihren Antiteilchen zusammentreffen. In dem uns zugänglichen Teil der Welt gibt es unermeßlich mehr stabile Kerne als radioaktive. Eine Annihilation brauchen wir nicht zu befürchten, weil es keine nennenswerten Mengen von Antiteilchen gibt.

Das Zeitalter der Hyperonen

Es ist gar nicht so lange her, daß die Physiker zu „schüchtern" waren, neue Partikeln entgegenzunehmen, die ihnen die Natur präsentierte. Doch zu Beginn der 50er Jahre hatte sich diese Tatsache merklich verändert. Einmal auf den Geschmack gekommen, begannen sie neue Rollen für noch unentdeckte elementare Bausteine „zu schreiben" und dann die entsprechenden Darsteller zu suchen. Wie die Seefahrer zu Kolumbus' Zeiten machten sich die Physiker eilfertig auf die Reise in die unbekannten „Länder" der Mikrowelt, immer auf der Suche nach neuen Partikeln.

Mit Hilfe der Wilsonschen Nebelkammer untersuchten die Wissenschaftler Zusammenstöße zwischen Elementarteilchen und Kernen. Man brachte Plättchen aus dem gewünschten Stoff in das Nachweisgerät und verfolgte die Bahn der Partikeln bis zu diesem Plättchen sowie die Spuren jener Partikeln, die das Plättchen wieder verließen.

1951 biß eine „ungewöhnliche, seltsame Partikel" an den „Köder" — eine Bleiplatte — an. Kosmische Strahlen hoher Energie erzeugten beim Zusammenstoß mit den Protonen und Neutronen der Bleiplatte eine neue neutrale Partikel. Das Teilchen selbst hinterließ keine Spur, doch

n geringer Entfernung hinter der Platte waren von einem Punkt ausgehende Nebelspuren zweier geladener Partikeln zu erkennen, in die das unsichtbare Teilchen zerfallen war. So endete das kurze Leben der neuen Partikel, das nur 10^{-10} s gedauert hatte. Aber wieviel Aufregung sollten diese Augenblicke den Physikern noch bereiten!

Als man begann, die Fotos mit den „Tätigkeitsspuren" der neuen Partikeln gründlich zu untersuchen, stieß man auf Dinge, die Grund genug waren, sich an den Kopf zu fassen. Es stellte sich heraus, daß man nicht eine Partikel, sondern zwei verschiedene Arten von elementaren Bausteinen entdeckt hatte: schwere K-Mesonen und Partikeln, die noch massereicher waren als Nukleonen, nämlich die sogenannten Hyperonen. Heute gibt es schon mehr als ein Dutzend Mesonen und Hyperonen. Obwohl niemand diese neuen Partikeln, noch dazu in so großer Zahl, brauchte und keine der existierenden Theorien diesbezüglich irgend etwas vorhersagte, mußte man sich jedoch an die neuen Verhältnisse gewöhnen. Was blieb anderes übrig, als die Welt der Elementarteilchen so zu nehmen, wie sie ist.

Schließlich kann man eine Gewohnheit immer gegen eine andere ersetzen. An die „Seltsamkeiten" (vom Engl. strangeness, seltsam) der neuen Partikeln allerdings haben sich die Physiker nicht gewöhnen können. Warum indessen bezeichnete man den neuen „Partikelnfang" als „seltsam"? Worin lag seine „Seltsamkeit"?

Die K-Mesonen und Hyperonen entstanden im Ergebnis starker Wechselwirkungen zwischen Nukleonen innerhalb unwahrscheinlich kurzer Zeit, einer sehr viel kürzeren Zeit nämlich, als die, die man gewöhnlich als Augenblick bezeichnet. Dabei zerfielen diese Partikeln ihrerseits wiederum in Partikeln mit starker Wechselwirkung, und deshalb mußten sie in ebenso kurzer Zeit wieder verschwinden. Tatsächlich haben sie aber eine hunderttausendmilliardenfach (100 000 000 000 000fach) größere Lebensdauer! Wie anders als „seltsam" soll man diese Partikeln bezeichnen?

Dabei sind die Hyperonen allem Anschein nach recht enge Verwandte der Nukleonen. Nicht nur in der Tabelle der Elementarteilchen sind sie in „friedlicher Koexistenz" vereint, sondern auch in ein und demselben Kern. Neutrale Λ-Hyperonen können ein oder sogar zwei Neutronen ersetzen.

Ohne äußere Einwirkung entsteht im Kern kein Hyperon. Beim Zusammenstoß mit einem kosmischen Proton hoher Energie bildet sich im Kern das Hyperon. Eines der Bruchstücke nimmt dann das Hyperon als „Andenken" an die stattgefundene Katastrophe mit. Der Hyperkern —

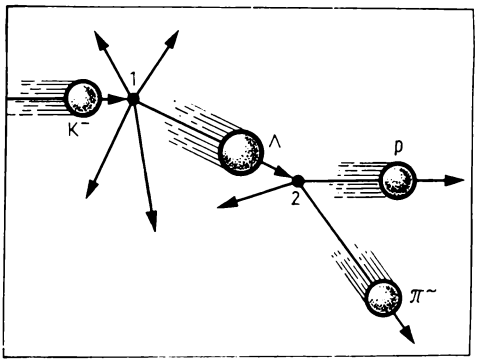


so hat man dieses Bruchstück genannt — existiert ebensolange wie das Hyperon selbst, nämlich etwa 10^{-10} s.

Doch während die Hyperonen immerhin ein mehr oder weniger „erträgliches" Verhalten an den Tag legen, zeigte sich, daß die Verwandten der π-Mesonen, die schweren K-Mesonen, die wichtigsten Gesetze der Mikrowelt „mißachten". Seit ihrer Entdeckung sind Versuche mit K-Mesonen bis heute ständig im Mittelpunkt des Interesses der Physiker geblieben. So sehen Sie, wie die Wissenschaftler fast unmerklich nur wegen der so kindlich erscheinenden Frage „Wie ist alles aufgebaut?" zunächst 8 und bis 1960 rund gerechnet 30 Arten von Materiebausteinen entdeckt haben. Die Wichtigkeit und Notwendigkeit der ersten 3 Teilchen war unbestritten. Nach einigem Nachdenken konn-

te man auch für weitere 6 Neuentdeckungen einen „Arbeitsplatz“ einrichten. Aber für 30 Partikeln fand man bis heute keine Verwendung.

Die übermäßige Großzügigkeit der Natur war ärgerlich. Nun hatte niemand mehr den Mut, beweisen zu wollen, wieviel Elementarteilchen in der Natur existieren müßten.



Erzeugung eines Hyperkerns durch ein Kaon (Stern *1*) und sein Zerfall (Stern *2*)

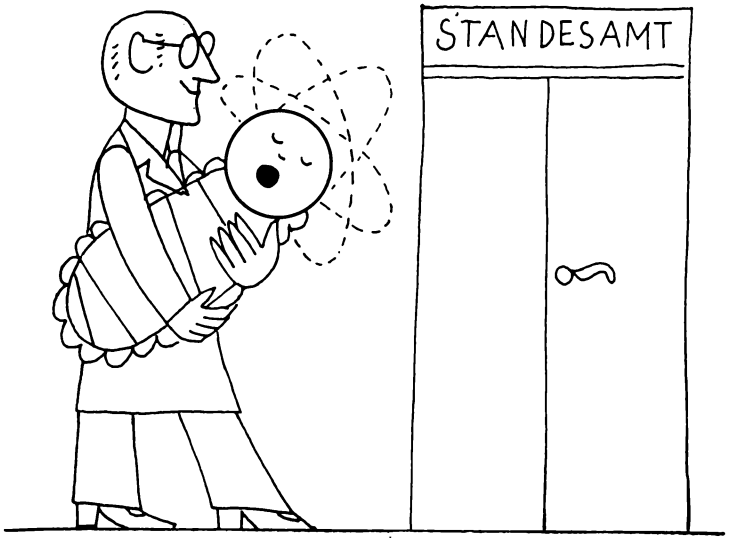
Wann wird das Verzeichnis der Materiebausteine abgeschlossen? Vielleicht ist es sogar schon vollständig? Aber vielleicht stehen wir auch erst am Anfang?

Eine Lotterwirtschaft

Ohne recht zu wissen, wie sie dazu gekommen waren, sahen sich die Physiker plötzlich als Besitzer einer umfangreichen, sehr verzweigten „Elementarteilchenwirtschaft“. Neben den massereichen Nukleonen und Hyperonen existieren die schweren Mesonen und die leichten Neutrinos, μ-Mesonen und Photonen und noch vieles andere, was hier nicht ausführlich aufgezählt werden kann.

Es sind so viele Partikeln geworden, daß ganz ungewollt der Zweifel entstand: Ist es eigentlich wirklich mit hinreichender Sicherheit möglich, diese Partikeln voneinander zu unterscheiden? Von der äußeren Gestalt oder der Farbe

zu sprechen, hat bei Hyperonen keinen Sinn. Doch trotzdem erhielt jede Partikel schon bald nach ihrer Entdeckung einen „Paß". Angaben wie Name, Nationalität, soziale Stellung usw. waren darin vollgültig durch Masse, Ladung und Lebensdauer ersetzt. Nicht minder wichtig war auch der Spin der Partikel, eine Größe, die mit der Eigenrotation der Partikel verknüpft ist, bzw. das Magnetmoment, das in direkter Beziehung zur Verteilung der Ströme im Innern der Partikel steht.



In der Tier- und Pflanzenwelt unterscheiden sich die Exemplare einer bestimmten Art — wenn vielleicht auch nur geringfügig — stets in Größe, Färbung oder Verhalten voneinander. Einem wenig erfahrenen Botaniker oder Zoologen kann möglicherweise sogar deswegen ein Fehler in der Klassifikation unterlaufen, weil ein konkretes Exemplar eine starke Abweichung von den gewöhnlichen Artmerkmalen zeigt.

Der Experimentalphysiker ist dieser Gefahr nicht ausgesetzt. Die Elementarteilchen einer „Sorte" sind untereinander völlig gleich. Alle Protonen und alle Neutronen

sind miteinander jeweils identisch, und es hat keine Bedeutung, ob sie in einem Beschleuniger erzeugt wurden oder in der kosmischen Strahlung entstanden sind. Darum besteht keinerlei Notwendigkeit, alle ihre Eigenschaften während eines jeden Versuchs nochmals bis in die letzten Einzelheiten zu untersuchen. Es genügt die Feststellung, zu welcher „Sorte" die betrachtete Partikel gehört.

Aus der Fotografie der Nebelspur, die für geladene Partikeln die Rolle einer Kennkarte spielt, kann man die Maße der Partikel ermitteln. Hat die Spur vollständig auf der Aufnahme Platz gefunden und kennt man die Geschwindigkeit der Partikel, dann hat man damit zugleich auch die Lebensdauer der Partikel ermittelt. Das angelegte äußere Magnetfeld wiederum verrät das Vorzeichen der Partikelnladung.

Alle übrigen Angaben, die den Physiker interessieren könnten, erhält er aus der Tabelle der Elementarteilchen, die auf der Grundlage der „Personalausweisangaben" für jede Partikel zusammengestellt ist. Werfen Sie einmal einen Blick in eine derartige Tabelle, und Ihnen wird sofort auffallen, daß sich jede Partikelnart von den anderen Arten in erster Linie nach Masse, Lebensdauer oder Zerfallsart unterscheidet.

Die Partikelnmasse ändert sich innerhalb eines außerordentlich großen Bereichs von Null (beim Neutrino und beim Photon) bis zu einem Wert, der beim schwersten Hyperon (dem Ω-Hyperon) 1500 Elektronenmassen entspricht. Die Lebensdauer liegt zwischen 10^{-23} s beim π-Meson bis 10^{28} Jahre beim Proton!

Dafür herrscht jedoch triste Eintönigkeit in der Spalte „elektrische Ladung". Neutral, negativ und positiv — mehr wird nicht geboten. Gewiß, die Worte negativ und positiv bedeuten nur das Vorzeichen der Ladung und sagen nichts über den Betrag. Vielleicht ist es so, daß der Ladungsbetrag ebenso stark variiert wie die Masse oder die Lebensdauer?

Was die Ladung betrifft, so hat die Natur eine Ausnahme gemacht. Eine Partikel trägt entweder überhaupt keine Ladung oder ihre Ladung entspricht exakt dem Ladungsbetrag eines Elektrons.

Beim Ansehen der Tabelle der Elementarteilchen haben wir bereits bemerkt, daß die einen Teilchen leichter, andere

hingegen schwerer sind; die Lebensdauer der einen ist groß, während sie bei anderen nur einen Augenblick lang währt. Doch die Tabelle sagt nichts über deren stürmisches und von erstaunlichen Ereignissen zum Bersten gefülltes „Leben" aus.

Die elementaren Bausteine der Materie entstehen entweder bei nuklearen Katastrophen, bei Zusammenstößen von Partikeln mit ungeheurer Energie oder während des „ruhigen" radioaktiven Zerfalls. Instabile Partikeln beenden ihr Dasein durch Zerfall in leichtere Teilchen. Gelegentlich werden sie von den Atomkernen des Stoffs eingefangen, in dem sie steckenbleiben.

Bei Wechselwirkung miteinander kommt es zu Umwandlungen der Elementarteilchen. Doch jede Partikel tut dies auf ihre Art. Gerade darin liegt der qualitative Hauptunterschied zwischen den verschiedenen Elementarteilchen.

Nach dem Charakter ihrer Wechselwirkung hat man die Nukleonen und die Hyperonen in der Gruppe der Hadronen zusammengefaßt. Die K-Mesonen und π-Mesonen bilden eine andere Gruppe. Die leichten Partikeln dagegen — μ-Mesonen, Elektronen und Neutrinos — wurden als Leptonen bezeichnet.

Nukleonen sind nicht imstande, bei Kernreaktionen die K-Mesonen zu ersetzen. Im Hyperkern können Leptonen niemals an die Stelle der Hyperonen treten. Ein Neutron vermag nicht in der Weise zu zerfallen, wie es die „seltsamen" Partikeln tun. Ein π-Meson schließlich kann nicht beim radioaktiven β-Zerfall der Kerne entstehen.

Kaum jemand, der im Zirkus einem Zauberkünstler zusieht, errät, wie die einzelnen Tricks funktionieren. Doch niemand hat dabei das Gefühl der Nichterkennbarkeit. Vielmehr begreifen alle, daß die Nummer auf bestimmten Regeln — gewissen Gesetzen — beruht, auf Fingerfertigkeit, Erfindungsreichtum und Phantasie.

Vorläufig haben die Physiker manche Ähnlichkeit mit den Zirkusbesuchern. Sie wissen nicht immer, warum sich die eine oder andere Partikel so und nicht anders verhält. Doch die Physiker haben bei der Erforschung der Mikrowelt begriffen, daß es hier keinerlei Chaos gibt. Das Verhalten der Partikeln gehorcht klaren, strengen Gesetzen.

Die Herrschaft der Energie

Unser Bericht über die Entdeckung von Elementarteilchen reichte bis zum Jahre 1960, als die Physiker etwa 30 verschiedene einfachste Materiebausteine in den Händen hielten und längst keine Zweifel mehr daran bestanden, daß sich deren Zahl in kurzer Zeit verdoppeln könnte.

Zu diesem Zeitpunkt war die Physik der Elementarteilchen nicht länger mehr ausschließlich auf Mitteilungen angewiesen, die von den Erforschern der kosmischen Strahlung eingingen. In den wissenschaftlichen Laboratorien waren hochleistungsfähige Teilchenbeschleuniger entstanden.

1949 hatte im Institut für nukleare Probleme der Akademie der Wissenschaften der UdSSR der damals leistungsfähigste Beschleuniger der Welt den Betrieb aufgenommen. Mit seiner Hilfe erfuhren die Physiker viel Neues über die Eigenschaften der Atomkerne und über die Wechselwirkung schneller Protonen und Neutronen mit stofflicher Materie. Die erzielten experimentellen Ergebnisse erlaubten den sowjetischen Wissenschaftlern, in nur wenigen Jahren das Problem der friedlichen Nutzung der Atomenergie zu lösen. Das 1954 in Obninsk in Betrieb genommene Atomkraftwerk — das erste derartige Kraftwerk in der Welt — eröffnete ein neues Zeitalter in der Entwicklung der Energetik.

Im April 1957 wurde in Dubna bei Moskau im Vereinigten Institut für Kernforschung (VIK) ein neuer Beschleuniger, ein Synchrophasotron*, für Protonen mit einer Energie bis zu 10 GeV (10 Mrd. Elektronenvolt)** angefahren.

In keinem anderen Laboratorium der Welt war es damals möglich, Partikeln mit derartig hoher Energie zu erzeugen. Den Wissenschaftlern der sozialistischen Länder war es gelungen, noch tiefer in die Geheimnisse des Auf-

---

* Zyklischer Elementarteilchenbeschleuniger. Seine Wirkungsweise wird später noch beschrieben.

** Energieeinheit für atomare Vorgänge: 1 eV ist diejenige Energie, die 1 Elektron erhält, wenn es eine Spannungsdifferenz von 1 Volt durchläuft.

baus der Materie einzudringen. Mit Hilfe dieses Beschleunigers wurden einige neue Elementarteilchen entdeckt, darunter eine Partikel aus dem Geschlecht der Hyperonen: das Anti-Σ^--Hyperon.

Beim Zusammenprall zweier beliebiger Partikeln, etwa beim Zusammentreffen von hochenergiereichen Protonen mit Atomkernen, können im Prinzip sämtliche Elementarteilchen entstehen. Wo das Ganze stattfindet — im Weltall, an der Grenze zwischen Weltall und Erdatmosphäre oder im Target (vom Engl. Ziel, Auftreffkörper) des Beschleunigers — hat keine prinzipielle Bedeutung. Gewiß, kosmische Protonen haben eine weitaus höhere Energie als selbst die in den leistungsfähigsten Beschleunigern erzeugten Protonen. Dafür ist es freilich auch wesentlich bequemer, mit π-Mesonenbündeln im Labor zu arbeiten, als diese π-Mesonen aus der kosmischen Strahlung „herauszuangeln".

Bei der Präzisierung der Kenndaten der Partikeln wurden die Physiker darauf aufmerksam, daß die Mehrzahl der bekannten Partikeln eine größere Lebensdauer als 10^{-14} s hat. Mit der geringsten Lebensdauer — etwa 10^{-19} s — gibt es überhaupt nur eine einzige Partikel mit der Bezeichnung η-Meson.

Die Wissenschaftler konnten nicht verstehen, warum im Lebensdauerintervall zwischen 10^{-19} s und der sogenannten nuklearen Zeit von 10^{-22} bis 10^{-23} s keine Partikeln entdeckt wurden? Es handelt sich um jene Mindestzeit, die ein „neugeborenes" Teilchen benötigt, um kundzutun, daß es das Licht der Welt erblickt hat. Doch kaum hatten sich die Physiker diese Frage gestellt, als auch schon eine Partikel entdeckt wurde, die in einem so kurzen Zeitraum entstand, daß man nicht einmal von einem Augenblick sprechen konnte!

1952 unternahm Enrico Fermi (1901—1954) am Chicagoer Beschleuniger für niedrige Energien einen Versuch, um Einzelheiten der Wechselwirkung zwischen π-Mesonen und Nukleonen zu klären. Die Ergebnisse waren erstaunlich. Bei einer bestimmten Energie des π-Mesons veränderte seine Wechselwirkung mit einem Proton ihren Charakter. Dies erinnerte z. B. an den sprunghaften Intensitätsanstieg elektromagnetischer Wellen, wenn die Strahlungsfrequenz eines Generators mit der Frequenz in Resonanz gerät, auf die die Sendeantenne abgestimmt ist.

Hier dagegen gerieten die kinetische Energie des π-Mesons und die potentielle Energie seiner Wechselwirkung mit dem Proton in Resonanz. Für die Dauer einer Zeit, die mit der nuklearen Zeit vergleichbar war, wurde das Meson in der Nähe des Protons gewissermaßen „festgehalten", so daß eine neue komplizierte Partikel entstand. In jenen Tagen freilich betrachtete man ein derartiges Resonanzteilchen noch nicht als ein Elementarteilchen.

Als leistungsfähigere Beschleuniger zur Verfügung standen, war die Protonenenergie bereits so groß, daß die Protonen beim Zusammenprall mit den Nukleonen gleichzeitig mehrere Partikeln verschiedener Sorten erzeugten. Die Physiker wurden nachdenklich. Was wäre denn, wenn man annähme, daß es sich dabei um die Bruchstücke irgendeiner primären überschweren Partikel handelt, die im Verlauf der „nuklearen" Zeit zerfallen ist?

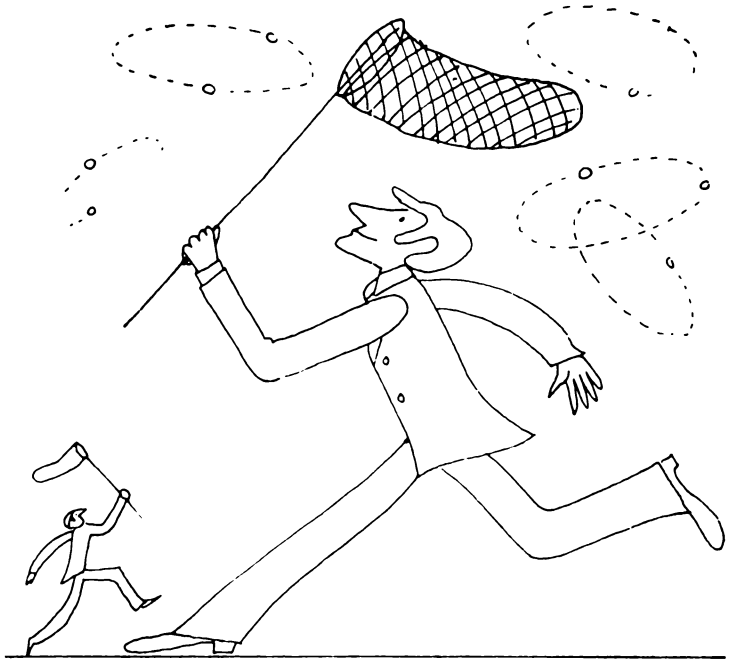
Mißt man die Winkel, unter denen alle entstehenden Partikeln auseinanderfliegen, und ihre Energie, dann kann man die Masse dieser „Urpartikel" berechnen. Nach entsprechenden Messungen und Berechnungen kamen die Physiker zu dem Schluß, daß die „Urpartikeln" existieren. Im Verlauf von 10^{-23} s zerfallen sie in die wohlbekannten Nukleonen, Hyperonen und Mesonen. Diese neuen Partikeln erhielten die Bezeichnung Resonanzpartikeln (bzw. Resonanzen), ein Name, der ihre Entdeckungsgeschichte widerspiegelt.

Wie sich später herausstellte, ist die Entstehung von Resonanzpartikeln keine Ausnahmeerscheinung, sondern eine als recht allgemein anzusehende Eigenschaft von Teilchen mit starker Wechselwirkung. Bei hinreichend großer Aufprallenergie können zwei, drei und mehr Sekundärpartikeln entstehen, die zunächst in einem instabilen Komplex vereinigt sind.

Die zuerst entdeckten Resonanzpartikeln bildeten Komplexe aus zwei Teilchen. Die einen zerfielen in zwei π-Mesonen, andere dagegen in K- und π-Mesonen. Später fand man auch neue, noch kompliziertere Kombinationen.

Mit dem „Fang" neuer Partikeln begannen sich so viele Experimentalphysiker zu beschäftigen, daß die Mehrzahl der Resonanzpartikeln gleichzeitig in mehreren Laboratorien entdeckt wurde.

„Schade, daß Fermi, der 1953 den ersten Fall einer sogenannten Hadronenresonanz fand, die bis heute andauernde triumphale Entwicklung dieser Richtung und das Auftauchen einiger 100 Resonanzpartikeln in den Tabellen der Elementarteilchen nicht mehr erleben konnte", schrieb Enrico Fermis Schüler, das sowjetische Akademiemitglied Bruno Pontecorvo.



Wieviel Elementarteilchen sind eigentlich bis heute bekannt? Es ist wirklich an der Zeit, Bilanz zu ziehen, obwohl sich das gar nicht so einfach machen läßt. Die, wie wir jetzt sehen, recht bescheidene Tabelle der Elementarteilchen, die die Physiker 1960 zusammengestellt hatten, ist buchstäblich im Strom der in kurzer Zeit entdeckten neuen Partikeln, der Resonanzen, untergegangen.

Die 30 Elementarteilchen, die wir früher kannten, und die noch vor wenigen Jahren Anspruch auf außergewöhnliche Aufmerksamkeit erheben konnten, waren nur die vergleichsweise stabilen und zugleich leichteren Geschwister einer riesigen Menge von Gebilden. Doch bis zum heutigen Tag laufen von den Experimentalphysikern immer wieder Mitteilungen über die Entdeckung neuer Teilchen ein. Sie alle gehören vorläufig zu den Resonanzen.

Selbst Fachleute der Physik der Elementarteilchen haben es schwer, die exakte Anzahl aller Materiebausteine zu nennen. Es sind bereits über 200! Heute gibt ein eigenes internationales Zentrum jedes Jahr eine 100 Seiten umfassende Veröffentlichung mit Angaben über die neu entdeckten Partikeln heraus.

Fassen wir zusammen: In ihrem Streben, die Frage zu beantworten, wie alles eingerichtet sei, haben die Physiker einen langen Weg zurückgelegt. Zunächst war das Bild, das sie sich vom Aufbau der Materie gemacht hatten, kompliziert. Die Materie bestand aus rund 90 „elementaren" Atomen. Diese Vorstellung wurde von einer höchst einfachen Variante abgelöst, die aus nur 3 Grundbausteinen, dem Proton, dem Neutron und dem Elektron, bestand. Doch schließlich gelangten die Physiker zur Entdeckung der erstaunlichen Welt der Elementarteilchen.

Flüge in den Weltraum und Expeditionen zum Grund der Ozeane finden allgemeines Interesse. Doch die Reisen ins Innere der Materie sind nicht weniger beachtenswert!

Die α-Teilchen waren es, die es Rutherford erstmals erlaubten, den Raum bis auf Entfernungen von 10^{-15} m zu untersuchen. Die modernen überschnellen Atomgeschosse geben uns dagegen bereits die Möglichkeit, den Raum bis auf Entfernungen von 10^{-17} m zu sondieren!

Außer neuen Maßstäben für den Raum haben uns die Elementarteilchen in die Lage versetzt, auch absolut neue Maßstäbe der Energie kennenzulernen.

Nach der Entdeckung der Kernspaltungsreaktion waren die Physiker über die Energiemenge, die bei der Spaltung eines Urankerns frei wird, sehr erstaunt. Doch beim Zusammenstoß eines Protons mit Nukleonen im Beschleuniger von Serpuchow werden 1000fach größere Energiemengen übertragen und absorbiert!

Ein Augenblick nur, und vom Target aus fliegen nach allen Richtungen soeben entstandene Nukleonen und Antinukleonen, Mesonen und Hyperonen davon. Ein Augenblick, und die schwersten unter den Partikeln, die Resonanzen, zerfallen in einzelne Teilchen. Jeder Zusammenstoß ruft diese unruhige, erregende, veränderliche Welt ins Leben, deren Vielfalt von der Energie abhängt. Die Energie, und nur sie, ist jener Nährboden, aus dem während eines Augenblicks die ungewöhnlichen „Wunderblumen“ der Mikrowelt erblühen.

Die letzte Hülle?

Der Vogel Phönix

„In seinem ursprünglichen Sinn", schreibt Akademiemitglied M. Markow, „sollte der Begriff ‚Elementarteilchen' einfachste Teilchen bezeichnen, aus denen die Materie besteht."

Doch war man nicht voreilig, als man Protonen, Neutronen und andere Partikeln als Elementarteilchen bezeichnete? Ähneln denn die schweren und augenblicklich zerfallenden Hyperonen und Resonanzen überhaupt einfachsten Materieteilchen?

Zweifel daran hatten die Wissenschaftler bereits seit langem gehabt. 1950, als man nur 9 Materiebausteine kannte, sagte Enrico Fermi, daß „dies bereits eine hinreichend große Zahl ist, um Zweifel am elementaren Charakter wenigstens einiger dieser Partikeln zu wecken".

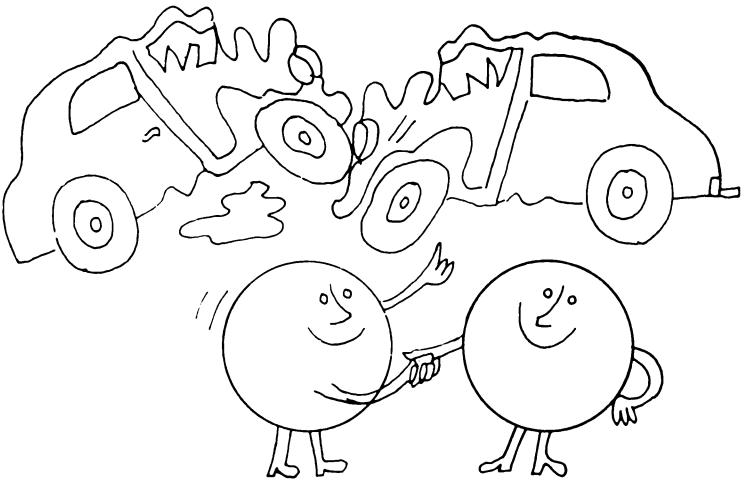
Das Mißtrauen der Physiker nahm noch mehr zu, als in nur 5 Jahren aus 3 Dutzend Bausteinen über 200 wurden.

„Der Begriff ‚elementar' hat seinen ursprünglichen Sinn verloren", faßte der theoretische Physiker und Nobelpreisträger, Akademiemitglied I. Tamm, diese Situation der „Bevölkerungsexplosion" unter den Partikeln zusammen. „Wir sind heute nicht imstande, tatsächlich elementare Teilchen von zusammengesetzten Partikeln zu unterscheiden."

Wir könnten sie nicht unterscheiden? Dabei ist es doch so einfach! Wenn ein freies Neutron beim radioaktiven Zerfall in ein Proton, ein Elektron und ein Neutrino übergeht, so ist es eben wie ein Kartenhaus aus einzelnen Karten aufgebaut, aus einem Proton, einem Elektron und einem Neutrino; und das μ-Meson besteht dann aus einem Elektron und einem Neutrino. Nur, verhält es sich in Wirklichkeit so? Wenn „irgend etwas" aus Einzelteilen besteht, dann kann man mit einem mehr oder weniger großen Kräfteaufwand diese Teile stets nachweisen. Das Atom enthält

beispielsweise Elektronen und einen schweren Kern. Wendet man Energie im Betrag von einigen Dutzend Elektronenvolt an, dann kann man das Atom ionisieren, indem man ihm die gewünschte Zahl von Elektronen entreißt. Man kann natürlich auch alle Elektronen abspalten, so daß nur noch der Kern übrigbleibt.

Schließlich läßt sich mit einer millionenfach größeren Energie der Atomkern spalten, der so reichhaltig mit Protonen und Neutronen gespickt ist.



So zeigte sich, daß alles, was einst als elementares Wesen der Materie galt, im Laufe der Zeit nacheinander seine Hüllen verlor. Je weiter die Wissenschaftler ins Innere vordrangen, um so kleiner und um so elementarer waren die Materiepartikeln, die sie vorfanden.

Doch wie könnte man ein Elementarteilchen „enttarnen"? Wie könnte man in Erfahrung bringen, woraus etwa ein Proton besteht? Die Geschichte der Erkundung immer einfacherer Materiebausteine suggeriert uns gewissermaßen eine ganz natürlich scheinende Antwort. Man muß dem Elementarteilchen einen möglichst starken Schlag versetzen.

Genau so verfahren einige Physiker auch. Ein Target aus wasserstoffhaltigem Material wird mit Protonen hoher

Energie bestrahlt, die man in Beschleunigern erhält. Ende der 60er Jahre untersuchte man mit Hilfe des Synchrophasotrons in Dubna den Zusammenstoß von Protonen mit anderen Nukleonen, wobei die Protonenenergie 10 GeV betrug. Gegenwärtig beschießt man in der amerikanischen Stadt Batavia das Target des Beschleunigers mit Protonen, deren Energie 40mal größer ist.

Doch bis heute gelang es bei keinem einzigen Versuch, irgendein „Einzelteil" eines Elementarteilchens herauszuschlagen; es ließen sich keine Bruchstücke entdecken. Bei allen Kernreaktionen verhielt sich die Partikel wie ein einheitliches Ganzes. Es stellt sich heraus, daß jede, auch die schrecklichste Katastrophe, bei Zusammenstößen in der Mikrowelt ohne ein einziges „Opfer" abgeht.

Nun, vielleicht sind Elementarteilchen überhaupt unteilbar? In seiner Antwort auf diese Frage erklärte das Korrespondierende Mitglied der Akademie der Wissenschaften der UdSSR, A. Baldin, Direktor des Laboratoriums hoher Energien im Vereinigten Institut für Kernforschung: „Wenn wir von der Natur der Materie sprechen, so gehen wir von der gewohnten Vorstellung aus, daß sich das Ganze in Einzelteile zerlegen läßt. Wenn wir dagegen den Versuch unternehmen, ein Elementarteilchen zu zerreißen oder in Stükke zu spalten, dann entstehen im Ergebnis neue Teilchen. Das Verblüffendste besteht darin, daß das ursprüngliche Teilchen aus dieser Katastrophe emporsteigt wie der Vogel Phönix aus der Asche, unbeschädigt, in einem Zustand, der mit dem Ausgangszustand identisch ist!"

Spiel nach Regeln

Am Protonenbeschleuniger in Dubna ist das Wasserstoff-Target installiert und der Strom in den Magneten des Beschleunigers eingeschaltet. Ein akustisches Signal sowie rotes Licht der Warnanlage erscheinen, und alle verlassen den Versuchsraum.

In diesem Raum wird jetzt gleich die „Geburt" von Elementarteilchen im Augenblick des Zusammenpralls von beschleunigten Protonen mit den Protonen des Targets stattfinden.

Der diensthabende Operator schaltet den Hochfrequenz-

generator ein, und der Beschleuniger nimmt den Betrieb auf. Hier wollen wir kurz verweilen und uns einmal die Wirkungsweise eines der verschiedenen Typen von Elementarteilchenbeschleunigern ansehen.

Ein Synchrophasotron dient der Beschleunigung von schweren Teilchen auf Geschwindigkeiten, wie sie sonst nur in der kosmischen Strahlung vorkommen. Es ist ein Beschleuniger, bei dem die Teilchen in einem Vakuumrohr eine kreisförmige Bahn durchlaufen. Ein magnetisches Führungsfeld zwingt sie, diese Bahn zu beschreiben, während ihnen ein hochfrequentes elektrisches Beschleunigungsfeld eine stetig wachsende Geschwindigkeit erteilt. Das Führungsfeld wird von einem ringförmigen Elektromagneten erzeugt, der in 4 Viertelkreise unterteilt ist, zwischen denen die Teilchen geradlinig weiterlaufen. An 2 dieser Unterbrechungen befindet sich die elektrische Beschleunigungsstrecke, und an den beiden anderen werden die Teilchen eingeschossen bzw. herausgelenkt. Bei jedem „Ausatmen" des Gerätes dringt eine Portion schneller Protonen durch das Target. Ein Aufprall, und die Apparatur identifiziert augenblicklich neugeborene Zwillingspaare: entweder ein Proton und ein Antiproton, ein Neutron und ein Antineutron oder Resonanzen und schnelle π-Mesonen.

Dies alles geschieht in Dubna. In einem gleichartigen Target des Synchrophasotrons von Serpuchow entstehen gleichzeitig noch mehr Partikeln in noch reicherem Sortiment. Demnach hängt die Zahl der auf diesem Wege erzeugten Partikeln nur von der Energie der aufprallenden Protonen ab.

Ändert sich irgend etwas, wenn man das Target nicht mit Protonen, sondern mit anderen Partikeln beschießt?

In Jerewan wurde kürzlich ein Synchrotron in Betrieb genommen, das ein Photonenbündel mit einer Energie von 5 GeV erzeugt. Aber auch dort melden die Geräte dieses Elektronenbeschleunigers höchster Leistung genau das gleiche. Der Zusammenprall von Photonen und Protonen läuft ohne Verluste für die Elementarteilchen ab. Der Vorgang wird dabei lediglich von einem wahren Feuerwerk aus neugebildeten Mesonen, Nukleonen und Antinukleonen begleitet. Ihre Anzahl hängt wiederum von der Energie der aufprallenden Photonen ab.

Mit Hilfe der modernen empfindlichen Geräte erhalten die Physiker eine vollständige Information über die Er-

gebnisse der nuklearen „Katastrophe“: Sie erfahren, wieviel und welche Partikeln entstanden sind, sowie welche Energie die Partikeln besitzen.

Solange die atomaren Geschosse nicht genügend Energie zur Erzeugung von Antinukleonen, Antiprotonen und Antineutronen besaßen, war alles sehr einfach. Die eintretende Reaktion gehorchte dem Energieerhaltungssatz und dem Gesetz von der Erhaltung der Nukleonenzahl.

Als jedoch die Energie der beschleunigten Protonen ausreichte, um Antinukleonen zu erzeugen, stellte sich anfangs ein vollständiges Durcheinander ein. Das Gesetz von der Erhaltung der Nukleonenzahl galt bei diesen Kernreaktionen nicht mehr. Es hatte den Anschein, als gehorche der Erzeugungsvorgang für neue Partikeln nur dem Energieerhaltungssatz, ansonsten erschien er völlig spontan und zufällig.

Auf den ersten Blick scheint es tatsächlich so, als habe die Energie in der Mikrowelt die uneingeschränkte Herrschaft und sei keinerlei Gesetzen und Regeln unterworfen. 2 Protonen prallen aufeinander. Im Ergebnis des Zusammenstoßes entstehen einige neue Protonen sowie — zur Freude der Experimentatoren — eine große Anzahl von Antiprotonen, Neutronen, Antineutronen und Mesonen. Es ist wie beim Glücksspiel. Man wirft ein Proton hinein und wartet auf das, was herausfällt.

Die Physiker bemerkten allerdings recht bald, daß die Zahl der Augen, die man bei diesem Glücksspiel zieht, ebenfalls nicht willkürlich sein kann. Auch hier gibt es strenge Regeln.

Nach diesen Regeln ordneten sie jedem Nukleon die „Augenzahl“ +1 und jedem Antinukleon die „Augenzahl“ —1 zu. Mesonen erhielten die „Augenzahl“ 0. Nun hätte sogar ein ABC-Schütze leicht ausrechnen können, daß die Gesamt„augenzahl“ bei sämtlichen Reaktionen vor und nach dem Zusammenstoß konstant ist.

Die „Augenzahl“, die die Nukleonen, Antinukleonen und Mesonen bekamen, bezeichneten die Physiker als Baryonenladung dieser Partikeln. So trat eine neue Spielregel, das Gesetz von der Erhaltung der Baryonenladung, ans Tageslicht. Wie viele Protonen auch immer mit anderen Protonen, mit Neutronen oder mit γ-Quanten zusammenprallten; nach der Reaktion entstanden stets ebenso viele neue Nukleonen wie Antinukleonen.

„Dieses Gesetz", schrieb Professor J. Smorodinski, „spiegelt eine Fundamentaleigenschaft der Atomkerne, nämlich ihre Stabilität, wider. Bei der geringfügigsten Verletzung dieses Gesetzes würden die Protonen oder Neutronen in den Kernen verschwinden und sich beispielsweise in Positronen, Neutrinos oder Mesonen verwandeln. So verdanken wir unsere Existenz der Tatsache, daß das Gesetz von der Erhaltung der Baryonenladung niemals verletzt wird."

Es gibt noch weitere Regeln und Gesetze, denen die Entstehung von Elementarteilchen gehorcht, doch wir wollen an dieser Stelle nicht darauf eingehen. Eine bloße Aufzählung würde kaum Klarheit in unser Problem bringen. Selbst nachdem die Physiker diese Regeln ergründet haben, wissen sie immer noch nicht, wie das endlose Spiel zu erklären und zu verstehen ist, und die Frage „Was kommt heraus?" bleibt offen.

Unklar ist vor allem auch das Wichtigste, nämlich woher eigentlich dieser ganze Partikelnwust stammt, der bei Zusammenstößen entsteht?

Ein Punkt oder kein Punkt?

Wenn Sie mit einem Stock auf den Teppich schlagen, sehen Sie viele 100 Staubteilchen im Sonnenlicht aufsteigen. Niemand stellt die Frage, woher sie stammen. Alle wissen, daß sich diese Staubteilchen im Teppichgewebe befanden.

Darf man nun fragen, wo sich die Partikeln versteckten, die z. B. beim Zusammenprall von Protonen im Beschleuniger entstehen?

Diese Frage ist sinnlos. Sie haben sich nirgends versteckt. Sie entstanden im Augenblick des Aufpralls. Erinnern wir uns: Wenn sich ein Proton in einem radioaktiven Kern in ein Neutron, ein Elektron und ein Neutrino verwandelt, dann sagen wir ja auch nicht, daß die letztgenannten beiden Partikeln im Kern versteckt gewesen sind.

Die Physiker wissen schon längst, daß sich ein Proton in ein Neutron und ein Neutron in ein Proton verwandeln kann. π-Mesonen zerfallen in leichte Partikeln; schwere Resonanzen in „seltsame" und in gewöhnliche Partikeln; Hyperonen und K-Mesonen zerfallen in Protonen und Neu-

tronen. Andererseits erzeugen hochenergiereiche Protonen beim Zusammenstoß mit den Nukleonen des Targets Resonanzen, Hyperonen, Nukleonen und Mesonen.

Diese wechselseitige Umwandelbarkeit der Elementarteilchen, die Möglichkeit ihres Entstehens und Verschwindens führte notwendig zum Gedanken von der wechselseitigen Bedingtheit dieser Eigenschaften. So entstand der Eindruck, daß das Bild jedes konkreten Elementarteilchens von allen übrigen „Bürgern" der Mikrowelt mitgeprägt werde.

Allmählich wurde der Gedanke „alles besteht aus allem" trivial. Der amerikanische Theoretiker D. Tschu hat diese Situation treffend als „nukleare Demokratie" bezeichnet, die in der Familie der Teilchen mit starker Wechselwirkung herrsche.

Bei diesen Überlegungen fiel es den Physikern allerdings schwer, von der Vorstellung wegzukommen, daß die Partikeln, die die Theorie als punktförmig bezeichnet, in Wahrheit eine Ausdehnung und eine komplizierte Struktur haben müßten.

Die Sprache der Streuung

Man kann das Wort „Honig" so oft wiederholen, wie man will, süß wird es im Munde nicht davon. Alles Gerede von der Struktur und Ausdehnung der Partikeln wäre keinen roten Heller wert, wenn es nicht möglich wäre, diese Eigenschaften experimentell „abzutasten".

Zuweilen entsteht eine Situation, wo wir irgendeine Schachtel oder Schatulle nicht öffnen können oder dürfen und doch genau wissen, daß irgend etwas darin ist. Um den Inhalt vielleicht zu erraten, beginnen wir die Schachtel zu kippen und zu schütteln und horchen auf die Geräusche, die dabei entstehen.

Um herauszubekommen, ob z. B. ein großes Gußstück oder eine Schweißnaht Luncker und Risse enthalten, werden sie mit Röntgen- oder γ-Strahlen durchleuchtet.

Das Problem, das den Erforschern der Elementarteilchen aufgegeben ist, ist weitaus komplizierter. Eine Partikel ist keine Schachtel mit Wänden, sondern ein kompliziertes System mit verteilter Ladung und mit Strömen.

Die Struktur eines Elementarteilchens zu untersuchen bedeutet, die Verteilung aller dieser Ladungen sowie die elektromagnetische Wirkungssphäre zu messen.

Läßt sich eine so „delikate" und außerordentlich schwierige Operation überhaupt ausführen?

Erinnern wir uns nur daran, wie der Atomkern entdeckt wurde. Vor Rutherfords Versuchen stellte man sich das Atom allgemein entsprechend dem Thomsonschen Atommodell als eine positiv geladene Kugel mit den darin „schwimmenden" Elektronen vor. Später wurde mit Hilfe der α-Teilchen der schwere Kern im Inneren des Atoms entdeckt.

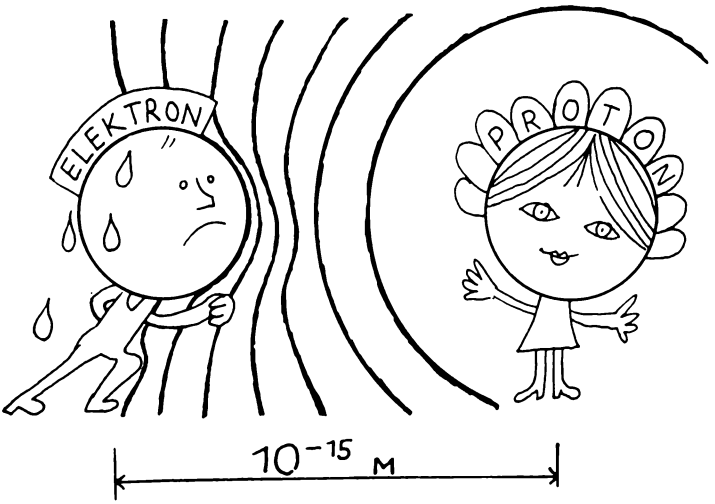
Die Experimentatoren achteten darauf, wie sich die α-Teilchen verhalten, wenn sie dünne Folien aus bestimmten Stoffen durchfliegen. Die meisten α-Teilchen änderten ihre Bewegungsrichtung überhaupt nicht. Doch es gab auch solche, die sich um 90° oder sogar um 180° gegen ihre ursprüngliche Richtung auslenken ließen. Der eindeutige Schluß, daß sie mit einem schweren, winzigen Körper zusammengeprallt sein müßten, folgte dieser Feststellung auf dem Fuß.

Auch in unserem Fall könnten wir uns der universellen Sprache der Streuung bedienen. Freilich wäre eine so grobe Sonde wie das α-Teilchen, das aus zwei Protonen und zwei Neutronen besteht, für unseren Zweck nicht geeignet. Auch ein einzelnes schnelles Nukleon läßt sich nicht verwenden. Zwischen ihm und der zu untersuchenden Partikel würde sofort eine starke nukleare Wechselwirkung einsetzen, und im Ergebnis entstünden neue Nukleonen und Mesonen. Unter diesen Verhältnissen ist es schlechthin unmöglich, nicht nur die Struktur der Partikel aufzuklären, sondern überhaupt zu erkennen, ob es sich um die Ausgangspartikel handelt oder bereits um ein neu entstandenes Teilchen.

Man versuchte, die Protonen mit Photonen „zu durchleuchten". Doch auch dieses Verfahren war zur Erforschung der Struktureinzelheiten eines Elementarteilchens ungeeignet. Um sich einem Proton auf einen Abstand unter 10^{-15} m zu nähern, muß das Photon eine außerordentlich große Energie besitzen. Doch in diesem Fall führte der Zusammenstoß mit dem Proton wiederum zur Entstehung von Resonanzen und anderen Partikeln. Am besten geeignet für den hier beabsichtigten Zweck war das erste über-

haupt von den Physikern entdeckte Elementarteilchen, unser alter Bekannter, das Elektron.

Elektronen zeigen mit anderen Partikeln nur elektromagnetische Wechselwirkung, so daß eine starke Wechselwirkung mit den Protonen des Targets ausgeschlossen ist. Überdies kann das Experiment mit Elektronen so angelegt werden, daß man nur die Wirkung jener Partikeln registriert, die dem Proton die kleinstmögliche Energie übertragen. Mit anderen Worten, man kann alle Fälle ausschließen, bei denen neue Teilchen erzeugt würden.



Was die als Geschosse verwendeten Teilchen auf ihrem Weg „in Erfahrung bringen", darüber berichten sie in der Sprache der Streuung.

Die Gesetze für die Streuung einer punktförmigen Ladung an einer anderen Ladung sind aus der Theorie elektromagnetischer Wechselwirkungen längst bekannt. Setzt man voraus, daß das Elektron punktförmig ist, dann muß uns seine Streuung am Proton zeigen, nach welchem Gesetz ihre gegenseitige Verständigung erfolgt. Somit könnten wir erfahren, ob sich eine Abweichung von der Streuungstheorie punktförmiger Ladungen ergibt, d. h., ob das Proton eine Struktur besitzt.

Um derartige Versuche durchführen zu können, mußte

man zuerst einmal lernen, Elektronen mit einer Energie zu erzeugen, die dem Proton genügend dicht „auf den Pelz rücken“ können. Genügend dicht bedeutet eine geringere Entfernung als 10^{-15} m.

„Es muß festgestellt werden“, bemerkte das Korrespondierende Mitglied der Akademie der Wissenschaften der UdSSR, D. Blochinzew, „daß jeder Schritt vorwärts bei der Erforschung solcher Probleme wie der Nukleonenstruktur ebenso schwierig ist wie das Vordringen in die entfernten Bereiche des Weltalls. Der ganze Unterschied besteht darin, daß man sich in der Astrophysik komplizierter Teleskope, in der Atomphysik dagegen komplizierter Beschleuniger bedienen muß.“

Die „Elektronenkundschafter“

1954 nahm an der Universität Stanford (USA) ein neuer linearer Elektronenbeschleuniger seinen Betrieb auf. Im gleichen Jahr schloß eine Gruppe von Experimentalphysikern unter der Leitung des amerikanischen Wissenschaftlers R. Hofstadter die Vorbereitungen zum „Sturm“ auf die Nukleonen ab.

Enrico Fermi sagte einmal: „Wir sehen auf jeder Entwicklungsetappe der Wissenschaft jene Partikeln als elementar an, deren Aufbau wir nicht kennen und die wir als punktförmig betrachten.“

Doch bereits damals hatten die Wissenschaftler bei ihrem Bestreben, sich den Mechanismus der Kernkräfte vorzustellen, einen gewissen Verdacht dahingehend, daß die Elementarteilchen eine sehr komplizierte Struktur haben müßten. Die Nukleonen stellten sich die Physiker in Form „nackter“ eigentlicher Nukleonen vor, die in einen „Mantel“ bzw. eine Wolke aus π-Mesonen gehüllt sind. Diese, wie man glauben könnte, naiven Bilder besaßen jedoch eine gewisse Berechtigung.

Bei Schneeballschlachten legen sich die Jungen meist erst einen Vorrat von Schneebällen an, um dann den Gegner damit zu bewerfen. Die Masse eines Schneeballs bestimmt dabei die Entfernung, von der aus man den „Gegner“ noch treffen kann. Bei einem größeren Abstand macht das Spiel keinen Spaß.

In der gleichen Weise hängt die Masse der π-Mesonen mit dem Wirkungsradius der Kernkräfte zusammen, d. h. mit der Entfernung, in der Protonen und Neutronen noch miteinander in Wechselwirkung treten können. Die Bewegung der geladenen Mesonen in der Wolke erzeugt das Magnetmoment der Nukleonen. Bereits dies allein genügt, um Nukleonen und Mesonen als „strukturell" untrennbar anzusehen. Würde es den schnellen Elektronen gelingen, diesen Mesonenmantel aufzuspüren?

Der Angriff begann. Die Elektronen aus dem Beschleuniger von Stanford „tauchten" mit einer Energie von 550 MeV in die unbekannten Tiefen der Materie ein. Die Apparatur empfing die ersten Berichte der „Elektronenkundschafter" aus dem Target.

Die Physiker entzifferten die Mitteilungen, übersetzten sie in die Sprache von Kurven und Tabellen und schrieben sie in Gestalt von Formeln auf. Irgendwo im Bereich des Wirkungsradius der Kernkräfte, der gerade 10^{-15} m beträgt, mußten die „Elektronenkundschafter" auf den Vorposten der Nukleonen, die geladene π-Mesonenwolke, stoßen. Die ersten Ergebnisse brachten eine Enttäuschung. Die Elektronen wurden an den Protonen wie an einer punktförmigen Ladung gestreut. Doch der Mißerfolg der ersten Versuche veranlaßte die Wissenschaftler nicht zum Aufgeben. Man beschloß eine Umrüstung; die Apparatur sollte verbessert und exakter gestaltet werden.

Wieder wird ein Elektronenbündel auf das Target gerichtet, von neuem beginnen Erwartung und Aufregung. Was geschieht in der scheinbar „unendlichen Tiefe" der Materie? Worauf sind die Elektronen gestoßen? Sind es dimensionslose Punkte oder geladene Gebilde endlicher Ausdehnung?

Hartnäckigkeit und hohe experimentelle Meisterschaft siegten. Die Elektronen wiesen an den Protonen eine Mesonenwolke nach. Das war eine fundamentale Entdeckung, einer der großen Erfolge in der Physik. Die Elementarteilchen haben also eine innere Struktur!

Der Nobelpreis, der R. Hofstadter 1961 verliehen wurde, krönte seine Arbeiten zum Nachweis und zur Untersuchung der elektromagnetischen Struktur der Nukleonen. Damit ist freilich nicht gesagt, daß es ihm gelungen wäre, alle noch offenstehenden Fragen zu beantworten.

Längst nicht alle Physiker interpretierten seine Ergeb-

nisse als Beweis dafür, daß das Proton Größe und Struktur besitzt. Vielleicht war das Elektron selbst nicht punktförmig, und vielleicht könnten sich die elektromagnetischen Wechselwirkungen selbst zwischen den Ladungen bei einem Abstand von nur 10^{-15} m verändern?

Eine endgültige Bestätigung der Ausdehnung der Nukleonen war erst dann möglich, wenn es gelingen würde, die Wechselwirkung zweier punktförmiger Ladungen zu beobachten, deren Abstand voneinander unter 10^{-15} m liegt.

Jetzt erinnerte man sich plötzlich an die μ-Mesonen. Ebenso wie die Elektronen zeigen sie entweder elektromagnetische oder schwache Wechselwirkungen. Wenn man den 1000fach geringeren Einfluß schwacher Wechselwirkungen vernachlässigt, dann kann man erwarten, daß eine Begegnung zwischen einem μ-Meson und einem Elektron nach den elektromagnetischen Regeln erfolgt, d. h. als eine Begegnung zweier Ladungen.

Die Streuung der μ-Mesonen an den Elektronen war der Schlüssel zur Ermittlung der Nukleonenstruktur! Bei Versuchen, in deren Verlauf sich ein Elektron und ein μ-Meson auf einen Abstand näherten, der sogar beträchtlich unter 10^{-16} m lag, wird die „Etikette", die von der Theorie elektromagnetischer Wechselwirkungen für Punktladungen vorgeschrieben ist, nicht verletzt.

Demnach waren Hofstadters Versuche nur mit der Annahme zu erklären, daß Elementarteilchen komplizierte Gebilde mit definierter Größe sind. Wie stellen sich die Wissenschaftler die elektromagnetische Struktur von Protonen und Neutronen heute vor?

Man kann von den Physikern, die die Mikrowelt erforschen, unmöglich eine detaillierte Wiedergabe der exakten Struktur der Elementarteilchen auf der Grundlage der experimentell gewonnenen Streuungsdaten fordern.

Aus einem Schädel lassen sich viele Einzelheiten des Gesichts wieder herstellen. Auf dieser Tatsache beruhen die originellen Skulpturen Gerassimows, die im Museum für Anthropologie betrachtet werden können. Seine bildhauerischen Porträts sind deshalb so außerordentlich authentisch, weil zwischen Größe und Form eines jeden Schädelknochens und dem entsprechenden Gesichtsmuskel eine strenge Abhängigkeit besteht.

Im Gegensatz dazu verfährt der Physiker eher wie ein Paläontologe, der z. B. gezwungen ist, das Bild des Fos-

sils aus einem einzigen Schienbeinknochen oder aus einem Unterkiefer zu reproduzieren. Natürlich kann es sein, daß die rekonstruierte Gestalt irgendeiner Echse in Einzelheiten nicht mit dem Geschöpf übereinstimmt, das vor Millionen Jahren lebte. Doch das wird man wohl auch kaum erwarten. Trotzdem erhalten wir ein Bild, das in großen Zügen mehr oder weniger authentisch ist.



Was war es eigentlich, das R. Hofstadter nachgewiesen hatte? Die „elementaren" Protonen und Neutronen besitzen eine sehr komplizierte Struktur. Der größte Teil ihrer Masse ist in einem Raumbereich konzentriert, dessen Radius etwa $0{,}8 \cdot 10^{-15}$ m beträgt. Dieser Bereich ist von einer lockeren Mesonenhülle umgeben, die die Physiker einmal als Mesonenwolke und ein anderes Mal als Mesonenmantel bezeichnen. Mit zunehmender Entfernung vom Mittelpunkt nimmt die Dichte der Mesonenhülle ab.

Die Protonenladung ist ebenfalls inhomogen verteilt. Auf den zentralen Teil entfallen etwas über 10 %, der übrige Teil ist über die Mesonenwolke „verschmiert".

Früher nahm man an, daß das Neutron, das — wie sein Name sagt — im Mittel neutral ist, in Wahrheit posi-

tiv und negativ geladene Bereiche besitzt. Dieses Neutronenmodell hat freilich ein Fiasko erlitten. Bei Annäherung der „Elektronenkundschafter" konnten diese keine elektrischen Vorposten in Form einer geladenen Mesonenwolke feststellen. Vielleicht verbirgt sich die Ladung tiefer?

Heute dringen Elektronen großer Energie bereits bis auf eine Entfernung von $0{,}2 \cdot 10^{-15}$ m in das Neutron ein, ohne daß vorläufig geladene Bereiche entdeckt worden wären.

Sollte das Neutron tatsächlich punktförmig sein? Es wäre unzulässig zu sagen, daß die Elektronen auf ihrem Weg in diese ungewöhnliche Tiefe keinerlei Widerstand angetroffen hätten. Im Gegenteil, gerade dort, wo sich der Mesonenmantel befinden müßte, trafen die aufprallenden Elektronen plötzlich auf eine magnetische Einwirkung.

Das bedeutet, daß das Neutron eine Mesonenwolke besitzt. Sie hat die gleiche Größe wie bei den Protonen, ist jedoch elektrisch neutral. Möglicherweise besteht sie aus neutralen π-Mesonen, vielleicht aber auch aus negativen und positiven Mesonenpaaren.

Diese Ergebnisse ließen die Physiker auch an der Punktförmigkeit aller übrigen Teilchen zweifeln. Doch wie war die Tatsache nachzuprüfen? Mit einem langlebigen Nukleon mag es noch angehen. Wie aber sollte man eine Partikel untersuchen, die weniger als 10^{-10} s existiert? Und was wäre mit den Teilchen zu unternehmen, die nur für die Dauer von 10^{-19} s das Licht der Welt erblicken? Wie kann man sie in ein Target für Elektronen verwandeln?

Die Wissenschaftler haben in letzter Zeit trotz aller Schwierigkeiten einen Weg gefunden, das π-Meson zu „messen". Dabei stellte sich heraus, daß auch diese Partikel nicht punktförmig ist, sondern einen wohldefinierten Radius von etwa $0{,}8 \cdot 10^{-15}$ m besitzt. Es ist vernünftig anzunehmen, daß alle Teilchen mit starker Wechselwirkung von vergleichbarer Größe sind.

Was wäre jedoch über das μ-Meson, das Elektron und das Neutrino zu sagen? Die ersten beiden verhalten sich selbst in einer Entfernung von weniger als 10^{-16} m wie zwei punktförmige Ladungen zueinander. Sollten auch sie eine bestimmte Ausdehnung haben, dann muß sie auf alle Fälle unter 10^{-16} m liegen.

Was weiter?

Die Legende von punktförmigen Partikeln existiert nicht mehr. Man muß niemand mehr davon überzeugen, daß zumindest die Partikeln mit starker Wechselwirkung komplizierte Systeme mit endlichem elektromagnetischem Radius sind.

Ist ein Elementarteilchen überhaupt der letzte innerste Baustein der Materiestruktur?

Die sensationellen Ergebnisse Hofstadters bezüglich der Streuung schneller Elektronen trugen zum Auftauchen zusammengesetzter Elementarteilchenmodelle bei.



Bei dem wohl günstigsten derartigen Modell, das der japanische Wissenschaftler Sakata vorschlug, wurden als Basisteilchen, auf denen sich alle übrigen aufbauen, das Λ-Hyperon, das Proton und das Antineutron ausgewählt. Hier fand eine Idee der hervorragenden Theoretiker Fermi und Yang ihre Weiterentwicklung. Beide Wissenschaftler hatten erstmals vorgeschlagen, ein Elementarteilchen, das π-Meson, aus einem Nukleon und einem Antinukleon aufzubauen, d. h. aus Partikeln, die mehrfach schwerer sind.

Die erfolgreiche Beschreibung einer Reihe von Kernreaktionen durch dieses Modell sowie die Vorhersage einiger Eigenschaften von Partikeln auf diesem Wege bewirkte einen „Modeboom“ für zusammengesetzte Modelle. Nun

hielt es fast jeder Theoretiker (und auch mancher Nichttheoretiker) für eine Ehrensache, ein eigenes Elementarteilchenmodell zu entwickeln, und sei es noch so „extravagant". Doch die neuentdeckten Partikeln und die Untersuchung der Wechselwirkung zwischen ihnen ließen alle diese „ad-hoc"-Konstruktionen wieder in der Versenkung verschwinden. Selbst die solide Hypothese von Sakata hielt der Prüfung durch die Zeit nicht stand, weil die Basispartikeln hier unglücklich gewählt waren.

Der mathematische Apparat dieses Modells erlaubte allerdings die Entdeckung neuer Gesetzmäßigkeiten in der Welt der Elementarteilchen. Sakatás Idee vom Aufbau aller Elementarteilchen aus drei Basisteilchen war gewissermaßen die unmittelbare Vorgeschichte des Quarkmodells der Materiestruktur, von dem wir im folgenden Kapitel erfahren werden.

Interessant ist, daß J. J. Thomson bereits zu Beginn unseres Jahrhunderts, als nur ein einziges Elementarteilchen, das Elektron, bekannt war, schon den Versuch unternahm, seine Struktur zu ergründen.

In einer Vorlesung mit dem Titel „Jenseits des Elektrons" sagte Thomson: „Vielleicht sind einige von Ihnen bereit, mich zu fragen: Sollte man eigentlich über die Grenzen des Elektrons hinausgehen, oder geht dies zu weit? Sollte man nicht irgendwo eine Grenze ziehen? Darin gerade liegt der Zauber der Physik, daß sie weder starre noch unveränderliche Grenzen kennt und daß jede Entdeckung in ihr keine Grenze, sondern nur ein Weg ist, der in noch unerforschtes Land führt. Wie lange auch immer die Wissenschaft besteht, stets wird an ungelösten Problemen Überfluß sein, und nie geraten die Physiker in Gefahr, arbeitslos zu werden."

In seinem 1958 herausgegebenen Buch schrieb Akademiemitglied M. Markow von der ungewöhnlichen Kompliziertheit des gegenwärtigen Elementarteilchenbildes, in dem jedes Teilchen „beginnt, durch eine komplizierte Komposition aller ‚elementaren' Teilchen repräsentiert zu werden. Wenn tatsächlich alle Partikeln notwendig sein sollten, das Bild jedes einzelnen von ihnen zu entwerfen, dann ist es sinnvoll, nach irgendeinem anderen ‚Material' zu suchen, das noch elementarer in dem Sinne ist, dem Gesamtverzeichnis aller Fundamentalpartikeln gemeinsam zu sein."

Der neue Linné

Who is who?

Das Bild vom Aufbau der Materie in den drei reinen „Farben" der Elekronen-, Protonen- und Neutronenfarbe nach guter alter Handwerkerart gemalt, war so einfach wie eine Kinderzeichnung.

Ihre Komposition, definiert durch die Struktur des Atoms und des Atomkerns, ließ sich ohne Schwierigkeiten auf der Grundlage der Quantenmechanik interpretieren. Fast schien es, als genüge das Einzeichnen einiger Details, die den Kern und seine Nukleonen beträfen, um dem Bild Vollendung zu geben.

Doch die Entdeckung einer ungeheuer großen Welt von Elementarteilchen ließ diese Hoffnung dahinschwinden. Das vollendete Kunstwerk von gestern bildete in Wahrheit nur einen ersten Entwurf für das zukünftige Bild vom Aufbau der Materie.

Wollte man diesem Bild nur einige 100 neu gefundene Materiepartikeln hinzufügen, dann könnte es nicht mehr vermitteln, als die Empfindung von etwas Unverständlichem, extrem Verwickeltem und Kompliziertem. Klarheit entsteht nur dann, wenn jede Partikel im Gesamtbild den ihr zugehörigen Platz einnimmt und wenn die Wechselbeziehung zwischen allen Einzelelementen klar zutage tritt.

Wovon jedoch sollten sich die Wissenschaftler bei ihrer Suche leiten lassen, wenn es unter den Elementarteilchen keinerlei — nicht einmal die primitivsten — Richtpunkte gibt? Vielleicht gelänge es, sich in der gesellschaftlichen Stellung der Bürger der Mikrowelt zurechtzufinden, wenn man das Prinzip der „Elementarität" der Partikeln fände?

Nach wie vor spricht freilich auch die moderne Theorie von der punktförmigen Partikel und „sieht" in diesem Sinn keinen Unterschied zwischen einem leichten Elektron

und einem schweren Resonanzteilchen. Dabei ist dieser Unterschied doch geradezu augenfällig.

Die Leptonen, d. h. das Elektron, das μ-Meson und das Neutrino, sind nicht an starken Wechselwirkungen beteiligt, und bei ihnen ist keine innere Struktur festzustellen.

In der großen Armee der Teilchen mit starken Wechselwirkungen, den Nukleonen, den schweren Mesonen, der Hyperonen und den Resonanzen, herrschen andere Gesetze und Ordnungen. Die meisten von ihnen zerfallen in leichtere Partikeln. Die bei den Nukleonen und π-Mesonen gefundene komplizierte elektromagnetische Struktur hat den Verdacht der Wissenschaftler bezüglich der „Nichtelementarität" dieser Partikeln nur bestärkt. Doch da die Physiker vorläufig keine Möglichkeit haben, einen Beweis zu erbringen, haben sie diesen Partikeln einfach das Recht abgesprochen, sich als elementar zu bezeichnen und damit begonnen, den Begriff Fundamentalteilchen zu gebrauchen.

Wenn man die Entdeckungsdaten der verschiedenen Partikeln miteinander vergleicht, dann bemerkt man ohne Schwierigkeiten, daß sich die Zahl der Leptonen in letzter Zeit fast überhaupt nicht verändert hat, während die Gruppe der Fundamentalteilchen stark zunahm. Dieser Zuwachs geschah in der Hauptsache auf Rechnung der Resonanzen. Der überquellende Strom umfangreicher wissenschaftlicher Information über immer neue Partikeln drohte, die gesamte Physik hoher Energien zu überschwemmen und sie jeglicher Orientierung in der Welt der Elementarteilchen zu berauben.

Die relativistische Quantentheorie unternahm den Versuch, die Welt der Elementarteilchen auf der Grundlage einiger Axiome und Prinzipien zu beschreiben. Aber auch sie war nicht imstande, diesen Strom in ein bestimmtes Bett zu lenken.

Damals entstand eine neue theoretische Richtung, in der die Wissenschaftler eine Ordnung in der Welt der Elementarteilchen fanden und in der sie die darin verborgenen Gesetzmäßigkeiten entdeckten, indem sie sich nur auf die experimentell ermittelten Eigenschaften der Partikeln wie Ladung, Masse usw. stützten.

Merkwürdige Ausstellungsstücke

Die Liste der 200 elementaren Materiebausteine erinnerte an das Herbarium eines Menschen, der keine Ahnung von der Pflanzensystematik hat. Ein „Amateurbotaniker" würde beliebigen Unterschieden zwischen den Pflanzen absolute Bedeutung zumessen und jedem Exemplar aus seiner Sammlung einen gesonderten Platz zuordnen.

Das Verdienst Karl Linnés, des Schöpfers der Pflanzensystematik, bestand nicht nur darin, daß er die wichtigsten Zugehörigkeitsmerkmale der Pflanzen zu einer bestimmten Gattung auswählte, sondern vor allem auch darin, daß er jene Unterschiede angab, die man beim Zusammenfassen der Gattungen zu Familien und der Familien zu Ordnungen vernachlässigen darf.

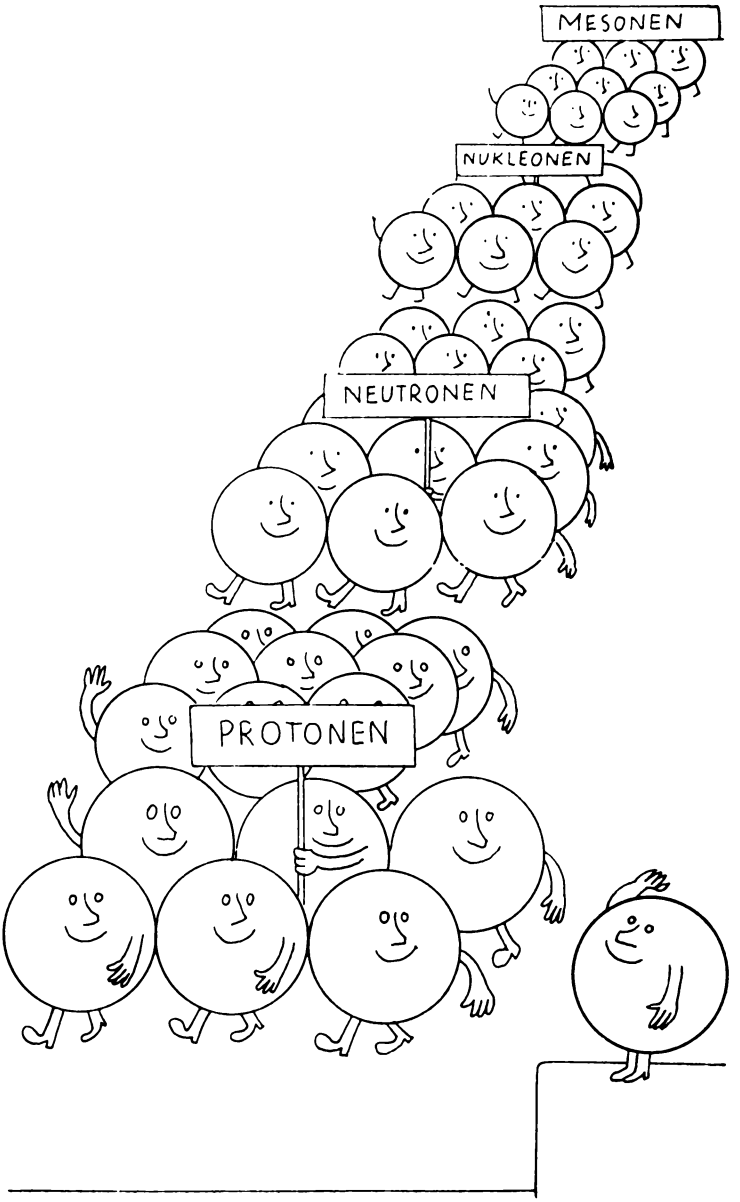
Läßt sich analog dazu eine Systematik der Elementarteilchen entwickeln? Welche Unterschiede dürfte man dann bei der Zusammenfassung der Teilchen zu Gruppen außer acht lassen?

Die Physiker wußten zwar bereits, daß in den starken Wechselwirkungen zwischen einem Proton und einem Neutron, einem Proton und einem Proton sowie einem Neutron und einem Neutron kein Unterschied existiert. Zwischen diesen Partikelnpaaren wirken gleichartige Kräfte.

Alle diese Experimentaltatsachen führten Heisenberg zu einer fruchtbaren Idee. Er kam als erster auf den Einfall, daß man das Proton und das Neutron — wenn man die positive Ladung des einen und das Fehlen einer Ladung beim anderen außer acht läßt — als ein und dieselbe Partikel auffassen kann, da sich beide bei nuklearen Wechselwirkungen völlig identisch zeigen.

Ebenso wie alle Gegenstände in der Dämmerung gleichförmig grau erscheinen, verblaßt auch der Farbenreichtum der Elementarteilchen etwas, wenn man die elektromagnetischen Beziehungen zwischen ihnen außer acht läßt. Für das Proton und das Neutron reicht dann eine „Nukleonenfarbe" völlig aus, ebenso können die drei π-Mesonen mit unterschiedlicher elektrischer Ladung durch eine einzige „π-Mesonenfarbe" charakterisiert werden.

Schon dieser im Grunde genommen gar nicht so große Schritt zur Systematisierung war eine Hilfe für die Theoretiker. Sie stellten sofort gewisse Beziehungen für die


MESONEN
NUKLEONEN
NEUTRONEN
PROTONEN

Wahrscheinlichkeit von Prozessen auf, die unter Teilnahme von Partikeln der jeweils gleichen Gruppe stattfinden.

Damals allerdings waren die „seltsamen" Partikeln und Resonanzen noch nicht entdeckt. Kaum waren sie aufgetaucht, als das „Herbarium" der Elementarteilchen unförmig anschwoll. 1960 berichteten Sakatas Schüler erstmals den Delegierten einer internationalen Konferenz von einer wesentlich allgemeineren Gesetzmäßigkeit, die die Elementarteilchen miteinander verknüpft. Durch Analyse des von ihrem Lehrer entworfenen Modells entdeckten sie so etwas ähnliches wie ein Periodensystem der fundamentalen Materiebausteine. Ein Jahr später schlugen die beiden amerikanischen Physiker M. Gell-Mann und J. Néemann, gestützt auf diese Ergebnisse, unabhängig voneinander eine Systematik der Elementarteilchen vor, die auch die Resonanzen umfaßte. Auf der Grundlage dieser Systematik gelang es, alle Teilchen starker Wechselwirkung in einigen großen Gruppen zusammenzufassen.

Murray Gell-Mann (geb. 1928) gab seiner Systematik die poetische Bezeichnung der „achtfache Weg". Er wählte diesen Namen nach einem alten buddhistischen Spruch: „Denn dieses, ihr Mönche, ist der edle achtgliedrige Weg, der zur Überwindung des Leidens führt: Die rechte Ansicht, das rechte Entschließen, die rechte Rede, das rechte Handeln, das rechte Leben, das rechte Streben, die rechte Fürsorge und die rechte Sammlung."

Die von Gell-Mann und Néemann vorgeschlagene Klassifikation verminderte zweifellos „die Leiden" der Physiker. Das Chaos war beseitigt. Allerdings blieb die Frage offen, inwieweit dieser Versuch, diktiert von dem „rechten" Entschließen, wirklich „recht" war.

Nach den Arbeiten von Gell-Mann und Néemann erschienen noch andere Varianten zur Beseitigung des Chaos, die ihren Urhebern nicht minder „vernünftig" erschienen.

So entstand eine seltsame Situation. Einerseits hielten viele die Entwicklung einer Systematik der Fundamentalteilchen zu jener Zeit für eine aussichtslose Richtung in der Physik. Die Anhänger der strengen Theorie sahen diese Beschäftigung eines echten Wissenschaftlers für unwürdig an.

Andererseits rief der immer zunehmende Strom theoretischer Arbeiten zu diesem Thema selbst bei einer Reihe wissenschaftlicher Zeitschriften „Erschrecken und Miß-

trauen“ hervor. Man konnte den Eindruck gewinnen, daß die Theoretiker im hellen Tageslicht geneigt sind, ironische Bemerkungen über diese Richtungen zu machen, während sie in der Stille der Nacht Arbeiten darüber verfassen, deren Zahl exponentiell zunimmt.

Wie dem auch sei, immer mehr Physiker beteiligten sich an dem Wettbewerb um das beste „Herbarium“ der Elementarteilchen. Die wissenschaftliche Atmosphäre in der Physik hoher Energien wurde immer gespannter. Welche Variante würde als die beste akzeptiert werden? Was würde die objektivste und gerechteste „Jury“, das Experiment, dazu sagen?

Dieses schwieg aber vorläufig wie der Weise, der über ein kompliziertes Problem nachdenkt. Wir machen uns diesen Umstand zunutze und erläutern hier zunächst einmal das, was die Urheber des „achtfachen Weges“ vom Experiment erwarteten.

Sie hatten ihre Idee mathematischen Operationen unterzogen, die noch im 19. Jahrhundert von dem norwegischen Mathematiker Sophos Lie entwickelt worden waren und nach ihm die Bezeichnung Liesche Algebra erhalten hatten. Daraus erhielten sie einen klaren „Aufmarschplan“ für die Fundamentalteilchen. Den Partikeln wurde vorgeschrieben, in Gruppen aus 3, 8 und 10 „Mann“ anzutreten. In eine bestimmte Gruppe kamen dabei stets nur Partikeln mit ganz bestimmten Quantenzahlen*.

Nachdem man die Nukleonen, Mesonen und Resonanzen auf diese Gruppen verteilt hatte, stellte sich heraus, daß neben einer völlig unbesetzten Dreiergruppe in der Gruppe aus 10 schweren Partikeln ein Platz ebenfalls leer blieb. Wer fehlte da?

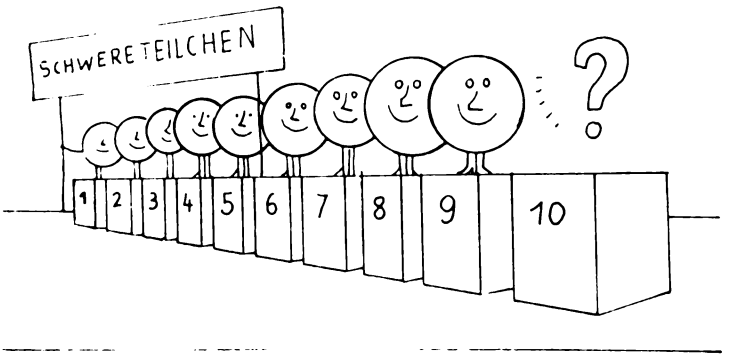
Aus der Geschichte des Periodensystems der chemischen Elemente ist bekannt, daß dieses System ebenfalls freie Plätze für noch nicht entdeckte Elemente enthielt. Dabei

---

* Die Quantenzahlen charakterisieren den Zustand eines quantenphysikalischen Systems. Jede physikalische Erhaltungsgröße wird durch eine bestimmte Quantenzahl gekennzeichnet. Jede Quantenzahl hängt daher mit dem zum betreffenden Zustand gehörenden Eigenwert einer Meßgröße zusammen. Die Hauptquantenzahl n bezeichnet z. B. die Nummer der Kreisbahn bzw. des dieser Bahn entsprechenden Energieniveaus eines ins Auge gefaßten Elektrons im Atomverband.

hatte Mendelejew die Eigenschaften dieser Elemente bereits vorhergesagt.

Mit Hilfe der Regeln, nach denen die Gliederung der Partikeln in Gruppen erfolgte, war leicht festzustellen, daß unter den fraglichen 10 „Bürgern" der Mikrowelt die schwerste Partikel fehlte. Man bezeichnete diese Unbekannte als Ω^--Hyperon und entwarf ihr „Porträt" durch Angabe der Masse und der Quantenzahlen. In der Folgezeit zeigte sich, daß der Entwurf dem Original sehr nahe kam.



Die so ermittelte Ordnung trug dazu bei, Erscheinungen miteinander zu verbinden, in denen die Theorie nichts Gemeinsames fand, und die Wahrscheinlichkeit von Kernreaktionen unter Beteiligung von Partikeln ein und derselben Gruppe zu berechnen. Zum ersten Mal gelang es, mit hoher Genauigkeit das für das Verständnis der Partikelneigenschaften sehr wichtige Verhältnis der magnetischen Momente von Neutron und Proton theoretisch zu berechnen.

Ungeachtet dieser Erfolge rief das „Loch", das in der Gruppe der 10 schweren Teilchen* gähnte, Zweifel an der Richtigkeit der Klassifikation selbst hervor. Die Experimentalphysiker suchten buchstäblich mit dem „Steckbrief" in der Hand und mit verdoppeltem Eifer nach dem Ω^--Hyperon. „Sollte es gefunden werden", schrieb seiner-

* Sie wird oftmals auch als Dekuplett der schweren Teilchen, eine Gruppe aus 3 Partikeln als Triplett usw. bezeichnet.

zeit Gell-Mann, „dann wäre die Richtigkeit des ‚achtfachen Weges' wesentlich besser gesichert."

Wie allen schien, lag der Hauptmangel dieser neuen Systematik an einer anderen Stelle. Wenn man immerhin darauf hoffen konnte, das Ω^--Hyperon zu finden, dann erschien doch die Auffüllung einer kompletten leeren Gruppe aus 3 Partikeln unmöglich.

Im übrigen ging es hier ganz und gar nicht darum, daß 3 Teilchen fehlten, denn die Geschichte der Hochenergiephysik zeigte, daß die Beseitigung dieses Mangels vermutlich nur eine Frage der Zeit gewesen wäre. Die Situation war wesentlich komplizierter. Die mathematische Logik des „achtfachen Weges" hatte diese Plätze für ganz ungewöhnliche „Bürger" der Mikrowelt freigehalten.

Alle Partikeln, mit denen die Physiker zu tun hatten, waren entweder neutral oder trugen eine Ladung, die einem Vielfachen des Betrages der Elektronenladung entspricht. Hier jedoch waren plötzlich Stellen für Partikeln mit gebrochener Ladung freigeworden!

Die Anwärter auf diese Plätze konnten Partikeln mit einem Drittel bzw. zwei Dritteln der Elektronenladung sein. Fast niemand zweifelte an der Absurdität dieser Vorhersage. Das Fehlen des Ω^--Hyperons und die offenkundige Sinnlosigkeit der Vorhersage eines Tripletts mit gebrochenen elektrischen Ladungen verminderte die Chancen des „achtfachen Weges" beträchtlich.

In dieser komplizierten Situation unternahm Gell-Mann (und unabhängig von ihm Zweig) einen Schritt, der sich mit Thor Heyerdahls Unternehmen zum Beweis seiner Theorie von der Besiedlung der Polynesischen Inseln vergleichen ließ. Thor Heyerdahl war bei der Erforschung der alten Kultur Polynesiens zu dem Schluß gekommen, daß diese Inseln nicht — wie man früher glaubte — von Asien aus besiedelt worden sind, sondern von Südamerika aus. Heyerdahls Gegner behaupteten damals, daß es unmöglich sei, ohne Navigationsinstrumente und ohne seetüchtige Schiffe die riesige Wasserwüste des Pazifischen Ozeans zu überqueren. Thor Heyerdahl war von seiner Hypothese überzeugt und baute ein Floß aus Balsaholz. Damit bewies er, daß es möglich war, die Entfernung zu überwinden. Er hatte das Hauptargument seiner Gegner zum Nutzen seiner eigenen Auffassung umgekehrt.

Zutiefst überzeugt von der Richtigkeit seiner Syste-

matik, kam Gell-Mann zu der Annahme, daß jene ungewöhnlichen Partikeln mit gebrochener Ladung nicht nur in der Natur existieren, sondern daß gerade aus ihnen alle übrigen Partikeln einschließlich des noch fehlenden Teilchens „gebildet" sein sollten.

So brachte er seine Theorie ins Reine. Was ihm an Zweifeln und Unsicherheit noch auf der Seele lag, drückte er in der Bezeichnung* jener Partikel aus, die er aus einem wissenschaftlich phantastischen Roman entlehnte.

Die Entscheidung der Jury

Quarks, Quarks, Quarks, dieses unverständliche Wort tauchte seit Anfang 1964 immer häufiger auf den Seiten wissenschaftlicher und populärwissenschaftlicher Zeitschriften auf.

Als in wissenschaftlichen Kreisen zum ersten Mal Gerüchte über die Quarks entstanden, konnte niemand verstehen, was das eigentlich ist. Auch Wörterbücher brachten hier keine Klarheit, weil die Übersetzung dieses rätselhaften Wortes nicht den geringsten physikalischen Sinn besaß.

Dies alles klärte sich auf, als das nächste Heft der amerikanischen Zeitschrift „Physical Review Letters" erschien. In einem kurzen Artikel schrieb M. Gell-Mann, daß die 3 „Aschenbrödel" des „achtfachen Weges" — jenes hypothetischen Tripletts mit gebrochener Ladung — die ungewöhnliche Bezeichnung Quarks erhalten hätten. Durch die Vorstellungskraft des Theoretikers hatten sie sich in die Hauptpersonen der zahlreichen Gesellschaft von Partikeln mit starker Wechselwirkung verwandelt.

Die Protonen, Neutronen und Hyperonen sowie auch die Resonanzen ließen sich ausgezeichnet durch verschiedene Kombinationen der 3 Quarkbausteine und der ihnen entsprechenden Antiquarks aufbauen, während sich die Mesonen aus einem Quark und einem Antiquark ergaben. Mit ihrer Hilfe konnten alle Ergebnisse der Systematik, darunter auch die Gliederung in je 8 bzw. 10 Partikeln, leicht erklärt werden.

---

*Die Bezeichnung, von der hier die Rede ist, lautet Quark und stammt aus dem Roman „Finnegan's Wake" von James Joyce, wo sie für gewisse Wesen verwendet wird.

„Selbst einem Kind kann man einfach und klar verständlich machen", sagte J. Seldowitsch, „daß es 10 Partikeln sein müssen: jede Partikel besteht aus 3 Bausteinen; es gibt 3 Sorten von Bausteinen, und man kann sich leicht davon überzeugen, daß 10 und nur 10 verschiedene Kombinationen existieren."

Eine dieser 10 Kombinationen entsprach exakt dem „Bild" des durch den „achtfachen Weg" vorhergesagten Ω^--Hyperons. So waren die Quarks in der Theorie von Gell-Mann nicht nur zur Auffüllung der noch leerstehenden Gruppe notwendig, sondern auch zur Erklärung der gesamten Elementarteilchensystematik.

Es hat in der Geschichte der Physik bereits analoge Situationen gegeben, bei denen Theoretiker neue Partikeln entstehen ließen. 1932 „erfand" Pauli die kleine neutrale Partikel Neutrino zur „Rettung" des Energieerhaltungssatzes. Ein Jahr früher hatte Dirac mit Papier und Bleistift das Positron entdeckt. Dazu muß gesagt werden, daß weder die eine noch die andere Hypothese anfangs bei den meisten Physikern Begeisterungsstürme erweckten.

Die Theorie der Quarks dagegen stellte noch größere Ansprüche. Akzeptierte man die Existenz der Quarks, dann mußte man damit zugleich einen neuen Materietyp anerkennen, einen Atomismus neuen Typs mit noch „elementareren Wesenszügen".

Diese Hypothese wurde mehr als kühl aufgenommen. Das ganze Operieren mit den Quarks kam den Theoretikern wie eine Spielerei vor. Und sie hatten auf ihre Art sogar recht.

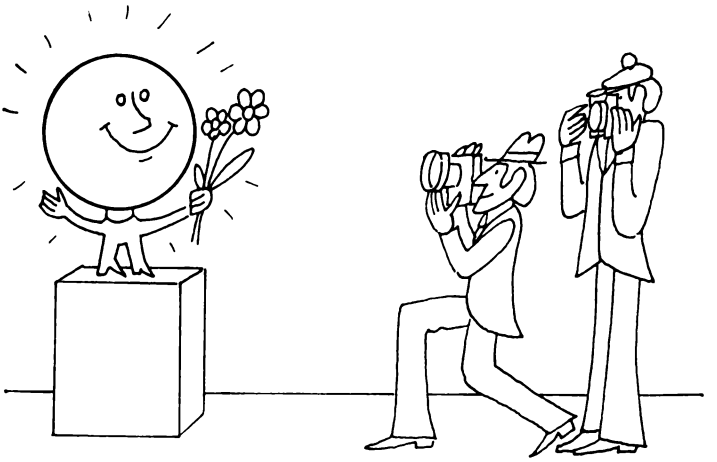
Alle früheren Versuche, Fundamentalteilchen aus anderen realen Partikeln (theoretisch) „aufzubauen", führten nicht zum Erfolg. Natürlich konnte man von jeder Partikel annehmen, daß sie aus beliebigen anderen Teilchen mit passenden Quantenzahlen aufgebaut sei. Nur aus den Partikeln, aus denen das betrachtete Teilchen angeblich bestand, ließen sich dessen Eigenschaften nicht ableiten. Bei der Entstehung der neuen Partikel verloren die alten Partikeln gewissermaßen ihr „Gesicht".

Das Quarkmodell dagegen beharrte gerade auf dieser primitiven Teilchenkonstruktion, nur daß die Teilchen aus 3 Sorten von Quarks bestehen sollten, die ihre Individualität nicht verlören. Das war der Grund, warum jede Erwäh-

nung der Theorie bei den meisten Wissenschaftlern oft ein Lächeln hervorrief.

In diesem kritischen Augenblick meldete sich endlich der große „weise Richter", das Experiment, zu Wort. In Windeseile verbreitete sich eine sensationelle Nachricht: Das Ω^--Hyperon ist entdeckt! Das Dekuplett der schweren Partikeln ist vollständig; das Original entspricht exakt dem theoretisch entworfenen Porträt!

In den USA war am Beschleuniger von Brookhaven eine 2-m-Wasserstoffblasenkammer* mit Protonen großer



Energie bestrahlt worden. Nach Auswertung von 100 000 Fotos hatten die Wissenschaftler auf einem davon diese Partikel entdeckt.

Der lange gesuchte „Bewohner" der Mikrowelt wurde feierlich „inthronisiert". So hatte sich die Richtigkeit des „achtfachen Weges" bestätigt. Das Experiment hatte sich für die beste Variante eines „Herbariums" der Fundamentalteilchen entschieden.

Die Bedeutung der für die Partikeln ermittelten Ordnung wird auch durch den Umstand nicht geschmälert, daß wir vorläufig nicht wissen, welche tieferreichenden Naturgesetze ihr zugrunde liegen. Auch Mendelejew wußte

* Dieses Nachweisgerät für Elementarteilchen wird später noch genauer beschrieben.

nicht, daß die Ordnungszahl der Elemente in seinem Periodensystem der Kernladungszahl entspricht.

Das neue Verfahren zur Partikelnklassifikation, für das Gell-Mann den Nobelpreis erhielt, gehört zu den grundlegendsten Entdeckungen der Physik der Elementarteilchen.

Was aber ist mit den Quarks; existieren sie demnach?

Die Entdeckung der in der Systematik fehlenden Partikel löste das Rätsel der Quarks nicht. Sie leugnete ihre Existenz zwar keineswegs, doch es war auch keine Bestätigung des Quarkmodells der Partikelnstruktur. Wie ist diese Antwort zu verstehen, die ein wenig an das Orakel von Delphi erinnert? Vielleicht sind neue theoretische Konstruktionen erforderlich?

In einer wissenschaftlichen Diskussion zu diesem Problem gab das Korrespondierende Mitglied der Akademie der Wissenschaften der UdSSR, L. Okun, eine klare Antwort: „Die Frage, ob in der Natur neue stabile Partikeln, insbesondere die Quarks, existieren, kann nur experimentell und nicht mit Hilfe theoretischer Modelle beantwortet werden."

Die Jagd auf die Quarks

Nach der sensationellen Entdeckung des Ω^--Hyperons hatten die „Aktien" der Quarks angezogen. Plötzlich waren sie zu einem „Leckerbissen" für die Experimentatoren geworden. Nun begann die Jagd auf die Quarks. In vielen Laboratorien brach eine echte Hektik aus. Man suchte die Quarks in den Ländern der östlichen und in den Ländern der westlichen Halbkugel. Weder mit Hilfe des Synchrophasotrons in Dubna, mit Hilfe des CERN-Beschleunigers* noch in Serpuchow gelang es, sie zu finden. Auch der größte Beschleuniger der Welt in Batavia (USA) konnte ihren experimentellen Nachweis nicht erbringen.

Aber wußten die Experimentatoren wenigstens, was sie suchten und wie diese Quarks „aussehen"? Ja und nein. Genau bekannt ist nur, daß sie eine gebrochene elektrische Ladung besitzen. Hinsichtlich der Masse allerdings herrscht

* CERN ist ein internationales Forschungszentrum der Hochenergiephysik in Westeuropa. Sein Sitz ist Genf.

komplette Unklarheit. Theoretisch konnten die Quarks ebenso gut ein Drittel der Protonenmasse oder eine Masse von einer Tonne besitzen.

Wären die Quarks leichter als die Protonen oder hätten sie doch wenigstens eine geringere Masse als die schwerste bis heute bekannte Resonanzpartikel, dann wären sie längst in den Beschleunigern entdeckt worden. Auch die gebrochene Ladung hätte ihnen nichts genützt. Dem erfahrenen Blick des Experimentators wären sie nicht entgangen. Ihre Spur in der fotografischen Emulsion erschiene eben nur etwas dünner und blasser als bei gewöhnlichen Partikeln gleichen Energieinhalts.

Die Alltagserfahrung hat uns davon überzeugt, daß ein Gegenstand um so auffälliger und um so leichter zu entdecken ist, je größer er ist. Ein „verschwundenes" Buch in einem Zimmer wiederzufinden ist unvergleichlich leichter als eine kleine Stecknadel. Die Situation bei der Suche schwerer Partikeln müßte eigentlich die gleiche sein.

Bei den Experimenten an den Beschleunigern freilich sucht man die Quarks nicht, sondern bemüht sich um ihre „Erzeugung". Die Energie des Zusammenpralls, die notwendig ist, um dieses phantastische „Gespenst" der Mikrowelt ins Leben zu rufen, muß der Masse eines Quarks direkt proportional sein.

Alle Versuche, die bislang an Beschleunigern ausgeführt wurden, endeten mit negativem Ergebnis. Freie Quarks wurden nicht gefunden. Offenbar fehlt es den beschleunigten Protonen vorläufig an Energie zur Erzeugung eines schweren Quarks.

Läßt man die extremen Schätzungen der Masse eines Quarks außer acht, dann erscheint ein Betrag von einigen Protonenmassen am akzeptabelsten.

Wie sollte man jedoch aus 3 Quarks, von denen jedes mehrfach schwerer als ein Proton ist, genau 1 Proton aufbauen können? Das Rätsel ist nicht ganz so unlösbar, wie es scheint. Ein Deuteriumkern z. B., d. h. ein Kern des schweren Wasserstoffisotops, besteht aus 1 Proton und 1 Neutron, und doch ist seine Masse etwas geringer als die Summe der Protonen- und Neutronenmasse. Die Masse jedes beliebigen Kerns ist stets etwas kleiner als die Summe der Massen aller Kernbestandteile. Die Differenz geht auf Rechnung der Wechselwirkungsenergie, die die Nukleonen im Kern festhält.

Schauen Sie einmal zu, wie ein zweijähriger Knirps mit Leichtigkeit Würfel wieder in eine Schachtel zurücklegt, aus der er sie zuvor herausgenommen hat. Hier ist alles einfach. Das Gesamtvolumen der Würfel entspricht exakt dem Volumen der Schachtel selbst. Aber sagen Sie ihm doch einmal, er solle 3 große aufgeblasene Luftballons in eine kleine Schachtel legen. Diese Aufforderung wird er entweder als einen Spaß oder als Neckerei auffassen. Ihm muß dieser Wunsch ganz unausführbar erscheinen.



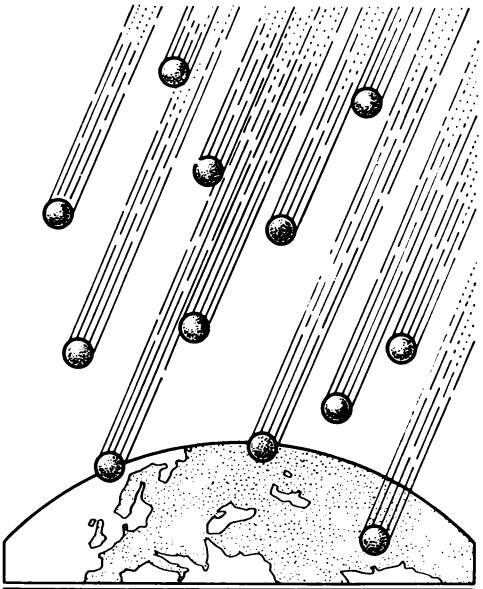
Dabei ist dieses Problem der Aufgabe ganz analog, von der gerade die Rede war. Die Schachtel mit den 3 Luftballons zeigt uns die Lösung.

Wenn wir aus jedem Luftballon so viel Luft ablassen, daß sie alle 3 in die kleine Schachtel passen, dann haben wir ein anschauliches Protonenmodell aus 3 Quarks vor uns. Die Quarks verlieren bei ihrer Verbindung zu einem Elementarteilchen etwa 90 % ihrer Masse.

Möglicherweise sind die Quarks deswegen so unauffindbar, weil den bisher existierenden Beschleunigern ein-

fach die Energie fehlt, um die „Quarkluftballons“ wieder „aufzublasen“?

Versuchen wir es doch einmal mit der kosmischen Strahlung. Vielleicht genügt deren Energie? Die Sendboten ferner Welten gelangen mit ungewöhnlich hoher Energie in



H (Protonen)	1300
He (α-Teilchen)	94
Li, Be, B	2,0
C F	6,7
Ne K	2,0
Ca U	0,5

Zusammensetzung der Hauptkomponente der kosmischen Strahlung in Erdnähe; Anzahl der Teilchen, die in 1 s auf die Fläche 1 m² auftreffen

die Erdatmosphäre. Die Energie von Teilchen der kosmischen Strahlung ist 100- und 1000millionenfach größer als die Energie, die unsere Beschleuniger den Elektronen zu verleihen imstande sind. Was wäre, wenn dort über den Wolken bei nuklearen Katastrophen die ungewöhnlichen Quarks entstehen?

Die Wissenschaftler haben eine Menge fotografischer Platten ausgewertet, die der kosmischen Strahlung ausgesetzt gewesen sind, doch die Ergebnisse waren negativ.

Im Herbst 1969 machte in der wissenschaftlichen Welt eine Mitteilung die Runde, die von der Internationalen Konferenz in Budapest stammte. Der Leiter des australischen Zentrums zur Erforschung der kosmischen Strahlung, Professor Makkasker, berichtete über die Entdeckung der Quarks!

Er hatte eine Wilsonsche Nebelkammer in die dichten Partikelnströme gebracht, die von Protonen aus den Tiefen des Weltalls mit der gewaltigen Energie von 10^{19} bis 10^{20} eV erzeugt wurden. Dabei hatte Makkasker auch die hypothetischen Partikeln gefunden; jedenfalls glaubte er das. Unter 60 000 Partikelnspuren, die mit Hilfe der Wilsonschen Nebelkammer fotografiert worden waren, zeigten 5 nur die halbe Intensität. Das entsprach allem Anschein nach einer halb so starken Ionisation. Genau solche Spuren müßten Quarks mit einer Ladung von zwei Dritteln der Elektronenladung erzeugen.

Makkaskers Experiment wurde zu einer Sensation in der populärwissenschaftlichen Presse. Die unmittelbar an der Entdeckung der Quarks interessierten Wissenschaftler dagegen waren freilich wesentlich zurückhaltender.

Zweifellos ähnelten die Spuren auf Makkaskers Fotos den Spuren von Quarks, doch es existiert eine Vielzahl von sonstigen Ursachen, die diese Spuren hervorrufen könnten. In der Mitteilung des australischen Wissenschaftlers fehlte die Hauptsache, die Kontrollanalyse. Damit aber mußte das Versuchsergebnis in Zweifel gezogen werden.

Während nun die einen Wissenschaftler mit Hilfe von Beschleunigern nach Quarks suchten und die anderen hofften, sie in der kosmischen Strahlung zu finden, versuchte eine dritte Gruppe, Quarks mit Hilfe höchst exakter Experimente auf dem Labortisch zu entdecken.

Der Theorie zufolge mußte eines der 3 Quarks stabil sein. Wenn die Quarks zwar selten, aber doch in der Atmosphäre entstehen, dann muß unter allmählicher Bremsung ihre Akkumulation in gewöhnlicher Materie erfolgen. Im Boden, im Meerwasser, in der Luft, kurz gesagt in allem, was uns umgibt, können sich „steckengebliebene“ Quarks befinden oder zumindest Kerne, an die sich ein derartiges Quark angelagert hat.

Wodurch unterscheidet sich nun aber z. B. ein mit Quarks geladener Wassertropfen von einem mit Elektronen geladenen Tropfen? Der erste besitzt eine gebrochene elektrische Ladung, der andere hingegen eine Ladung, die dem ganzzahligen Vielfachen der Elektronenladung entspricht.

So wurde die Suche nach Quarks zur Suche nach einer gebrochenen elektrischen Ladung in Kohlepartikeln, Meteoriten, Wassertröpfchen und in der Luft. Die in der Physik der Elementarteilchen üblichen Methoden mußten ihren Platz an die herkömmlichen Verfahren der Makrophysik abtreten. Eine Gruppe von Physikern an der Moskauer Universität überprüfte mit hoher Genauigkeit die Ladungen von Kohlestaubpartikeln und Wassertröpfchen, fand jedoch keine gebrochene Ladung. Auch amerikanische und italienische Forscher hatten kein Glück.

Schließlich kamen die Wissenschaftler zu folgendem Ergebnis: Wenn Quarks wirklich in der Natur existieren sollten, dann müssen sie um den Faktor 10^{-17} bis 10^{-18} seltener vorkommen als die Nukleonen. Die Winzigkeit dieser Zahl könnte manchen durchaus entmutigen, die Wissenschaftler selbst freilich nicht.

Die Suche nach den Quarks dauert bis heute an.

Interessant ist dabei folgender Umstand: Die sowjetischen Physiker J. Seldowitsch, L. Okun und S. Pikelner unternahmen den Versuch, theoretisch zu ermitteln, wie groß die Anzahl der abgebremsten Quarks auf der Erde sein könnte. Die Schätzung ergab wiederum, daß die Quarks um den Faktor 10^{-10} bis 10^{-18} seltener vorkommen müssen als die Nukleonen.

Dazu sagte das Korrespondierende Mitglied der Akademie der Wissenschaften der UdSSR J. Feinberg: „Auch dieses Ergebnis bedeutet eine gewisse Erleichterung, denn nun wird verständlich, warum man die Quarks, selbst wenn sie Realität sind, bisher nicht bemerkte."

Im Frühjahr 1971 erschien in den Zeitschriften eine neue Mitteilung darüber, daß eine gebrochene Ladung beobachtet worden sei. Eine Niobkugel, abgekühlt bis auf die Temperatur flüssigen Heliums (—270 °C), war zwischen den Belegungen eines Kondensators im Vakuum an magnetischen Kraftlinien „aufgehängt". Nun wurde die Kugel abwechselnd mit positiven und negativen Elektronen aus radioaktiven Strahlungsquellen beschossen.

Nach dieser Operation hätte die Ladung der Kugel, die ein ganzzahliges Vielfaches der Elektronenladung betragen mußte, vollständig kompensiert sein müssen. Doch sobald man ein Hochfrequenzfeld an den Kondensator anlegte, verhielt sich die Kugel so, als hätte sie eine gebrochene Ladung von einem Drittel der Elektronenladung. Heißt das, daß die Quarks entdeckt sind?

Die Antwort auf diese Frage fällt nicht leicht. Ebenso wie den Ergebnissen Makkaskers fehlt auch diesem Experiment die Beweiskraft.

„Man kann offenbar sagen, daß es keinerlei derartige Partikeln gibt, deren Masse geringer als 6 bis 8 GeV (d. h. das 6- bis 8fache der Nukleonenmasse) ist", schreibt J. Seldowitsch. „Entweder sind sie gar nicht so schwer (so daß die Masse eines Quarks ungefähr gleich 2,5 Protonenmassen ist), oder sie zeigen eine starke Wechselwirkung mit π-Mesonen und treten innerhalb der verschiedenen konkurrierenden Prozesse hinter den π-Mesonen zurück", dieser Meinung ist J. Feinberg.

„Es ist zweifelhaft, ob die Quarks im freien Zustand vorhanden sind. Ebenso wie es im leeren Raum keine Schallwellen geben kann, könnte es sein, daß die Quarks nicht im freien Zustand existieren, obwohl es möglich ist, daß sie in der Struktur der Elementarteilchen eine bedeutende Rolle spielen", sagte D. Blochinzew.

Ein Jahr nach der Entwicklung des Quarkmodells kam sein Schöpfer, der amerikanische Wissenschaftler M. Gell-Mann, zur Internationalen Konferenz über die Physik hoher Energien nach Dubna. Auf die Frage: „Gibt es Quarks?" antwortete er lakonisch: „Wer weiß?" („Who knows?").

„Ich fürchte, hier brauchte es der Feder eines Schriftstellers, um alles das auszudrücken, was er in diese beiden kurzen Worte legte. Es war die außergewöhnliche Hochachtung vor dem Experiment zu vernehmen, das im Endeffekt entscheidend ist und die Wissenschaft voranbringt; doch zu erkennen war auch Gell-Manns intellektuelle Kühnheit, sein Gefühl für das Neue und die Bereitschaft, alles zu akzeptieren, was die Natur uns gibt, um daraus eine neue Theorie zu entwickeln und neue Experimente anzuregen", so beurteilte J. Seldowitsch diese Antwort Gell-Manns.

Der „Chor“ der Quarks

Die Optimisten hoffen noch immer auf die Entdeckung der Quarks und argumentieren ihre Überzeugung etwa folgendermaßen: Die Suche des Neutrinos und des Antiprotons hat sich über ein Vierteljahrhundert ausgedehnt, während die Gesamtgeschichte der Quarks noch nicht einmal 12 Jahre umfaßt. Wir wollen erst einmal abwarten, was die Zukunft bringen wird.

Diese Worte enthalten ein Quentchen Wahrheit. Einige Wissenschaftler sind der Auffassung, daß man die Quarks mit Hilfe des Beschleunigers in Batavia suchen muß, in dem die Protonen bis zu einer Energie von 400 GeV beschleunigt werden. Sollte auch hier ein Mißerfolg eintreten, dann müßte das Problem bis zur Entwicklung einer neuen, leistungsfähigeren Anlage zurückgestellt werden.

Die Hartnäckigkeit dieser Wissenschaftler hat gewichtige Gründe. Die Entdeckung der Quarks wäre Anlaß, die Natur der Materie auf eine ganz neue Art zu betrachten. Auch die Klassifikation der Fundamentalteilchen, die sich so natürlich aus dem Quarkmodell ergibt, erhielte eine solide Stütze.

Dabei haben die Optimisten bereits einige Tatsachen in petto. Es wurde festgestellt, daß der Zusammenprall von Partikeln hoher Energie in vielen Fällen so abläuft, als käme es zu einem paarweisen Zusammenstoß von Quarks, aus denen diese Partikeln bestehen.

Natürlich gibt es auch Pessimisten, denen ihre Intuition sagt, Quarks existieren nicht, und deshalb kann man sie auch nicht finden.

Jeder hat hierbei seine eigene Meinung. Das trifft um so mehr zu, als freie Quarks in der Tat nicht gefunden wurden. Es kann sogar sein, daß ihre Entdeckung niemals erfolgt. Diesen Standpunkt vertritt eine große Gruppe von Wissenschaftlern. Doch in der Einschätzung des „Sinnes“, den das Quarkmodell selbst und der „achtfache Weg“ insgesamt haben, stimmen die Meinungen der Optimisten und der Pessimisten überein.

Der Theoretiker V. Weiskopf, der frühere Direktor des Westeuropäischen Kernzentrums in Genf, der in bezug auf die Quarks eine skeptische Einstellung vertritt und ihre Existenz bezweifelt, berichtete in diesem Zusammenhang

während einer Unterhaltung mit Journalisten folgende Anekdote. Niels Bohr besuchte einen seiner Freunde und bemerkte dabei ein über der Tür angenageltes Hufeisen. Er fragte den Hausherrn, was dies bedeute. „Es bringt Glück", vernahm er als Antwort. „Glauben Sie wirklich daran?" fragte Bohr. „O nein, ich glaube nicht daran. Aber ich muß Ihnen sagen, daß es seine Wirkung auch dann hat, wenn Sie nicht daran glauben."

Auch die Quarks tun unabhängig davon, ob wir an sie glauben oder nicht, ihre Wirkung. 1964 führte Gell-Mann sie in die große Welt ein. Seitdem haben die Quarks Gleichgültigkeit und Mißtrauen ebenso wie aufflammendes Interesse und große Enttäuschungen der Experimentatoren überlebt, ohne Schaden zu nehmen. Nun endlich haben sie die ruhige gleichmäßige „Zuneigung" der Theoretiker gewonnen.

Vor einigen Jahren fand ein Buch unter dem Titel „Die Theorie der Quarks" reißenden Absatz.

Eine Stelle interessiert uns ganz besonders:

„In den vergangenen Jahren hat das Quarkmodell einen festen Platz in der Physik erhalten, obwohl die Entdekkung der Quarks selbst nicht gelang. Die Theorie der Quarks hat ihre Positionen gefestigt und neben Spezialartikeln, die den Quarks gewidmet sind, wird das Quarkmodell buchstäblich in sämtlichen Büchern benutzt, die sich mit Elementarteilchen befassen; das Quarkmodell erscheint in sämtlichen Vorträgen und Übersichten auf allen Konferenzen über Hochenergiephysik."

Die „Arbeitsfähigkeit" der Quarks läßt sich kaum überzeugender darstellen, als es Professor D. Iwanenko in der Einführung zu diesem Buch getan hat. Die Fragestellung reduziert sich heute auf folgendes: Sind die Quarks nur ein anschaulicher Ausdruck für Eigenschaften, die den Elementarteilchen zuzuordnen sind, oder sind sie reale Partikeln?

Ganz unabhängig davon, wie dieses Problem entschieden wird, ist bereits heute klar, daß sich das Quarkmodell als fruchtbarer Boden für die Entstehung neuer theoretischer Ideen erwiesen hat. Dazu gehören sowohl Versuche zur Erklärung der Eigenschaften leichter Partikeln als auch die Entwicklung astrophysikalischer und kosmologischer Theorien.

„Das Quarkmodell", schreibt Professor D. Iwanenko,

„hat sich in Gestalt eines ‚Chores' sehr stabil halten können, ohne dessen Unterstützung die ‚Solisten' in den ersten Reihen nicht vernünftig agieren könnten."

Eine Momentaufnahme

Während die Theoretiker das Problem der Quarks erörterten, hatten ihnen die Experimentatoren eine großartige Überraschung bereitet. An der Universität Stanford wurde ein neuer Elektronenbeschleuniger für eine Energie von 17 GeV in Betrieb genommen.

Mit Hilfe so stark beschleunigter Elektronen konnte man durchaus den Versuch wagen, ins Innere der Nukleonen „hineinzuschauen". Professor Panofski unternahm ein entsprechendes Experiment in der Hoffnung, daß es ihm gelingen würde, die Bestandteile des Protons zu entdecken; vorausgesetzt natürlich, daß sie existieren. Der Gedanke zu diesem Versuch rührte vom Quarkmodell her.

Ohne den Theoretikern das Recht abzusprechen, ihre theoretischen Waffen in verbalen Zweikämpfen auf internationalen Konferenzen und Tagungen zu schärfen, beschlossen die Experimentatoren, endlich den „Stier bei den Hörnern" zu packen. Wenn vorläufig weder möglich war, Quarks zu erzeugen, noch sie in Makroobjekten nachzuweisen, könnte man dann nicht vielleicht versuchen, in Erfahrung zu bringen, ob sie in den Nukleonen vorhanden sind? Wie sollte man das am besten anstellen?

In den früheren Experimenten Hofstadters zur Ermittlung der Nukleonengröße war die Wellenlänge der „Elektronenkundschafter" so groß, daß man Einzelheiten nicht unterscheiden, sondern nur die allgemeinen Konturen der Nukleonen wahrnehmen konnte. Es herrschte ungefähr die gleiche Situation wie bei weitsichtigen Menschen, die einen in Augennähe befindlichen Gegenstand nur in seinen Umrissen wahrzunehmen vermögen. Zur Lösung des neuen Problems taugten nur Elektronen mit sehr großer Energie und entsprechend geringer Wellenlänge. Nun mußte geklärt werden, wie die Streuung von Elektronen, die einen beträchtlichen Teil ihrer Energie an das Proton abgeben, erfolgt. Das war keine einfache Aufgabe. Hier mußte das unter einem bestimmten Winkel dahinfliegende Elektron nicht

nur registriert, sondern auch seine Energie gemessen werden.

Nachdem alle technischen Schwierigkeiten überwunden waren, hielten die Wissenschaftler lange Zahlenreihen in der Hand, die beim Nichtfachmann stets ein sehr bedrükkendes Gefühl auslösen. Dabei handelte es sich jedoch um das hervorragende Ergebnis eines komplizierten Experiments. Freilich wäre es ein Fehler zu glauben, daß dem Physiker ein flüchtiger Blick auf diese Zahlen genüge, um sogleich „heureka!" auszurufen. Alle brannten vor Ungeduld, nun endlich zu erfahren, was die schnellen Elektronen in den Nukleonen vorgefunden hatten. War die Energieabgabe an ein Proton im Ganzen oder an irgendwelche Teile des Protons erfolgt?

Zunächst aber mußten alle denkbaren Fehler, die aus den Versuchsbedingungen resultierten, so exakt wie möglich berücksichtigt werden. Erst danach konnte die abschließende Etappe, die mathematische Bearbeitung der Ergebnisse, realisiert werden. Nun begannen die Zahlen zu „sprechen".

„Das Proton ähnelt einem Kügelchen, das nicht aus Gelee, sondern aus Himbeermarmelade mit den Kernen darin besteht", mit diesen Worten beschrieb ein Theoretiker seinen Eindruck über die Ergebnisse Panofskis. Die Streuung der Elektronen erfolgte so, als bestünde das Proton aus punktförmigen Partikeln.

Der amerikanische theoretische Physiker Feynman taufte sie auf den Namen „Partonen". Das Wort stammt vom Englischen „part" und bedeutet soviel wie „Bestandteil". Dieser einfache Begriff umschließt einen nicht minder tiefen Abgrund des Unbekannten als das rätselhafte Quark.

1969 erfuhren die Physiker während der Internationalen Rochester-Konferenz in Kiew zum ersten Mal von den Partonen. Sofort tauchte der Gedanke auf, lassen sich die Partonen mit den Quarks identifizieren?

Leider gibt es auf diese Frage keine exakte Antwort. Die Natur der Partonen ist unklar. Die einen glauben, daß sie π- oder K-Mesonen sind. Andere dagegen vertreten die Auffassung, die Partonen ähneln den Quarks. Könnte man ihnen eine gebrochene elektrische Ladung zuordnen, dann würden die theoretischen Berechnungen tatsächlich gut mit dem Experiment übereinstimmen.

Trotzdem darf man die Existenz der Quarks nun nicht als bewiesen ansehen. Die Streuung schneller Elektronen

an den Nukleonen liefert uns, wie Feynman sagt, nur eine „Momentaufnahme“ der punktförmigen Bestandteile des Nukleons. Daraus läßt sich noch nichts darüber berichten, wie sie im freien Zustand aussehen und welche Eigenschaften sie besitzen müssen.

Das wohlbekannte Neutron hat, abhängig davon, wo es sich befindet, unterschiedliche Eigenschaften. Wir müssen zwischen einem Neutron im freien Zustand und einem Neutron in einem beliebigen Atomkern unterscheiden. Der Kern ist stabil, ein daraus freigesetztes Neutron dagegen instabil. Nicht einmal eine Viertelstunde vergeht, und das Neutron zerfällt in ein Proton, ein Elektron und ein Neutrino.

Auch ein Quark mit gebrochener Ladung und großer Masse muß eine Metamorphose erfahren, wenn es irgendwann einmal in freiem Zustand auftauchen sollte. Ähnelt vielleicht ein runzliges Gummiklümpchen dem schönen aufgeblasenen Luftballon?

Wie die Partonen aussehen werden, wenn es einmal gelingt, sie gründlich zu betrachten, ist vorläufig unbekannt. Wieder einmal eröffnen sich der theoretischen Vorstellungskraft grenzenlose Weiten.

Verlorene Illusionen

Das „Theta-Tau"-Rätsel

Das brillante Feuerwerk der Elementarteilchen hatte bald aufgehört, die Entdecker in Erstaunen zu versetzen. Die Registrierung jedes neuen Resonanzteilchens — und ihre Zahl war bereits über die 100 hinausgegangen — löste bei den Wissenschaftlern kaum noch überschwengliche Gefühle aus.

Bestünden Ziel und Aufgabe der Physik der Mikrowelt nur darin, für immer neue Partikeln „Personalausweise auszustellen", dann gäbe es hier nichts mehr zu berichten.

„Der Mensch macht sich die Erde untertan, und dieser Vorgang ist unmittelbar verknüpft mit der Erweiterung unseres Wissens von den Gesetzen der Natur", schrieb der theoretische Physiker und Nobelpreisträger E. Wigner. Somit besteht das Ziel aller Wissenschaft nicht nur in der Entdeckung und Beschreibung von Erscheinungen und Prozessen, die in der Natur ablaufen. Die Hauptsache liegt vielmehr in der Suche nach gesetzmäßigen Beziehungen zwischen ihnen.

Vor einigen Jahrhunderten wurden die drei Grundgesetze der Mechanik, der Energieerhaltungssatz, der Impulserhaltungssatz und der Satz von der Erhaltung der Bewegungsgröße, gefunden und untersucht. Auf diese drei Erhaltungssätze stützt sich die gesamte klassische Physik.

Mit der Entdeckung des Atomkerns und der Elementarteilchen drangen die Wissenschaftler in einen neuen Bereich der Natur vor. Hier bemerkte man erstmals die Begrenztheit einiger Gesetze der Makrowelt. In der Mikrowelt gelten eigene, die Quantengesetze. Auch die Atome und Elementarteilchen gehorchten den großen Erhaltungssätzen, wurden jedoch bereits nicht länger von der Newtonschen Mechanik, sondern von der Quantenmechanik beschrieben.

Bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts hatten die Phy-

siker nicht einmal den leisesten Verdacht, daß eine direkte Beziehung zwischen den drei Erhaltungssätzen und so einfachen Eigenschaften von Raum und Zeit besteht, wie der Homogenität und der Gleichartigkeit physikalischer Eigenschaften in sämtlichen Richtungen, die als Isotropie bezeichnet wird.

Das Ohmsche Gesetz gilt an einer Schule in Moskau ebenso wie — Tausende Kilometer davon entfernt — an einer Schule in Indien. Warum eigentlich „funktioniert" dieses und jedes andere Naturgesetz heute ebenso einwandfrei wie gestern, und warum wird es morgen ganz sicher ebenso beschaffen sein wie heute? Das ist einfach deshalb so, weil Raum und Zeit, in denen wir leben, homogen sind. Ihre Eigenschaften sind überall und immer gleich. Wir beachten diesen Umstand praktisch niemals. Wir tun so, als ob er uns nichts angeht. Dabei hängt das Schicksal der Naturgesetze — Sein oder Nichtsein — unmittelbar von der Homogenität und der Symmetrie ab, die Raum und Zeit eigen sind.

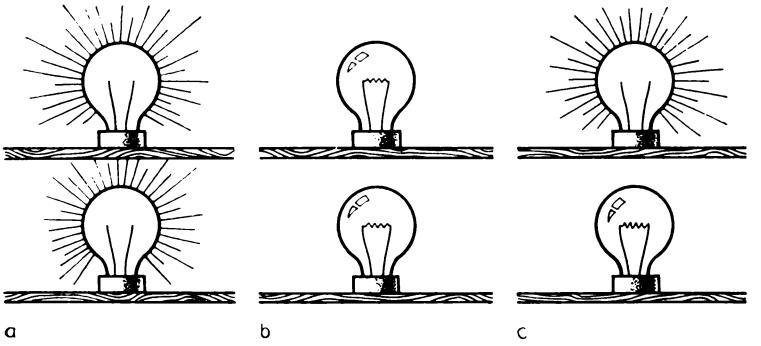
Normalerweise löst das Wort „Symmetrie" nur eine Assoziation zu geometrisch symmetrischen Gegenständen aus. Doch der Begriff „Symmetrie" im allgemeinen Sinn ist mit der Einheit zweier gegensätzlicher Momente, mit der Erhaltung und der Veränderung, verknüpft. Symmetrie bedeutet die Erhaltung bestimmter Elemente bezüglich gewisser Änderungen.

Nach der Entwicklung der Relativitätstheorie und der Quantenmechanik stellte sich völlig unerwartet heraus, daß alle drei Erhaltungssätze, denen die Makrowelt und die Mikrowelt gehorchen, nur die Folge allgemeingültigerer Annahmen sind, und zwar der Symmetrieprinzipien von Raum und Zeit. Seither haben diese fundamentalen Prinzipien der Natur in der hierarchischen Stufenleiter der physikalischen Begriffe die oberste Stufe eingenommen.

Zunächst zweifelten die Physiker nicht an der Richtigkeit dieser Prinzipien, bis dann plötzlich — unerwartet wie der Blitz aus heiterem Himmel — das „Theta-Tau"-Rätsel auftauchte. Der Inhalt dieses Rätsels reduzierte sich auf eine einzige Frage: Betrachten wir ein Teilchen oder zwei?

Urheber dieses Rätsels waren die schweren K-Mesonen. Diese Teilchen hatten sogleich nach ihrer Entdeckung die gespannte Aufmerksamkeit der Physiker auf sich gezogen

und wegen ihrer phänomenalen Fähigkeit, bei starken Wechselwirkungen zwischen Partikeln zu entstehen und bei schwachen Wechselwirkungen zu zerfallen, den Namen „seltsame" Teilchen erhalten. In den Augenblicken, in denen die Mesonen beobachtet werden können, erfuhren die Wissenschaftler viele erstaunliche „Geschichten" über sie.



Beispiele zur Parität: gerade Parität (*a*, *b*), ungerade Parität (*c*)

Man stellte fest, daß sich unter der Bezeichnung „K-Meson" gleich drei Typen von Elementarteilchen verbergen. Eines davon ist neutral, das K^0-Meson, das andere positiv (K^+-Meson), und das dritte Teilchen (K^--Meson) trägt eine negative elektrische Ladung.

Die erste „Geschichte" ereignete sich mit den K^+-Mesonen. Sie zerfallen gewöhnlich auf mehreren verschiedenen Wegen in leichtere Partikeln. Daran wäre nichts Besonderes gewesen. Erstaunen rief dagegen folgender Umstand hervor: Zwei dieser Zerfallsarten mußten theoretisch so interpretiert werden, als zerfielen dabei nicht ein und dieselbe Partikel, sondern zwei verschiedene Teilchen. Beide Arten des Zerfalls ein und derselben Partikel zuzuschreiben, stieß auf ein Tabu in Gestalt eines weiteren allgemeingültigen Gesetzes, das als Paritätserhaltungssatz bezeichnet wird und mit der Invarianz eines quantenmechanischen Systems gegenüber Raumspiegelungen verknüpft ist.

Parität ist ein mathematischer Begriff und kann mit

physikalischen Vorstellungen allein nur schwer erklärt werden. Wenn 2 Zahlen z. B. gerade oder beide ungerade sind, so sagt man, sie haben beide die gleiche Parität. In entsprechender Weise ordnet man auch allen anderen Vorgängen, deren Abfolge sich durch gerade oder ungerade Zahlen charakterisieren läßt, gerade oder ungerade Parität zu. Dabei können wir an 2 Lampen denken. Jede von ihnen kann mit einem Schalter aus- oder eingeschaltet werden. Wenn beide Lampen brennen oder beide dunkel sind, können wir (willkürlich) festlegen, daß dieser Zustand von gerader Parität sei. Brennt nur eine von beiden, so liegt ungerade Parität vor. Auf die Wellenfunktion des Elementarteilchens bezogen, ist die Parität eine ihrer Eigenschaften, die in der Quantenmechanik den Zustand des Elementarteilchens beschreibt. Der Paritätserhaltungssatz bedeutet nun, daß sich dieser Parameter (bei Raumspiegelungen) nicht verändern darf, d. h. invariant bleiben muß.

Dem Nichtfachmann sagen diese Worte vielleicht wenig. Wir wollen hier nur feststellen, daß sich das Gesetz als unmittelbare Folge der Unveränderlichkeit des Raumes bei seiner spiegelbildlichen Reflexion ergibt.

Die Physiker wußten schon vorher, daß Raumspiegelungen an Koordinaten unter Vorzeichenumkehr und unter Vertauschung von Links und Rechts die Mikrowelt nicht betraf. Reale Prozesse in der Mikrowelt zeigten eine räumliche Symmetrie oder auch P-Symmetrie (von Parität), wie man sie ebenfalls bezeichnet. Die Wahrheit galt als unerschütterlich, daß die Natur „Rechts“ und „Links“ nicht unterscheiden kann.

Doch da wurden neue Zerfallsmöglichkeiten bei K^+-Mesonen entdeckt. Sie können sowohl in zwei als auch in drei π-Mesonen zerfallen. Ähnlich den Zerfallsschemen radioaktiver Kerne sind die verschiedenen Möglichkeiten folgendermaßen in Gleichungen zu fassen:

$$K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^-$$
$$K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-.$$

Da alle Mesonen die Parität -1 haben, liefert das Produkt $(-1) \cdot (-1) \cdot (-1)$ den richtigen Wert -1. Die Parität bleibt somit erhalten. Nicht so ist es dagegen bei der ersten Gleichung, denn $(-1) \cdot (-1) = +1$. Das machte die Physiker nachdenklich. Wollte man akzeptieren, daß die gleiche Partikel unter den gleichen Bedingungen so zerfällt, als

ändere sich dabei ihre Parität, so hätte man zwangsläufig annehmen müssen, daß die Ursache dafür in einer Verletzung des Paritätserhaltungssatzes in bezug auf Raumspiegelungen zu suchen ist. Der bloße Gedanke, eine Verletzung des Prinzips der spiegelbildlichen Symmetrie zuzulassen, die ihrerseits aus der Homogenität des Raumes hervorging, ließ die Physiker erschauern!

Darum entschlossen sie sich zu der Annahme, daß nicht eine einzige Sorte von K^+-Mesonen existiert, die auf zwei verschiedenen Wegen zerfällt, sondern zwei Arten mit gegensätzlicher Parität, die dann auch unterschiedlich zerfallen. Die Mesonen mit gerader Parität bezeichnete man als Theta(Θ)-Mesonen, die mit ungerader Parität als Tau (τ)-Mesonen.

Damit hätte der Vorfall geklärt sein können, doch diese Lösung gab weder den Theoretikern noch den Experimentalphysikern ihren „Seelenfrieden" wieder. Die Wissenschaftler waren gewohnt, bis in den Grund der Dinge vorzudringen und keine Unklarheiten bzw. nichts Unausgesprochenes „in der Luft hängenzulassen". Hier war jedoch beides der Fall.

Niemand begriff, warum die Θ- und τ-Mesonen, obwohl sie sich experimentell nicht voneinander unterschieden und die gleiche Masse sowie die gleiche Lebensdauer besaßen, auf verschiedene Art zerfielen. Sollte es sich nicht vielleicht doch um ein und dieselbe Partikel handeln? Dann allerdings mußte die Überzeugung bezüglich der Unerschütterlichkeit der fundamentalen Symmetrieprinzipien aufgegeben werden.

„Die Situation, in der sich die Physiker damals befanden", erinnert sich einer der Wissenschaftler, „ähnelte der eines Menschen, der in einem dunklen Raum nach dem Ausgang sucht; er weiß, daß irgendwo eine Tür sein muß, die ins Freie führt, er weiß nur nicht, in welcher Richtung sie zu suchen ist."

Der „Ausgang" wurde erst 1956 gefunden. Als erste „entdeckten" die in Amerika tätigen Chinesen Tsung-Dao Lee und Chen-Ning Yang „die Tür". Allerdings stiegen sie — wie alle meinten — auf die denkbar ungeeignetste Weise durch die Tür nach draußen. Sie „wischten" die Worte „Theta" und „Tau" wieder „weg" und erklärten, daß nur eine Art von K-Mesonen existiere, und zwar mit positiver elektrischer Ladung.

Dies war eine ungewöhnlich kühne Hypothese. Die beiden Physiker zogen damit das bis dahin für unerschütterlich geltende Gesetz von der Erhaltung der räumlichen Parität in Zweifel. Die neue Annahme erklärte rundheraus, daß beim Zerfall eines K-Mesons unter *schwacher* Wechselwirkung die Symmetrie der Raumspiegelung verletzt werde!

Dann war der Raum also inhomogen? Das wollte niemand glauben. Alle übrigen Versuche hatten ja immer wieder die strenge Erfüllung des Paritätserhaltungssatzes sowohl bei atomaren Erscheinungen als auch bei starken Wechselwirkungen zwischen den Partikeln bestätigt!

Lee und Yang begriffen als erste, daß alle Überprüfungen des Prinzips der spiegelbildlichen Symmetrie „in diesem noch nicht erforschten Gebiet der verschwindend *geringen* Wechselwirkungen keinerlei Wert haben können".

Die Existenz schwacher Wechselwirkungen in der Natur — so schwach, daß sie nur einem Hundertmilliardstel der elektromagnetischen Wechselwirkungen entsprechen — war schon einmal von vorübergehenden Zweifeln an der Erfüllung des Energieerhaltungssatzes begleitet gewesen. Erinnern Sie sich, unter welchen Umständen das Neutrino proklamiert und entdeckt worden ist? Nun unternahm die schwache Wechselwirkung ein weiteres Attentat auf ein anderes fundamentales Naturprinzip.

Der bekannte theoretische Physiker F. Dyson erinnert sich, daß er die Arbeit von Yang und Lee noch als Manuskript zweimal gelesen und dazu gesagt habe: „Mir fehlte einfach die Vorstellungskraft auszurufen: ‚Großer Gott, wenn das wirklich wahr ist, dann eröffnet es ein völlig neues Gebiet in der Physik!' Und ich glaube, daß alle übrigen Physiker, von ganz geringen Ausnahmen abgesehen, zu jener Zeit diesbezüglich ebensowenig Vorstellungskraft besaßen wie ich."

Selbst eine Hypothese, die keinerlei Widersprüche hervorruft, die gewissermaßen „bereits in der Luft hängt", auch sie erhält kein „Bürgerrecht", solange sie nicht im Versuch bestätigt worden ist. Was sollte man dann von dieser Idee sagen, bei deren Bekanntwerden in Physikerkreisen allgemein die „Dolche gezückt" wurden.

Die Entscheidung mußte ein Experiment bringen, bei dem die spiegelbildliche Symmetrie des Raumes unmittelbar überprüft wurde.

Eine Reise in das Land hinter dem Spiegel

Beim Blick in den Spiegel meint man, seinen Doppelgänger zu sehen. Schaut man freilich aufmerksam hin, dann kann man leicht feststellen, wie sehr sich der Doppelgänger vom Original unterscheidet. Im Spiegelbild ist z. B. der rechte Mundwinkel nach unten gezogen, nicht der linke, und auch die Nase zeigt nach der anderen Seite. Links und Rechts sind vertauscht: Das Herz des Menschen liegt im Land hinter dem Spiegel rechts und die Milz links.

Der Mensch ist asymmetrisch. Da er keine räumliche Symmetrie besitzt, wird er im Land jenseits des Spiegels niemals einen Doppelgänger finden, der völlig mit ihm identisch wäre.

In der Welt der Elementarteilchen dagegen — so jedenfalls schien es den Physikern — fallen sämtliche Prozesse mit ihren spiegelbildlichen Doppelgängern zusammen.

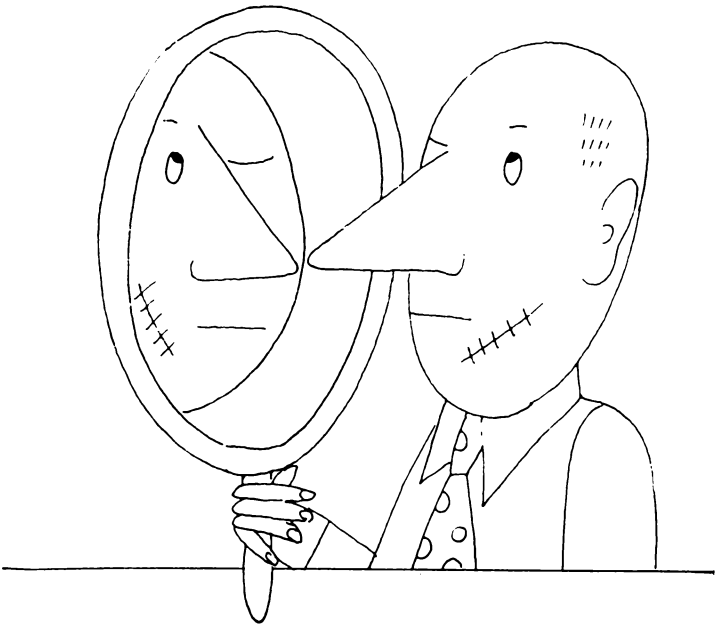
Nun, nach der Entwicklung der Hypothese von Lee und Yang, mußte der radioaktive β-Zerfall der Kerne (das Original) seinem Spiegelbild gegenübergestellt werden. Für diese Überprüfung war der K^+-Mesonen-Zerfall ungeeignet, weil die Lebensdauer dieser Partikeln nur 10^{-10} s beträgt.

Zur Darstellung und Untersuchung von K-Mesonen waren Superbeschleuniger und riesige Geräte zur Registrierung der Kernprozesse notwendig gewesen. Das berühmte „Theta-Tau"-Rätsel war ja auch unter Beteiligung solcher eindrucksvoller technischer Mittel entstanden.

Die Lösung des Geheimnisses aber fand man in einem einfachen, exakten Experiment. Es war ein „Tischversuch", wie die Physiker sagen, d. h. ein im Labor — weit entfernt von allen Beschleunigern — vorgenommenes Experiment. Die Wahl fiel auf das radioaktive Isotop des chemischen Elementes Kobalt. Dieses Isotop ist allgemein bekannt, es hat einem wichtigen medizinischen Gerät, der Kobaltkanone, den Namen gegeben.

Seit langem war bekannt, daß sich die Neutronen in Kobaltkernen beim β-Zerfall infolge schwacher Wechselwirkung spontan in Protonen umwandeln, wobei aus dem Kern gleichzeitig Elektronen und Neutrinos und in deren Gefolge γ-Quanten herausfliegen. Dabei verlassen die Elektronen den Kern überwiegend in Längsrichtung der Achse des magnetischen Kernmoments. Bis 1956 hielten alle Physi-

ker beide in Längsrichtung der Achse möglichen Richtungen für gleichberechtigt, denn der Raum war ja homogen! Soviel Elektronen nach rechts fliegen, so viele mußten auch nach links gehen. Das heißt, die Physiker waren der Meinung, daß der β-Zerfall des Kobaltkerns spiegelsymmetrisch ist. Nach den Versuchen mit K-Mesonen waren hier Zweifel aufgetaucht. Das Problem mußte experimentell



überprüft werden. Ein derartiges Experiment war jedoch nur dann möglich, wenn es gelingen würde, alle Kobaltkerne so auszurichten, daß ihre Magnetmomente mit der Richtung eines äußeren Magnetfeldes zusammenfielen, das mit Hilfe einer Spule erzeugt wurde. Dann brauchte man mit einem Zähler nur noch die Zahl der Elektronen bei der einen Richtung des äußeren Feldes mit der Elektronenzahl bei entgegengesetzter Feldrichtung zu vergleichen. Dies wäre im Grunde genommen eine Überprüfung der Annahme gewesen, daß der radioaktive β-Zerfall des Kobalts spiegelsymmetrisch verläuft.

Leider sind Atomkerne keine Kegel, die man ohne besondere Mühe in der gewünschten Anordnung aufstellen kann.

Vielleicht gab es doch ein Verfahren zur Orientierung der Kerne? Ein Wissenschaftler bemerkte hier sehr treffend, daß der einzige „Griff", mit dem sich der Atomkern drehen läßt, sein Magnetmoment sei. Dieser „Griff" freilich ist mit dem Magnetmoment des Atoms insgesamt so starr verbunden, daß er sich nur bewegen läßt, wenn man das ganze Atom mitdreht.

Ein halbes Jahr lang dauerte die Vorbereitung zum Generalangriff auf das „Theta-Tau"-Rätsel. In einem Kryostaten* erstarrten die Kobaltatome, eingefroren bei einer Temperatur in unmittelbarer Nähe des Nullpunkts (—273 °C). Nun konnte die Wärmebewegung das äußere Magnetfeld nicht länger daran hindern, die „Atomparade" zu kommandieren.

Leiterin dieses Versuches war eine amerikanische Wissenschaftlerin, Frau Professor Chien-Chiung Wu.

„Ich erinnere mich", berichtete F. Dyson in der Folgezeit, „wie ich im Oktober 1956 Yang traf und zu ihm sagte: ‚Es wäre doch wirklich großartig, wenn die Versuche von Frau Wu ein vernünftiges Ergebnis hätten.' ‚Ja', erwiderte er, ‚das wäre großartig', und fuhr fort, mir über seine Berechnungen zur Theorie der nichtidealen Gase zu erzählen. Ich glaube, daß selbst er zu jener Zeit nicht ganz einsah, wie großartig das wäre."

Das Experiment von Frau Professor Wu, zu dessen Vorbereitung ein halbes Jahr nötig war, dauerte nur 15 Minuten. Kaum hatten die Physiker die Apparatur eingeschaltet, als sie auch schon begriffen, daß das Postulat von der spiegelbildlichen Symmetrie des Raumes bei schwachen Wechselwirkungen verletzt wird. In Gegenrichtung zum Magnetfeld flogen erheblich mehr Elektronen heraus als in Richtung des Feldes.

Die Reise in das Land hinter dem Spiegel fand nicht statt. Das war eine unerhörte Sache! Die schwache Wechselwirkung unterschied Links von Rechts. Durch die experimentell ermittelte überwiegende Bewegung der Elektronen in einer Richtung wurde ebenso wie durch die Asymmetriemerkmale beim Menschen die Existenz eines spiegelbildli-

* Thermostat für tiefe Temperaturen.

chen Doppelgängers beim β-Zerfall der Atomkerne ausgeschlossen.

Die Aufregung der Physiker war kaum zu beschreiben. Während die Theoretiker versuchten, das erzielte Resultat zu begreifen, gingen die Experimentalphysiker daran, andere mit schwachen Wechselwirkungen verknüpfte Prozesse zu untersuchen, die bisher noch nicht auf ihre „Treue" zum Postulat der spiegelbildlichen Symmetrie überprüft worden waren. Noch glimmte die Hoffnung, daß sich das „ketzerische" Resultat für den β-Zerfall bei anderen Erscheinungen nicht bestätigen würde.

Doch alle Messungen führten zum gleichen Schluß: Bei *starken* Wechselwirkungen steht das Prinzip der spiegelbildlichen Symmetrie unerschütterlich wie ein Fels im Meer, hat jedoch bei *schwachen* Wechselwirkungen keine Gültigkeit.

Die Atomphysik war es, die zum ersten Mal nachgewiesen hatte, daß sich einige Gesetze der Newtonschen Mechanik nur mit Einschränkungen anwenden lassen. Nun war in der Welt der Elementarteilchen gezeigt worden, daß auch das fundamentale Postulat von der Raumsymmetrie nicht universell war, sondern Einschränkungen unterworfen sein mußte.

Wie sollte man sich den Raum jetzt vorstellen?

Waren seine Homogenität und seine Symmetrie nur Illusion? Und wie sollte man dieses Versuchsergebnis mit der Tatsache in Übereinstimmung bringen, daß alle Prozesse in der Welt der Elementarteilchen dem Impulserhaltungssatz gehorchen, der eine unmittelbare Folge der Homogenität des Raumes ist?

Die ersten „Opfer"

Lee und Yang hatten recht. In der Natur existierte nur eine Art von K^+-Mesonen, deren Zerfall gelegentlich dem Gesetz von der Erhaltung der räumlichen Parität nicht gehorchte. Das Prinzip der spiegelbildlichen P-Symmetrie wurde bei schwachen Wechselwirkungen verletzt. Einer schwachen Wechselwirkung ebenso wie anderen spiegelbildlich asymmetrischen Erscheinungen war der Zutritt ins Land hinter dem Spiegel verboten. Doch die Physiker hat-

ten kaum Zeit gefunden, nach der soeben durchgestandenen Erschütterung wieder zu sich zu kommen und die plötzlich aufgetauchten Fragen zu durchdenken, als sie von einer weiteren Neuigkeit überrascht wurden.

Die Experimentalphysiker hatten entdeckt, daß der radioaktive Positronenzerfall eines anderen Kobaltisotops, bei dem das Antiteilchen des Elektrons, also das Positron, aus dem Kern herausfliegt, nicht so abläuft wie der Elektronenzerfall. Die Positronen verlassen den Kern in der Gegenrichtung. Diese neue Mitteilung beeindruckte die Wissenschaftler kaum weniger als die erste. Was war der Grund? Warum sollte der Positronenzerfall der Kerne eigentlich so vonstatten gehen wie der Elektronenzerfall?

Zur Aufregung gab es Grund genug: Auf der vollständigen Übereinstimmung, der Identität dieser beiden Prozesse beruhte eines der grundlegenden Postulate der Elementarteilchenphysik, das Postulat der Ladungssymmetrie oder C-Symmetrie (vom Englischen charge, Ladung).

„Vor etwa vierzig Jahren", schrieb L. Okun, „erschien die Idee der Ladungssymmetrie in den Gleichungen der Physik selbst den Schöpfern der Quantenmechanik seltsam. Doch die gesamte Struktur der Grundgleichungen forderte diese Symmetrie, und die später experimentell nachgewiesenen Antiteilchen bestätigten diese Forderung glänzend."

„Analoge Prozesse unter Beteiligung von Teilchen und Antiteilchen", so verkündet die Theorie, „laufen völlig gleich ab." Doch Theorie hin, Theorie her, die Praxis zeigte den Wissenschaftlern am Beispiel der Elektronen und Positronen, die in analogen radioaktiven Kernzerfallsprozessen entstehen, daß es sich eben nicht so verhält. Bei schwachen Wechselwirkungen existiert weder die spiegelbildliche Symmetrie des Raumes noch die Ladungssymmetrie! „Wie konnte man dann aber eine Annahme zum Postulat erheben, die nicht experimentell geprüft war?" könnte ein Leser fragen.

Hier lag ja gerade der Haken. Dieses Postulat war wiederholt überprüft worden, nur eben nicht für schwache Wechselwirkungen. Ans Tageslicht gekommen, war dieses Paradoxon, das sich den Physikern bis dahin erfolgreich entzogen hatte, lediglich in den Experimenten, bei denen Prozesse mit schwacher Wechselwirkung untersucht wurden.

Während die Verletzung der spiegelbildlichen Symmetrie von allen noch mit ungewöhnlichen Eigenschaften des

Raumes selbst verknüpft wurde und die Teilchen scheinbar unbeteiligt erschienen, berührte die Verletzung der Ladungssymmetrie nun die Eigenschaften der Materie selbst. Das Elektron ist ein Elementarteilchen der gewöhnlichen Materie, das Positron dagegen ein elementarer Baustein der Antimaterie. So warfen diese Versuche zwei riesige Probleme auf. Das eine betraf die Eigenschaften des Raumes, und das andere war offenbar mit dem Unterschied zwischen Teilchen und Antiteilchen verknüpft. Ohne die Lösung beider Probleme war kein einziger Schritt mehr möglich.

Nach einiger Zeit gelang es den Physikern, diese so komplizierte Frage zu beantworten. Stellen Sie sich einmal vor, es gäbe einen ganz ungewöhnlichen Spiegel, den wir als „Ladungsspiegel" oder „C-Spiegel" bezeichnen wollen, in dem die Teilchen wie Antiteilchen aussehen. Elektronen, die beim radioaktiven Kernzerfall emittiert werden, sehen dann in diesem Spiegel nicht wie „gespiegelte Elektronen", sondern wie Positronen aus, die in der gleichen Richtung fliegen wie die Elektronen. So erhalten wir ein reflektiertes Bild — das Spiegelbild eines realen Prozesses — , das jedoch nicht „lebensfähig" in dem Sinne ist, daß es keinem einzigen in der Natur real existierenden Prozeß ähnelt. Dann kommen wir zu dem Schluß, daß der „C-Spiegel" bei schwachen Wechselwirkungen ebenfalls nicht funktioniert.

Etwas Ähnliches haben wir doch früher schon einmal gehabt, als wir den „P-Spiegel" verwendeten. Jenes Spiegelbild hatte einen anderen Mangel: Dort blieben die Elektronen zwar Elektronen, flogen jedoch in Gegenrichtung, d. h. nach der „falschen" Seite. Was wäre denn, wenn man versuchte, diese beiden untauglichen Spiegel gleichzeitig zu benutzen, um dann einmal zu sehen, wie unser Prozeß jetzt aussieht?

In diesem Spiegel nun werden die Elektronen zu Positronen und fliegen in eine Richtung, die für Elektronen zwar „falsch", doch für Positronen völlig gesetzmäßig ist. Darauf haben wir nur gewartet. Das Bild im „CP-Spiegel" ist nun durchaus „lebensfähig" geworden. Jetzt ähnelt es dem real existierenden Prozeß, nämlich dem radioaktiven Positronenzerfall der Atomkerne so, wie ein Wassertropfen dem anderen.

Dieser von dem hervorragenden sowjetischen theoretischen Physiker und Nobelpreisträger L. Landau „erfun-

dene" kombinierte „CP-Spiegel" verändert die Koordinaten der darin reflektierten Prozesse in ihr Gegenteil und verwandelt Teilchen in Antiteilchen. Nach sorgfältiger experimenteller Überprüfung stellte sich heraus, daß dieser Spiegel bei sämtlichen Prozessen einwandfrei funktioniert, darunter insbesondere auch bei Vorgängen mit schwachen Wechselwirkungen.

Was war nun eigentlich geschehen? Früher galten sowohl das Postulat von der spiegelbildlichen Symmetrie des Raumes als auch das Postulat von der Ladungssymmetrie als fundamentale Naturprinzipien. Nun jedoch, nachdem beide Prinzipien diskreditiert waren, sahen sich die Wissenschaftler gezwungen, auf beide Postulate zu verzichten und statt dessen ein neues zu proklamieren. Es war das Postulat der CP-Symmetrie, das sämtlichen Wechselwirkungsarten, darunter auch der schwachen Wechselwirkung, genügt.

Die mit starker Wechselwirkung verknüpften Prozesse, die bei Koordinatenspiegelung und bei Substitution von Teilchen gegen Antiteilchen symmetrisch sind, gehorchen ebenfalls dem Postulat der CP-Symmetrie. Für schwache Wechselwirkungen bedeutete das neue Postulat jedoch, daß bei beliebigen Prozessen dieser Art nicht nur das Vorzeichen der Raumkoordinaten umgekehrt wird, sondern zugleich eine Substitution von Teilchen gegen Antiteilchen erfolgt. Die Natur forderte hier gewissermaßen, daß ein Übergang von dem einen Materietyp zum anderen erfolgt.

Links und Rechts waren mit Materie und Antimaterie verknüpft. Der Unterschied zwischen beiden Richtungen ist kombiniert mit dem Unterschied zwischen Teilchen und Antiteilchen. Das war die Antwort der Wissenschaftler auf diese beiden so schwierigen Probleme, die aus der Lösung des „Theta-Tau"-Rätsels entstanden waren. Leerer Raum bleibt bei Reflexion in einem gewöhnlichen Spiegel ebenso wie bei Reflexion in einem „CP-Spiegel" symmetrisch und homogen. Dort aber, wo die Spiegelsymmetrie bei Ablauf schwacher Wechselwirkungen scheinbar verlorengeht, liegt die Schuld daran nicht beim Raum, sondern bei den Partikeln selbst.

So hat einer der Grundsätze des dialektischen Materialismus, der die Einheit der Eigenschaften des Raumes und der Materie erklärt, in der Physik der Elementarteilchen eine neue konkrete Bestätigung gefunden.

An dieser Stelle wollen wir daran erinnern, daß die

Wissenschaftler bereits in der Mitte des vorigen Jahrhunderts zum ersten Mal auf die Beziehung zwischen den geometrischen — nämlich den räumlichen — und den physikalischen Eigenschaften der Materie aufmerksam geworden sind. Die bedeutendsten Kristallographen konnten sich mit der allgemein bekannten Experimentaltatsache nicht abfinden, wonach einige chemisch identische Stoffe unterschiedliche optische Eigenschaften besaßen. Warum?

Für dieses Problem interessierte sich der junge Louis Pasteur. „Ich kann mir nicht vorstellen", schrieb er, „daß zwei Stoffe einander so sehr ähnlich und doch nicht völlig identisch sein könnten. Kaum hatte ich die Ecole Normale Superieure abgeschlossen, als ich den Entschluß faßte, möglichst viele Kristalle herzustellen, um ihre Form zu studieren." Schon bald stellte Pasteur fest, daß chemisch gleichartige Stoffe aus räumlich verschieden orientierten Kristallen bestehen können.

Die Kristalle waren spiegelbildlich symmetrisch. So stimmten sie doch nicht miteinander überein und besaßen unterschiedliche optische Aktivität. Die Entdeckung der rechts- und linksdrehenden Weinsäure war ein Verdienst Louis Pasteurs und trug dazu bei, daß die Moleküle aus dem Bereich nebelhafter Überlegungen in die höchst konkrete Welt der Geometrie gelangten.

Hier und heute interessiert uns natürlich jener Aspekt dieser Geschichte, daß man damals zum ersten Mal in der Wissenschaft die Abhängigkeit der Materieeigenschaften von der räumlichen Orientierung entdeckte.

Jetzt — 100 Jahre später — war man nicht mehr im Bereich der Makrophysik, sondern bereits in der Welt der Elementarteilchen von neuem auf ein Problem gestoßen, das die Eigenschaften des Raumes und die Eigenschaften der Materie gleichzeitig berührte. Doch das Problem war wesentlich komplizierter, weil nun nicht nur Teilchen, sondern auch Antiteilchen beteiligt waren.

Während Pasteur die Beziehung zwischen den Eigenschaften links- und rechtsorientierter Stoffe (links- und rechtsdrehende Kristalle) entdeckte, gab uns die Welt der Elementarteilchen die einmalige Möglichkeit, die Beziehung zwischen den Eigenschaften rechtsorientierter Materie und linksorientierter Antimaterie zu finden.

Die Astrophysiker bemühen sich, aus der kosmischen Strahlung etwas darüber zu erfahren, ob im interstellaren

Raum Antiwelten existieren. Phantasiebegabte Schriftsteller lassen ihren Helden Sendboten aus der geheimnisvollen Antiwelt begegnen.

Doch bis heute ist unbekannt, ob eine Antiwelt existiert, die unserer Welt völlig analog ist. Durch die Verletzung der Raum- und Ladungssymmetrie jedoch haben die schwachen Wechselwirkungen bereits elementare Materie- und Antimateriebausteine miteinander verknüpft. Die Analogie zwischen dem Postulat der CP-Symmetrie und dem gekoppelten „CP-Spiegel" drängt sich von selbst auf. Nur, was ist das für ein Spiegel? Erinnert er nicht an ein „Fenster in die Antiwelt"?

Ein Neutrino, das in diesen Spiegel schaut, sieht dort ein Antineutrino: eine Partikel ohne Masse und ohne elektrische Ladung, die nur eine mit der Eigenrotation verknüpfte Bewegungsgröße besitzt. In diesem Spiegel wird freilich die Rotationsrichtung des Neutrinos umgekehrt und entspricht damit jener des Antineutrinos. Wie die verzauberte Schöne aus dem Märchen vermag die Partikel niemals, sich selbst im Spiegel zu erblicken.

K-Mesonencocktail

Im August 1964 fanden sich in Dubna bei Moskau Wissenschaftler aus vielen Laboratorien und wissenschaftlichen Instituten der Welt zur traditionellen Internationalen Konferenz für Hochenergiephysik zusammen.

Die Wissenschaftler warten gewöhnlich voller Ungeduld auf diese „Heerschau" der vereinigten theoretischen und experimentellen Waffengattungen. Hier können die neuesten Resultate gemeinsam mit Kollegen aus anderen Ländern beraten werden. Man erfährt Neuigkeiten aus erster Hand, die noch nicht in den Zeitschriften veröffentlicht wurden. Die einen wollten den Schöpfer der Theorie der Quarks, M. Gell-Mann, kennenlernen, der im Zusammenhang mit dem kürzlich entdeckten Ω^--Hyperon den Triumph des „achtfachen Weges" erlebt hatte. Andere hofften, etwas Neues über Neutrinoexperimente zu erfahren.

Doch ausnahmslos alle waren gespannt, weil Gerüchte über eine bevorstehende Mitteilung von Wissenschaftlern aus der Princeton-Universität in den USA umliefen. Gerüch-

te über bevorstehende Sensationen sind meist übertrieben. Diesmal allerdings wurden die Erwartungen der Journalisten ebenso wie die der Fachleute erfüllt. Dabei hatte eigentlich nichts auf eine Sensation hingedeutet. Die Jahre, die seit der Entdeckung der Verletzung des Paritätserhaltungssatzes vergangen waren, hatten die Physiker immer mehr von der Lebensfähigkeit der neuen Vorstellungen über die Eigenschaften von Raum, Materie und Antimaterie überzeugt. In dieser ruhigen und — wie es den Anschein hatte — günstigen Situation hatten die Physiker das Jahr 1964 begonnen. Niemand erwartete, daß ausgerechnet in diesem Jahr in den sorgfältig gehegten „Blumenrabatten" der experimentellen Ergebnisse plötzlich ein stachliger wilder Trieb emporschießen würde, eine neue Komplikation, nämlich die Verletzung des Postulats der CP-Symmetrie.

Der Vortrag der amerikanischen Wissenschaftler über ein neues Experiment mit neutralen K-Mesonen hinterließ einen denkbar starken Eindruck. Die „seltsamen" Partikeln hatten wiederum ein „Attentat" auf die Grundlagen der modernen Quantentheorie unternommen.

Zu diesem Problem bemerkte der Direktor des Laboratoriums für hohe Energie im Vereinigten Institut für Kernforschung, daß der Versuch der amerikanischen Forscher „ein Maximum an Information geliefert hat, da er unsere Grundvorstellungen veränderte. Der hier gefundene Effekt fällt so sehr aus dem Rahmen der modernen Theorie, daß man seine Entdeckung als Hauptereignis in der Physik während der letzten Jahre bezeichnen darf."

Was hatten die Wissenschaftler nun gefunden? Ehe wir darauf eingehen, wollen wir zunächst das neutrale K-Meson ein wenig näher kennenlernen. Diese Partikel gehört zu den erstaunlichsten Objekten in der Mikrowelt und kann zu recht als Chamäleon in der Welt der Elementarteilchen bezeichnet werden.

Wir nehmen ein Meßgerät, das nur auf diese Partikel anspricht, und installieren es direkt am Ausgang aus einem Beschleuniger. Nach einigen Stunden angestrengter Messungen werden wir dann erfahren, daß die K^0-Mesonen eine Lebensdauer von nur 10^{-10} s haben und danach in zwei π-Mesonen zerfallen.

Wenn wir das Meßgerät 20 m von seinem ursprünglichen Aufstellungsplatz wegrücken, dürfte es offenbar nichts anzeigen. Im Verlauf ihrer verschwindend kleinen Lebens-

dauer, die die K°-Mesonen haben, können sie selbst bei Lichtgeschwindigkeit nur einige Zentimeter zurücklegen, um dann unter Zerfall in zwei π-Mesonen „zugrunde" zu gehen.

Doch das Meßgerät zählt weiter neutrale Mesonen, deren Lebensdauer nun bereits 600fach größer ist, da sie ja Zeit finden, das Gerät zu erreichen. Zu allem Überfluß zerfallen diese langlebigen Mesonen nicht in zwei, sondern in drei π-Mesonen. Demnach besteht der beim Zusammenprall hochenergiereicher Protonen mit dem Target erzeugte Partikelnstrom aus neutralen K-Mesonen zweier Arten.

Aber das ist noch lange nicht alles. Der Experimentator braucht vor dem Zähler, der diese langlebigen K-Mesonen zählt, nur irgendeinen Gegenstand liegenzulassen, damit ein „Wunder" geschieht: Das Meßgerät beginnt aufs neue, kurzlebige K-Mesonen zu registrieren. Ebenso wie jene Mesonen, die unmittelbar am Ausgang des Beschleunigers registriert wurden, zerfallen auch diese in zwei π-Mesonen!

Das Wunder findet eine einfache Erklärung. Wie sich zeigt, verwandeln sich die langlebigen Mesonen beim Zusammenprall mit Materie in kurzlebige. Derartige Eigenschaften besitzt keine einzige unter den uns bekannten Partikeln. Niemals verändern Neutronen, Protonen oder π-Mesonen ihre Eigenschaften beim Zusammenstoß mit Materie.

In der Tabelle der Elementarteilchen beansprucht jeder Bewohner der Mikrowelt höchstens zwei Zeilen. In der ersten Zeile steht das betreffende Teilchen, in der zweiten sein Antiteilchen. Nur den neutralen K-Mesonen ist es gelungen, sich auf vier Zeilen „breit"zumachen!

Die erste Zeile beansprucht ganz ordnungsgemäß das K°-Meson, die zweite Zeile dagegen das Anti-K°-Meson. In der dritten Zeile finden wir das uns bereits bekannte kurzlebige K°-Meson und in der vierten schließlich das langlebige K°-Meson.

Obwohl sich die Experimentatoren alle Mühe gaben, waren sie nicht imstande, das Anti-K°-Meson in der Natur nachzuweisen. Das allein wäre gar nicht so erstaunlich gewesen. Auch das Photon hat kein Antiteilchen, ebensowenig wie das neutrale π-Meson. Diese Partikeln müssen auch der Theorie nach mit ihren „Antiverwandten" völlig identisch sein.

Als jedoch Gell-Mann seine Klassifikation der Elementarteilchen schuf, kam er zu dem Ergebnis, daß die K°-Me-

sonen sich doch von den Anti-K°-Mesonen unterscheiden müßten. Fermi hatte sofort erkannt, daß „die Geschichte einen Haken haben mußte", und Gell-Mann gefragt: „Wie können Sie sich denn ein K°- und ein Anti-K°-Meson verschieden vorstellen, wenn beide auf nicht unterscheidbarem Wege zerfallen?"

„Wie heute klar ist", schreibt B. Pontecorvo in seinen Erinnerungen, „liegt in diesen Worten die weitreichende Erkenntnis verborgen, daß die neutralen K-Mesonen mit dualen Eigenschaften ausgestattet sein müßten."

Eine Begegnung zwischen Partikel und Antipartikel findet äußerst selten statt. Nur ein sehr geringer Anteil von Protonen oder Elektronen trifft einmal auf seine Anti-Doppelgänger. Dies erklärt sich daraus, daß Materie und Antimaterie im Raum stets voneinander getrennt sind. Nur im Augenblick ihrer ersten (und letzten) Begegnung bilden einige Partikeln und Antipartikeln für kurze Zeit ein gekoppeltes System. So finden etwa das Elektron und das Positron in der kurzen Zeit vor ihrer Annihilierung in Gestalt eines Atoms, des Positroniums, die Möglichkeit, den Wissenschaftlern bei der Lösung bestimmter chemischer Probleme behilflich zu sein.

Doch Anti-K°-Mesonen gab es nirgends. Weder in der kosmischen Strahlung noch unter den Partikeln, die im Beschleuniger entstanden, waren sie aufzufinden. Sie müssen trotzdem existieren — beharrte die Theorie. So folgte ein Versuch auf den anderen, die Erkundungen wurden mit aller Hartnäckigkeit fortgesetzt. Das dauerte so lange, bis die Physiker plötzlich begriffen, daß es im Grunde genommen gar nichts zu suchen gab. Alles war ganz einfach und zugleich phantastisch ungewöhnlich.

Die schwachen Wechselwirkungen hatten Welt und Antiwelt gewissermaßen „zusammengerückt". Sie hatten z. B. die Verletzung der spiegelbildlichen Symmetrie des Raumes mit dem Unterschied zwischen Teilchen und Antiteilchen hinsichtlich der elektrischen Ladung verknüpft. Bei den neutralen K-Mesonen koexistieren Welt und Antiwelt Seite an Seite bis zu ihrem Zerfall. Sie stellen nichts anderes dar, als ein Gemisch von Teilchen und Antiteilchen. Zu allem Überfluß handelt es sich dabei nicht nur um ein Gemisch, sondern um zwei verschiedene Gemische, zwei streng definierte, im Gleichgewicht befindliche Zustände mit bestimmter Masse, konstanter Lebensdauer sowie mit

noch anderen Eigenschaften. Einem dieser beiden Gemische hatten die Wissenschaftler den Namen „kurzlebige neutrale K-Mesonen", dem anderen dagegen die Bezeichnung „langlebige neutrale K-Mesonen" gegeben.

Diese beiden „Cocktails" — von der Natur mit großer Sorgfalt aus zwei gleichartigen Komponenten zubereitet — demonstrierten die Nichtübereinstimmung mit dem Prinzip der CP-Symmetrie.

Das Ein-Mann-Theater

Worin bestand nun die sensationelle Mitteilung, die in Dubna während der Internationalen Konferenz bekannt wurde?

Wir erinnern uns, daß an der Princeton-Universität die amerikanischen Physiker Christenson, Cronin, Fitch und Turley die Eigenschaften der im Beschleuniger entstehenden langlebigen K-Mesonen untersucht hatten. Das Nachweisgerät war in einem Abstand von 20 m vom Ausgang des Mesonenkanals installiert, um jede Störung durch schnellzerfallende kurzlebige K-Mesonen zu vermeiden.

Während ihrer Arbeit wurden sie darauf aufmerksam, daß die langlebigen Kaonen* — sehr selten zwar (nur einmal auf je 500 gewöhnliche Zerfallsvorgänge) — das aus dem Postulat der CP-Symmetrie folgende Verbot verletzten und in zwei Pionen zerfielen. Nach den „geltenden Gesetzen" hatten sie dazu „kein Recht". Trotzdem entdeckten die amerikanischen Physiker ausgerechnet diese Zerfallsvorgänge. Funktionierte demnach auch der „CP-Spiegel" nicht?

Hier kommt wieder eine Nichtäquivalenz zwischen Rechts und Links zutage, die sich freilich nicht länger durch den Unterschied zwischen Teilchen und Antiteilchen erklären läßt.

Die Wissenschaftler nahmen diese Entdeckung recht unterschiedlich auf. Die Skeptiker vermuteten einen Meßfehler oder einen Fehler bei Auswertung der Ergebnisse. Andere beriefen sich darauf, daß das Experiment nicht im

---

* K-Mesonen werden häufig auch als Kaonen, π-Mesonen als Pionen, μ-Mesonen als Myonen bezeichnet.

Vakuum, sondern in Luft stattfand und die Mesonen auf der letzten Etappe ihres Weges auch noch eine Stahlflasche mit Helium passieren mußten. Für ein neutrales Kaon ist jedoch eine Begegnung mit jeder beliebigen Materie „kriminell": Beim Zusammenprall mit Materie werden die „Kaonencocktails" so stark durchgeschüttelt, daß sich das langlebige Gemisch aus Teilchen und Antiteilchen in ein kurzlebiges verwandelt und nunmehr „gesetzmäßig" in zwei Pionen zerfällt.

Solche „Anschuldigungen" waren natürlich ernst zu nehmen; eine sorgfältige Überprüfung setzte ein. Die Experimentalphysiker aus Princeton unternahmen einen besonderen Kontrollversuch, aus dem hervorging, daß die genannten Umwandlungen langlebiger K-Mesonen etwa um den Faktor 10^{-6} seltener stattfinden als die früher registrierten verbotenen Zerfallsvorgänge. Nach kurzer Zeit bestätigten auch Messungen, die von verschiedenen Wissenschaftlergruppen und nach einer gänzlich anderen experimentellen Methodik unternommen wurden, diese Tatsache. Die letzten Zweifler konnten nun nicht länger umhin, die beobachtete Erscheinung als gesichert zu akzeptieren.

Diese merkwürdige Entdeckung hatte die Wissenschaftler wieder an jenen Punkt zurückgeworfen, an dem sie schon einmal gestanden hatten. Warum besaß der homogene Raum bei schwachen Wechselwirkungen keine spiegelbildliche Symmetrie? Hier mußte etwas geschehen. Wie Kriminalbeamte auf der Verbrecherjagd gingen die Wissenschaftler daran, unter den „Bürgern" der Mikrowelt andere „verdächtige Personen" ausfindig zu machen, die sich ebenso verhielten wie neutrale K-Mesonen. Zerfallsvorgänge von Hyperonen und Mesonen, der Kernzerfall und Kernreaktionen wurden bis in die letzte Einzelheit überprüft. Doch nirgends — bei keiner einzigen Erscheinung! — gelang es, eine Verletzung des Postulats der CP-Symmetrie zu entdecken. Die neutralen K-Mesonen waren „Einzeltäter".

In dieser Beziehung unterschied sich die Situation ganz entscheidend von jener, die man bei der Entdeckung der Verletzung der spiegelbildlichen Symmetrie vorgefunden hatte. Damals hatten die Experimente mit positiv geladenen K-Mesonen als Signal für die Lüftung des Schleiers gedient, hinter dem sich eine große Gruppe von „Verschwörern" gegen den Paritätserhaltungssatz verbarg. Es waren die

Prozesse, die bei schwacher Wechselwirkung zwischen den Elementarteilchen ablaufen.

Diesmal aber fand man hinter dem Vorhang nur einen einzigen „Darsteller", das langlebige neutrale K-Meson, das nicht einmal den Regieanweisungen der CP-Symmetrie gehorchte. Die schwachen Wechselwirkungen dagegen waren zwar „mitschuldig", doch nur in bezug auf die Zubereitung des „Kaonencocktails", jenes Gemisches aus Teilchen und Antiteilchen.

Sollte man den Individualismus dieses einzigen „Bürgers" der Mikrowelt von der humorvollen Seite auffassen? Vielleicht hatte Akademiemitglied I. Tamm mit seiner Annahme recht, daß die Geschichte im Zusammenhang mit dem langlebigen K-Meson an die bekannte Story erinnert, die sich mit dem Neutrino und dem Energieerhaltungssatz abgespielt hat? Sollte die CP-Symmetrie im Endeffekt unerschüttert bestehenbleiben?

Den Physikern ist allerdings nicht nach Lachen zumute, und nicht etwa, weil sie keinen Humor hätten. Die Zeit läuft, und der „Trick" des großen Zauberkünstlers K-Meson ist noch immer nicht enthüllt. Dabei läßt er manches ahnen. Was will uns das K^0-Meson zuflüstern?

Um das fundamentale Prinzip der räumlichen Symmetrie zu retten, schoben die Physiker zunächst einmal alles auf äußere Fernwirkungskräfte, deren Ursprung Erde, Sonne oder die Milchstraße sein konnten. Die Experimente widersprachen jedoch dieser Hypothese, und so mußte man sie fallenlassen.

Es gibt auch einen anderen Gedanken, der gegenwärtig überprüft wird. Was wäre, wenn der ungewöhnliche Zerfall des neutralen Kaons von hypothetischen ultraschwachen Wechselwirkungen hervorgerufen wird?

Wie dem auch sei, die Frage, warum langlebige K-Mesonen in zwei π-Mesonen zerfallen, bleibt die Kardinalfrage der modernen Physik.

„Das Wesen dieser Erscheinung ist unverständlich", sagte dazu das Korrespondierende Mitglied der Akademie der Wissenschaften der UdSSR, F. Schapiro. „Doch diese Erscheinung beinhaltet eine so radikale Änderung unserer Ansichten, daß ich glaube, hieraus werden sich irgendwann einmal weitreichende Folgen für das Gesamtgebäude der Physik ergeben."

Das verlorene Paradies

Die „seltsamen" positiv geladenen K-Mesonen hatten als erste die Gefahr für das fundamentale Prinzip der räumlichen Symmetrie signalisiert. Diese Gefahr konnte abgeschwächt werden, indem man das „Ultimatum" der schwachen Wechselwirkungen akzeptierte, das darin bestand, bei Spiegelung die Teilchen durch Antiteilchen zu ersetzen.

Schon die Verletzung der räumlichen Symmetrie in einem Fall und der Ladungssymmetrie im anderen unter dem Einfluß schwacher Wechselwirkungen empfanden die Physiker als schmerzlich. Doch die gleichzeitige Verletzung sowohl der C- als auch der P-Symmetrie rüttelte nun bereits an den Grundfesten der Physik.

Jede Gleichung der Quantenmechanik ist nicht nur in bezug auf die Vorzeichenänderung sämtlicher Koordinaten (P-Symmetrie) oder in bezug auf die Substitution von Teilchen gegen Antiteilchen (C-Symmetrie) symmetrisch, sondern auch in bezug auf die Richtungsänderung des Zeitverlaufs, d. h. in bezug auf eine sogenannte Inversion in der Zeit.

Die zeitliche oder T-Symmetrie (vom Englischen time, Zeit) postuliert die „ewige Jugend" der Prozesse in der Mikrowelt. Sie bedeutet das Fehlen des „Zeitpfeils", wie man die Richtung des Zeitverlaufs in der Makrowelt poetisch bezeichnet. Der Begriff „Alterung" läßt sich auf die Welt der Elementarteilchen nicht anwenden. Hier gibt es nur die völlige Gleichberechtigung beider Richtungen der Prozesse.

Wir mußten diesen Sachverhalt hier nochmals darlegen, weil der modernen Quantentheorie der Elementarteilchen das CPT-Theorem zugrunde liegt. Sein Sinn besteht darin, daß alle Prozesse dem Prinzip der räumlichen (P-), ladungsmäßigen (C-) und zeitlichen (T-)Symmetrie zugleich gehorchen müssen. Mit anderen Worten, jede Erscheinung in der Mikrowelt muß sich bei gedachter Reflexion im Spiegel, bei Ersatz der Teilchen durch Antiteilchen und bei Vertauschung von End- und Anfangszustand, d. h. bei Veränderung der Zeitrichtung, in eine Erscheinung verwandeln, die ebenfalls in der Natur real existiert.

Bis zu den Versuchen mit K-Mesonen hatte niemand

daran gezweifelt, daß alle drei Symmetrietypen sowohl gemeinsam als auch einzeln strenge Naturgesetze sind. Die ersten beiden hatten ihre Universalität bereits verloren. Wozu konnte das führen?

Wird die CP-Symmetrie verletzt und bleibt die T-Symmetrie erhalten, dann bricht das CPT-Theorem insgesamt zusammen. Es kann — so seltsam das klingen mag — nur dann in Kraft bleiben, wenn die CP-Symmetrie und die T-Symmetrie zugleich verletzt werden.

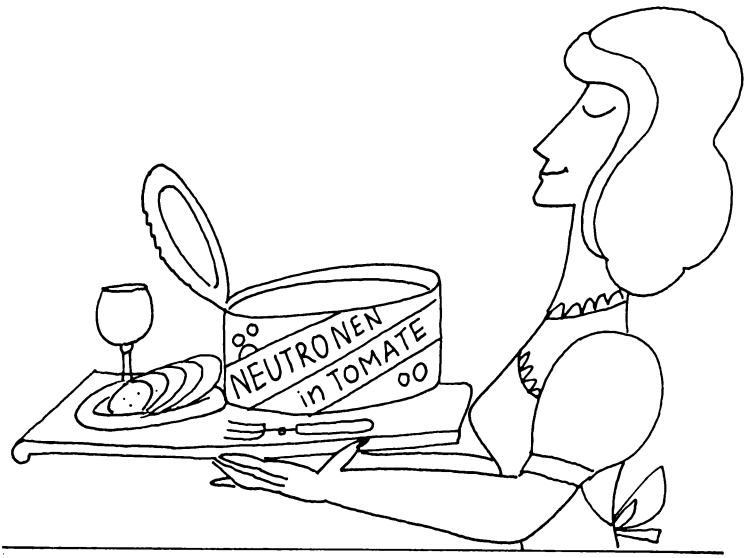
So ließen die Physiker nach dem Verlust zweier Fundamentalgesetze nun auch das dritte „freiwillig" fallen. Mehr noch, sie bemühen sich um den Beweis der Verletzung dieses dritten Fundamentalgesetzes, um die Grundlagen der Theorie zu retten. Hat die Zeit „Gewalt" über die Mikrowelt?

Diese Frage ist hier wesentlich schwieriger zu klären als in der Makrowelt. Die T-Symmetrie verbietet gewisse physikalische Erscheinungen. Beispielsweise dürfen die Elementarteilchen kein elektrisches Dipolmoment besitzen. Um diesen Sachverhalt zu erläutern, wollen wir uns vorstellen, daß das Neutron aus einer positiven und einer negativen Ladung bestünde, deren Ladungsschwerpunkte nicht zusammenfallen, sondern „auseinandergerückt" sind. Daraus bildete sich dann ein elektrisches Dipolmoment. Sind Kernprozesse umkehrbar, müßte dieses Moment beim Neutron gleich Null sein.

Im Dubnaer Laboratorium für Neutronenphysik bemühen sich die Wissenschaftler bereits seit langem, in das Geheimnis des elektrischen Dipolmoments der Partikeln einzudringen. Bei allen bisherigen Experimenten konnte es nicht entdeckt werden. Allerdings ist auch die Aussage, daß dieses Moment gleich Null sei, vorläufig absolut unmöglich, weil die Versuchsgenauigkeit noch nicht ausreicht. Die Neutronen durcheilen den Meßraum der Anlage so schnell, daß nur eine sehr geringe Zahl von ihnen während dieser Zeit zerfällt. Selbst die langsamen oder thermischen Neutronen haben eine Geschwindigkeit von 2 km/s. Die „Neutronenböe" passiert das Nachweisgerät in verschwindend kleinen Bruchteilen einer Sekunde, während es für die Messung des Dipolmomentes äußerst wichtig ist, daß sich das Neutron möglichst lange im Blickfeld der Beobachter, also „in den Händen der Experimentatoren" befindet. Innerhalb dieser Zeit muß ja sein Verhalten unter

dem Einfluß elektrischer und magnetischer Felder untersucht werden.

So entstand gewissermaßen ein Bedarf an wesentlich langsameren Neutronen, als es die thermischen Neutronen sind. Genau diese ultrakalten Neutronen mit einer Geschwindigkeit von nur wenigen Metern in der Sekunde findet man unter den Partikeln, die aus einem Kernreaktor herausfliegen. Leider sind es sehr wenige: Auf 10^{11} Neutronen entfällt insgesamt nur ein einziges ultrakaltes Neutron.



Wenn es gelänge, diese Neutronen einzusammeln und zu konservieren, dann könnte das Dipolmoment mit hoher Genauigkeit gemessen werden.

Diese, wie man glauben konnte, so phantastische Idee war praktisch realisierbar. Vor etwa 20 Jahren hatten der italienische Wissenschaftler E. Fermi und der sowjetische theoretische Physiker I. Pomerantschuk gezeigt, daß ultrakalte Neutronen an der Oberfläche bestimmter Stoffe einer Totalreflexion ausgesetzt sein müssen.

10 Jahre später wies Akademiemitglied J. Seldowitsch theoretisch nach, daß es unter Benutzung dieser Reflexionseigenschaft gelingen müßte, die ultrakalten Neutronen aus

dem Reaktor „herauszufischen“ und in einem Spezialgefäß zu akkumulieren, wobei ihre Anzahl am Ende bis zu $10^8/m^3$ betragen könnte!

Das war kaum zu glauben; schließlich sind Neutronen Teilchen mit recht großer Durchdringungskraft. Hier wurde nun vorhergesagt, daß sie nicht imstande sein sollten, einem Gefäß aus feinster Kupferfolie zu entschlüpfen.

Das ungewöhnliche Verhalten ultrakalter Neutronen erklärt sich aus ihren Welleneigenschaften. Die zugeordnete Wellenlänge dieser Partikeln ist gleich 10^{-7} m. In der Mikrowelt nimmt sie sich damit wie Gulliver unter den Atomliliputanern aus. Beim Auftreffen auf die Materieoberfläche muß diese Welle daher gleichzeitig mit einer großen Zahl von Kernen der Kupferatome in Wechselwirkung treten. Obwohl hier die Wechselwirkungsenergie sehr klein ist, liegt sie doch in der gleichen Größenordnung wie die Energie der ultrakalten Neutronen. Das ist der Grund, warum die ersten Atomkernschichten der Folie auf dem Weg der ultrakalten Neutronenwelle eine unüberwindliche energetische Barriere darstellen.

Eine Wissenschaftlergruppe des Laboratoriums für Neutronenphysik war im Vereinigten Institut für Kernforschung unter der Leitung von F. Schapiro an die Produktion von „Neutronenkonserven“ gegangen. Ihre Aufgabenstellung war ganz „einfach“: Sie mußten aus einem Heuhaufen die Stecknadeln heraussuchen, oder mit anderen Worten, unter einigen 100 Mrd. Neutronen die ultrakalten auffinden und herausholen.

Die Experimentatoren brachten dafür in den Neutronenstrom, der einen Atomreaktor verließ, ein Kupferrohr, das an der dem Reaktor abgewandten Seite abgewinkelt war. Die mit ungeheuer großer Geschwindigkeit dahinfliegenden thermischen Neutronen durchdrangen die Wände des Rohres an der Knickstelle und rasten weiter. Die ultrakalten Neutronen dagegen konnten, nachdem sie einmal in das Rohr gelangt waren, dieses nicht mehr verlassen und wurden so „gefangengenommen“. Wie Fliegen in einer Glasflasche stießen sie an die Wände, wurden zurückgeworfen und „krochen“ auf diese Weise das Rohr entlang.

Die Experimentatoren erfuhren davon, indem sie am abgewinkelten Rohrende einen Zähler anbrachten. Dieser Zähler registrierte Neutronen, die sich etwa 200 s lang im Rohr befunden hatten!

Sobald die Wissenschaftler gelernt haben werden, „Konserven" einer hinreichend großen Anzahl von Neutronen zu „fabrizieren", werden sie auch imstande sein, das Dipolmoment der Neutronen mit großer Genauigkeit zu messen.

In einigen Dutzend Laboratorien auf der ganzen Welt werden Versuche zur Feststellung von Verletzungen der zeitlichen Symmetrie angestellt. Die endgültige Antwort steht jedoch vorläufig noch aus.

Lassen wir einmal unsere Phantasie schweifen und nehmen wir an, die Verletzung des Prinzips der T-Symmetrie wäre entdeckt. Das CPT-Theorem ist dann zwar gerettet, doch um welchen Preis! Dann käme ja wieder die Nichtäquivalenz von Teilchen und Antiteilchen an die Oberfläche, die ganze unverständliche Nichtäquivalenz von Rechts und Links und die Nichtäquivalenz von Richtung und Gegenrichtung in der Zeit. Man müßte zugeben, daß es auch in der Mikrowelt einen „Sündenfall" gegeben hat, der zu den gleichen Asymmetrien führte, an die wir uns in der Makrowelt längst gewöhnt haben.

In der Welt, die unseren Sinnesorganen zugänglich ist, treffen wir laufend auf Gegenstände, die keine spiegelbildliche Symmetrie zeigen. Da braucht man nicht lange nach Beweisen zu suchen: Unser eigenes Spiegelbild ähnelt uns nur, ist aber nicht identisch.

Wir bestehen aus Protonen, Neutronen und Elektronen. In unserer Umgebung gibt es nichts, das aus Antiprotonen, Antineutronen und Positronen aufgebaut wäre. Die Ladungsasymmetrie der Makrowelt liegt auf der Hand. Über die Zeit braucht man nur ein einziges Wort zu verlieren: Ihr Pfeil zeigt immer nur vorwärts.

Worin eigentlich liegt denn nun der Sinn dieser mit Hilfe der Hochenergiephysik entdeckten Ähnlichkeit der Asymmetrie unserer gewohnten Welt und der Welt superkleiner Maßstäbe? Welche Beziehung besteht zwischen der Verletzung der CPT-Symmetrie in der Makro- und in der Mikrowelt? Entsprechen denn die CPT-Symmetrien der Mikrowelt den CPT-Symmetrien der Makrowelt?

Beide Fragen, so sagen die Wissenschaftler, führen den Fragesteller in die Tiefen der Kosmologie. Sowohl die ladungsmäßige als die zeitliche Asymmetrie der uns umgebenden Welt sind Folgen besonderer „Anfangs"-Bedingungen, die vor ungefähr 10^{10} Jahren im Weltall geherrscht haben.

Sind diese lächerlich geringfügigen Abweichungen, also die Störung der räumlichen und spiegelbildlichen Symmetrie bei schwachen Wechselwirkungen, die Untauglichkeit des „CP-Spiegels" für eine kleine Zahl von Zerfallsvorgängen bei neutralen K-Mesonen vor dem Hintergrund jener Kräfte, die die Nukleonen in den Kernen festhalten und denen die überwältigende Mehrzahl der kleinsten Materiebausteine gehorcht, wirklich so wichtig? Warum untersuchen die Physiker mit solchem Eifer ausgerechnet diese geringfügigen Symmetriestörungen in der Mikrowelt?

„Ja einfach deshalb", sagte Dr. D. Frank-Kamenezki, „weil es in der Wissenschaft keine ‚Kleinigkeiten' gibt. Die Wissenschaft ist verpflichtet, alles bis zum Schluß zu erklären, und jede noch so unverständliche Erscheinung kann einen ganzen Ozean unbekannter Dinge verbergen. Ein winziger schwarzer Fleck auf einer fotografischen Platte, die zufällig neben einem Uranpräparat gelegen hatte, war der Vorläufer der gesamten Kernphysik und -technik."

Die Physiker haben bereits den Eindruck gewonnen, daß die Welt in ihren allgemeinen Zügen einfach, in den Einzelheiten dagegen sehr kompliziert ist. Das „bösartigste" Symptom der Kompliziertheit aber ist die Verletzung der Symmetrie. Alles Einfache ist symmetrisch.

Wie sich die hier berichteten Tatbestände einmal endgültig im modernen Verständnis der Mikrowelt widerspiegeln werden, ist vorläufig unbekannt. Diese Feststellung trifft auch auf das dritte Rätsel zu, das erst am Anfang seiner Geschichte steht. Gemeint ist das neue, von den Physikern gerade erst entdeckte „$K^0_2 \rightarrow 2\mu$-Rätsel", das uns, wie man leicht sieht, wieder einmal von den sattsam bekannten K-Mesonen aufgegeben wurde.

Eine Gruppe amerikanischer Wissenschaftler aus der Universität von Californien untersuchte am Bevatron* des Lawrence-Strahlungslabors den Zerfall langlebiger neutraler schwerer Mesonen. Der Theorie zufolge, die auf einfachsten und scheinbar gesicherten Annahmen beruhte, mußte sich mindestens eines von $15 \cdot 10^7$ in der Anlage registrierten schweren Mesonen in ein Paar leichter Partikeln, nämlich in μ-Mesonen mit positiver und negativer elektrischer Ladung, umwandeln. Die Experimentatoren stellten jedoch

* Bevatron enthält die Abkürzung Billion Elektronenvolt, wobei im Amerikanischen 1 Billion eV nur $1 \cdot 10^9$ eV bedeutet.

fest, daß die Wahrscheinlichkeit dieses Prozesses allenfalls ein Drittel des oben angeführten Wertes beträgt. Was bedeutet das?

Genau diese Frage stellten sich in seltener Einmütigkeit viele Physiker, als sie aus der Zeitschrift „Physical Review Letters" von den sensationellen Versuchsergebnissen am Bevatron erfuhren.

Die Antwort steht vorläufig leider noch aus. Möglicherweise ist das „$K^0_2 \longrightarrow 2\,\mu$-Rätsel" überhaupt kein Paradoxon, sondern nur ein neuer Effekt, in dem sich die Störung der CP-Symmetrie bemerkbar macht. Als Beweis dafür könnte die Entdeckung des Zerfalls kurzlebiger neutraler K-Mesonen in zwei leichte geladene Partikeln dienen.

„Doch wenn man derartige Zerfallsvorgänge im Versuch nicht nachweist", meinte das Korrespondierende Mitglied der Akademie der Wissenschaften der UdSSR, A. Baldin, „dann wird die Katastrophe nur verschlimmert. Gegenwärtig ist dies das brennendste Problem in der Physik der Elementarteilchen."

Am CERN-Beschleuniger wurde bereits ein Experiment unternommen, in dessen Verlauf bei $4 \cdot 10^7$ Zerfallsvorgängen von kurzlebigen K-Mesonen kein einziger Zerfall in zwei μ-Mesonen festgestellt wurde.

Gewisse zusätzliche theoretische Überlegungen könnten das Ausbleiben eines derartigen Prozesses mit einer Wahrscheinlichkeit in der Größenordnung von 10^{-7} noch halbwegs rechtfertigen. Doch sollte dieser Zerfall noch seltener stattfinden, dann muß dies offenbar neue „Opfer" in den Reihen der fundamentalen Naturprinzipien zur Folge haben.

An der Lösung des „$K^0_2 \longrightarrow 2\,\mu$-Rätsels" beteiligten sich die besten Experimentatoren. Mit Hilfe der Beschleuniger in Brookhaven, in Berkeley sowie in den Argonne-Nationallaboratorien der USA arbeiten die Wissenschaftler an der Erforschung des Zerfalls langlebiger und kurzlebiger schwerer Mesonen.

Eine Gruppe von Wissenschaftlern unter der Leitung des Kandidaten der physikalisch-mathematischen Wissenschaften, I. Sawin, aus dem Hochenergielaboratorium des Vereinigten Instituts für Kernforschung bereitet gegenwärtig ebenfalls einen Angriff auf den neuen „Gipfel" vor, der sich dem Blick der Physiker erschlossen hat.

Große Hoffnungen

Konflikt oder gegenseitiges Verständnis?

„Ich glaube, daß eine neue Entdeckung vergleichbar der Newtonschen Dynamik oder der Quantenmechanik kaum früher als in 100 Jahren gemacht werden wird", schrieb 1958 F. Dyson. „Meine Ansicht besteht darin, daß wir vom Verständnis der Natur der Elementarteilchen ebensoweit entfernt sind, wie Newtons Nachfolger von der Quantenmechanik entfernt waren. Es könnte durchaus geschehen, daß eines Tages alle Versuche gemacht sein werden, die an Beschleunigern durch Zusammenstoß verschiedener Partikeln möglich sind, alle derartigen Versuche, die man sich nur denken kann; alle Ergebnisse werden sorgfältig protokolliert und gesammelt sein, und trotzdem werden wir keinerlei Begriff davon haben, was eigentlich geschieht."

Demgegenüber steht die optimistischere Auffassung des Nobelpreisträgers und Akademiemitglieds I. Tamm aus dem Jahre 1966: „Ich stimme nicht mit dem amerikanischen Theoretiker F. Dyson überein. Die Schwierigkeiten für die Entwicklung einer neuen Theorie, die alles das, was wir bis heute wissen, als Spezialfall enthalten muß, sind offensichtlich. Trotzdem berücksichtigt F. Dyson das exponentielle Wachstum der Wissenschaft in unserer Zeit nicht, und er läßt auch unberücksichtigt, daß sich eine immer größere Zahl von Menschen mit Physik beschäftigt. Einstein war eine seltene Ausnahmeerscheinung, doch vor dem Hintergrund der außerordentlich gestiegenen Anzahl von Fachleuten ist das Auftauchen eines neuen Genies wesentlich wahrscheinlicher geworden."

Anfang 1971 vertrat Akademiemitglied W. Ginsburg während eines Seminars im Physikalischen Institut der Akademie der Wissenschaften der UdSSR folgende Auffassung: „Es ist nicht angebracht, im Bereich der Theorie von irgendeinem echten Erfolg zu sprechen, diesen Ein-

druck habe ich wenigstens. So liegen die Dinge nun schon seit einigen Jahrzehnten, und niemand kann vorhersagen, wann ‚das Eis' denn nun endlich bricht. Irgendwann einmal wird dies freilich gewiß geschehen, und ungeachtet aller Enttäuschungen fahren wir fort, in nicht erlahmender Anspannung und Aufmerksamkeit dieses historische Ereignis zu erwarten."

Diese offenherzigen Äußerungen hervorragender Physiker führen uns zu dem sehr wichtigen und schwierigen Problem der Entwicklung einer Theorie der Elementarteilchen.

Leider behalten heute wie auch vor einigen Jahren Robert Oppenheimers Worte ihre Gültigkeit, wonach „wir weder die Natur der Materie noch die Gesetze, die sie lenken, oder die Sprache verstehen, in der sie zu beschreiben wären".

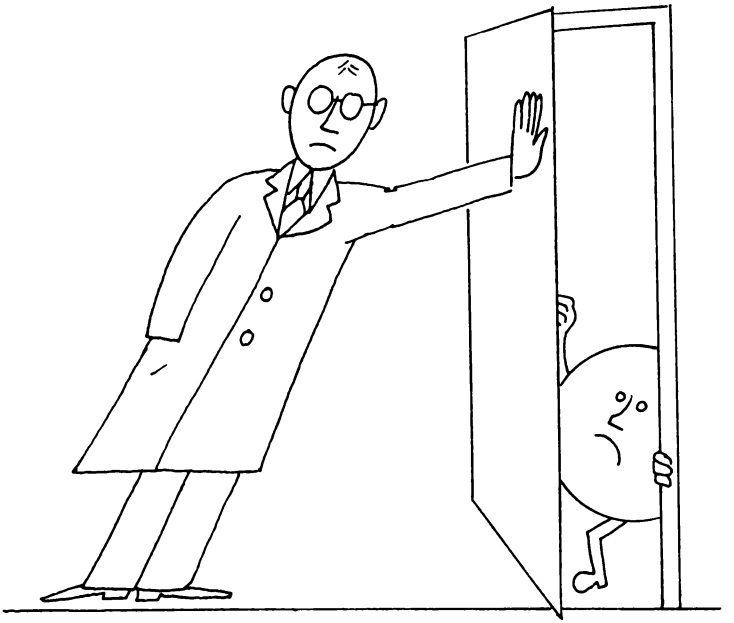
Es ist für niemanden ein Geheimnis, daß die Wissenschaft seit den Tagen, als die ersten Partikeln entdeckt wurden, einen bedeutenden Sprung nach vorn gemacht hat. „Bewaffnet" mit gigantischen Beschleunigern, dringen die Forscher heute in die verstecktesten und am besten geschützten Bereiche der Erscheinungen ein. Über die Eigenschaften der Elementarteilchen werden bereits populärwissenschaftliche Bücher verfaßt, darüber, wie es gelang, für viele „Bürger" der Mikrowelt eine einheitliche Klassifikation zu schaffen. Neue Naturgesetze wurden entdeckt, z. B. das Gesetz von der Erhaltung der Baryonenzahl. Es ist jenes Gesetz, dem wir unsere Existenz verdanken. Es verbietet den Protonen und Neutronen den Zerfall in leichtere Partikeln. Die μ- und π-Mesonen haben bereits in der Chemie und der Festkörperphysik praktische Verwendung gefunden.

Schließlich werden mit Hilfe der Elementarteilchen die großen Naturprinzipien, die Symmetrie von Raum und Zeit, analysiert. Von welchem Nichtverstehen der Gesetze und der Sprache der Natur ist die Rede?

Die Quantentheorie enthält nicht einmal eine Andeutung über die Existenz der großen farbenprächtigen Welt der Elementarteilchen. Die Physiker waren auf die Begegnung mit dieser Welt so wenig vorbereitet, daß sie sich anfangs der Anerkennung jeder neuen Partikel verzweifelt widersetzten.

„Ich erinnere mich", sagte Paul Dirac, „daß ich mich

in jenen längst vergangenen Zeiten mit Leuten unterhielt, die im Cavendish-Laboratorium arbeiteten, wo ich den Weg der Partikeln im Magnetfeld beobachtete. Sie sagten mir, daß sie gelegentlich sehen, wie ein Elektron in seinen Ursprung zurückkehrt. Was die Experimentatoren da gesehen hatten, war der Beweis für die Existenz jener neuen Partikeln (der Positronen), doch sie waren einfach nicht imstande, das richtig zu beurteilen, was sie sahen."



Bei der Geschichte der Entdeckung des Neutrons war es ähnlich. Bothe und Becker in Deutschland, Irène und Frédéric Joliot-Curie in Frankreich hatten die Neutronen buchstäblich bereits in der Hand, doch erst Rutherfords Schüler Chadwick war imstande, die neue Erscheinung richtig zu beurteilen, weil er den Gedanken seines Lehrers bezüglich der Existenz einer schweren neutralen Partikel kannte.

Schließlich war die psychologische Barriere überwunden und die Folgen des ersten Schocks beseitigt, doch wohin

dies führte, wissen wir bereits: Die Wissenschaftler kamen vom Regen in die Traufe.

„Seit jenen fernen Tagen hat sich die Situation vollständig verändert", sagte Paul Dirac, „nun werden immer neue Partikeln in großer Zahl angeboten. Die Leute veröffentlichen mit größter Bereitschaft Beweise für die Existenz eines neuen Teilchens, unabhängig davon, ob diese Beweise experimentell gewonnen wurden oder einer noch mangelhaft begründeten theoretischen Idee entstammen."

Eine derartige Situation ist einfach deshalb möglich, weil die gegenwärtige Theorie nicht vorhersagen kann, wann man endlich einen Schlußstrich unter die Liste der Elementarteilchen zu ziehen hat. Es gibt einige hundert verschiedene Arten! Das klingt gar nicht gut. Darum versuchen die Physiker schon seit langem zu erkennen, welche davon wirklich elementar sind und welche „nur so tun, als ob".

Von der Theorie ist keinerlei Hilfe zu erwarten. Woher sollte sie auch kommen, wenn selbst die Theoretiker nicht wissen, was das Wort „elementar" in der Mikrowelt eigentlich bedeutet!

Die Physiker haben das Gefühl, daß alle Unklarheiten in der Mikrowelt irgendwann einmal zu einer Revolution der theoretischen Grundlagen und zu einer einschneidenden Revision aller Vorstellungen und Begriffe führen werden. Dann wird eine neue Theorie entstehen, die auf einigen wenigen allgemeingültigen Prinzipien basiert und die gesamte Vielfalt der Partikeln erklärt sowie eine ausführliche Beschreibung der Wechselwirkungen zwischen ihnen gibt. Es wird ein Blick in die Theorie genügen, um vorhersagen zu können, was beim Zusammenstoß zweier beliebiger Elementarteilchen geschieht.

Dies ist das Maximalprogramm der theoretischen Physik heute.

Einfaltspinsel oder Genie?

Man kann stundenlang darüber sprechen, welche Vorstellungen die Wissenschaftler von einer neuen Theorie der Elementarteilchen haben. Einige von ihnen meinen, daß die Gleichungen dieser Theorie in gedrängter Form

das gesamte physikalische Weltbild enthalten und alle bekannten Materieeigenschaften umfassen werden.

Der hervorragende sowjetische Wissenschaftler und Wissenschaftshistoriker S. Wawilow schrieb bereits 1944, daß „die Physik die Wissenschaft von den einfachsten Formen der Materie ist. Sie zeigt im Grunde genommen eine gewisse Tendenz zur Vereinfachung beim Herangehen an die Erscheinungen". S. Wawilow warnte die Physiker vor allzu kühnen Träumen dahingehend, daß „die Lehre von den Elementarteilchen der Materie nicht nur die elementaren Formen der Erscheinungen, sondern schließlich auch das Weltall insgesamt erklären müsse".

Wie die neue Theorie in Wirklichkeit aussehen wird, muß die Zukunft zeigen. Für uns aber ist es Zeit, zu den Sorgen der Theoretiker von heute zurückzukehren.

Warum wurden der Quantenmechanik eigentlich plötzlich „die Knie weich", warum konnte sie sich nicht auch noch die Physik der Elementarteilchen „aufhalsen"? Die Quantenmechanik war von Anfang an für die Beschreibung der atomaren Erscheinungen „verantwortlich", und das bewerkstelligt sie bis heute vortrefflich. Jener Vorwurf gilt vielmehr der aus der Quantenmechanik hervorgegangenen Theorie der Elementarteilchen.

Die Grundlagen der Quantentheorie des Feldes wurden von den damals bedeutendsten Physikern, von Heisenberg, Pauli, Dirac, Fock u. a., geschaffen. Dirac leitete auf der Grundlage der Quantenmechanik und der Relativitätstheorie erstmals die Gleichung für ein Elektron her, das sich nahezu mit Lichtgeschwindigkeit bewegt. Es ist jene Gleichung, aus der die Physiker von der Existenz des Positrons erfuhren.

Zur Beschreibung der erstaunlichen Eigenschaften der Elementarteilchen, ihrer gegenseitigen Umwandelbarkeit, ihrer Entstehung im Verlauf von Kernreaktionen und ihres Verschwindens schufen die Theoretiker einen eigenen mathematischen Apparat, das Verfahren der zweiten Quantelung*. Doch ein Verfahren ist noch keine Theorie, die die Wechselwirkungen zwischen den Teilchen beschreiben müßte.

---

* Als Quantelung bzw. Quantisierung wird der Übergang von klassischen physikalischen Theorien zu den entsprechenden Quantentheorien bezeichnet.

Allmählich entstand die Quantenelektrodynamik, jener Teil der Quantentheorie des Feldes, der nur mit den elektromagnetischen Wechselwirkungen der Elementarteilchen zu tun hat. Man bezeichnet die Quantenelektrodynamik häufig als Urbild der Theorie der Elementarteilchen. Auch sie bewältigt ihre Aufgabe — elektromagnetische Wechselwirkungen zwischen Partikeln mit höchsten Energien zu untersuchen — bis zum heutigen Tag ganz hervorragend.

Eine ebenso gute Theorie für die starken Wechselwirkungen zu entwickeln, gelang bisher nicht. Anfangs hatte es den Anschein, als könne man sie ganz analog zur Quantenelektrodynamik aufbauen. Während es dort zum „Photonenabtausch" zwischen den Partikeln kommt, werden hier π-Mesonen ausgetauscht, und das ist auch schon der ganze Unterschied.

Äußerlich sieht das alles wirklich genauso aus. Doch bei geringen Abständen sind die starken Wechselwirkungen zwischen den Partikeln vieltausendfach intensiver als die elektromagnetischen Wechselwirkungen, und sie enden oft mit der Entstehung einer ganzen Menge neuer Teilchen. Als Äquivalent dafür tauchen nun in der Theorie endlose Gleichungsketten auf. Mathematisch gesehen wird die Theorie zu einem Alptraum, und auch wenn man annimmt, daß sie zutrifft, weiß darum doch noch niemand, wie man die exakten Lösungen der entstehenden Gleichungen finden sollte.

Auf die Frage, was eigentlich der Entwicklung einer neuen Theorie der Elementarteilchen im Wege stünde, antwortete D. Blochinzew: „Uns fällt es heute schwer zu entscheiden, wo der eigentliche Grund liegt: Fehlt es unserem Verständnis der Erscheinungen an Tiefe, fehlt jene Idee, die Licht in diesen ganzen ungeheuren Komplex von Tatsachen bringen könnte, oder fehlen uns die Tatsachen selbst? Wenn irgendwelche tiefgreifenden Widersprüche zur Relativitätstheorie oder zur Quantenmechanik entdeckt werden würden, dann könnte dieses Ereignis ein Anstoß von ungeheurer Kraft zu neuen Ideen sein."

Man darf allerdings auch eine andere Möglichkeit nicht außer acht lassen. Vorläufig geben ganze Berge von experimentellem Material tatsächlich keinerlei ernstzunehmenden Hinweis darauf, in welcher Richtung die zukünftige

Theorie zu suchen wäre. Damit ist nicht genug: Die experimentell gewonnenen Daten harren selbst noch ihrer theoretischen Interpretation.

„Unter uns gesagt, unter uns theoretischen Physikern, wie benutzen wir denn eigentlich die Ergebnisse dieser Untersuchungen? Überhaupt nicht. Dabei kann es sein, daß uns die Versuchsergebnisse einige idiotische Überraschungen servieren, die dann irgendein Einfaltspinsel aus einer ganz elementaren Regel theoretisch abzuleiten imstande ist?"

Natürlich wäre der Einfaltspinsel, von dem der theoretische Physiker R. Feynman hier spricht, jenem Genie verwandt, das imstande ist, die Besonderheiten der Welt der Elementarteilchen aus den vorhandenen Angaben zu verstehen. Sowohl in der Geschichte der Physik als auch in der Geschichte anderer Wissenschaften kann man genügend Beispiele dafür finden, daß große Entdeckungen ausschließlich im Ergebnis einer neuen Sicht bekannter Tatsachen gemacht worden sind.

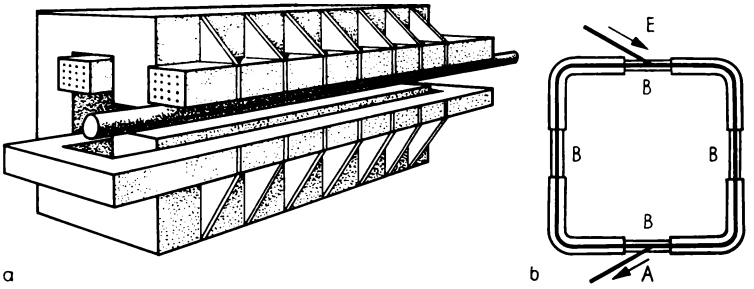
Vor 100 Jahren las der deutsche Kaufmann H. Schliemann die seit undenklichen Zeiten allgemein bekannte „Ilias" des Homer mit anderen Augen. Entgegen der damals herrschenden Meinung sah er alle in der „Ilias" beschriebenen Ereignisse als historische Tatsachen an. Heinrich Schliemann verfolgte Homers Beschreibungen bis in die letzten Einzelheiten und entdeckte Troja, fand den Schatz des Königs Priamos.

Ähnlich war es mit dem bedeutenden archäologischen Fund, den H. Carter 1922 machte. Er legte das Grab des Tutenchamuns frei, das buchstäblich bis zum Bersten mit unschätzbaren Kunstwerken der Meister des alten Ägyptens angefüllt war. Er fand es im Tal der Könige, wo man schon längst kreuz und quer alles umgepflügt hatte. Bekannte Archäologen jener Zeit meinten, daß in diesem Tal keinerlei neue Funde möglich seien, weil es dort kein einziges Sandkorn mehr gäbe, das nicht mindestens dreimal von einem Ort an einen anderen gebracht worden sei. Doch anhand früher von anderen Forschern gefundener Gegenstände mit dem Namen Tutenchamuns ermittelte Carter nach einer Reihe mißglückter Versuche den vermutlichen Ort des Grabes von Tutenchamun richtig und fand das Grab dann tatsächlich an dieser Stelle vor.

Etwas Analoges kann durchaus auch in der Hochenergiephysik eintreten. Den Zeitpunkt kennt allerdings niemand.

Hier spricht Serpuchow

Vor der Frontscheibe unseres Fahrzeugs taucht die alte russische Stadt Serpuchow auf. Noch 10 Fahrtminuten, und vor uns liegt die Stadt der Physiker Protwino, wo in der Nacht zum 14. Oktober 1967 zum ersten Mal der da-



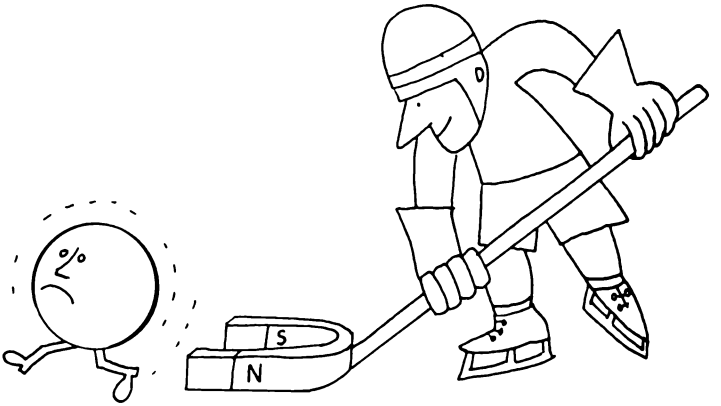
Schema eines Protonensynchrotrons; Querschnitt durch den Ringmagnet (*a*), Schema der Gesamtanlage (*b*) (*B* Beschleunigungsstrecke, *E* Einschuß der bereits vorbeschleunigten Teilchen, *A* Strahlaustritt)

mals leistungsfähigste Beschleuniger für Elementarteilchen seinen Betrieb aufnahm. 70 GeV erlangen die Protonen, während sie die ringförmige Vakuumkammer mit einer Länge von etwa 1,5 km durchrasen!

In einem ringförmigen Saal, unzugänglich für Nichtfachleute und aus Gründen des Strahlungsschutzes unter der Erde ist der Magnet des Beschleunigers installiert. Mit seiner Hilfe halten die Physiker viele Milliarden nuklearer Geschosse von kollossaler Energie auf einer Bahn, deren Geschwindigkeit fast die Lichtgeschwindigkeit erreicht.

120 Blöcke, jeder 11 m lang und mit einer Gesamtmasse von etwa 30 000 t, bilden den „Hauptdispatcher", der die korrekte Bewegung der Protonen überwacht. Zum Ver-

gleich wollen wir daran erinnern, daß der Magnet des Beschleunigers von Dubna die doppelte Masse besitzt, aber nur 10 GeV erreicht. Dies erklärt sich aus der besseren „Qualifikation“ des „Dispatchers“ im Beschleuniger von Serpuchow, da dieser nach dem Prinzip der starken Fokussierung der Partikeln arbeitet. Er führt die von ihm beschleunigten Protonen auf einer schmalen Ringbahn von nur 16 cm Breite entlang. Daraus resultiert auch die Massenverminderung des Magneten selbst.



Diese ausgezeichnete „Beherrschung“ der Protonen ist jedoch nur möglich, wenn die relativen Abweichungen der Werte des Magnetfeldes von Block zu Block höchstens 10^{-4} betragen.

Bis zum heutigen Tag setzt uns die Kunst der Pyramidenerbauer des alten Ägyptens in Erstaunen. Die riesigen Quader sind so gut zugepaßt, daß man nicht einmal ein Blatt Papier in die Fugen schieben kann. Die Innenwände, d. h. alle Stellen, die nicht zu sehen waren, wurden allerdings relativ nachlässig ausgeführt.

Im Beschleuniger dagegen muß auch das, was nicht zur Außenansicht gehört, äußerst korrekt gearbeitet sein. Im gegenteiligen Fall würde der Beschleuniger nicht funktionieren. Seine Erbauer haben erreicht, daß die Abweichungen der Werte des Magnetfeldes von Block zu Block

unter 10^{-4} liegen. Dabei wissen wir, daß selbst der Stahl aus verschiedenen Schmelzen etwas größere Unterschiede in seinen magnetischen Eigenschaften aufweist.

Jeder der 120 Magnetblöcke wurde aus Stahlblechen von 2 mm Dicke montiert, die zwar aus verschiedenen Schmelzen stammten, aber vor der Montage sorgfältig „durcheinandergewürfelt" wurden. Ausgehend von den Ergebnissen der magnetischen Messungen, wählte man eine optimale Variante für die Verteilung der Magnetblöcke im Beschleunigerring. Um einen stabilen Betrieb zu erreichen, mußten sämtliche Magnetblöcke mit einer Masse zu je 240 t auf 100 µm genau einjustiert werden. Angesichts dieses Problems versagt unsere Vorstellungskraft. Doch auch die Schwierigkeit wurde mit Hilfe besonderer geodätischer Meßverfahren überwunden. So erhielten die Physiker ein neues „Supermikroskop" zum Studium der Mikrowelt. Worauf sollten sie es jetzt richten?

Wir dürfen nicht außer acht lassen, daß sich die Theorie der Elementarteilchen auf einige grundlegende Axiome und Postulate stützt — wie ein Haus auf sein Fundament —, die die natürlichen Verallgemeinerungen der Quantenmechanik und der Relativitätstheorie bilden. Darum wurde beschlossen, vor allem die eigentlichen Grundlagen der Theorie mit Hilfe des neuen „Mikroskops" zu überprüfen.

Mit der Messung der Gesamtwahrscheinlichkeit für die Wechselwirkung von Partikeln mit Materie und der Streuungswahrscheinlichkeit dieser Partikeln um geringe Winkel wurden zugleich die wesentlichen Postulate der Theorie überprüft. So wurde eine Verbindung zwischen dem Fundament der Physik von heute und den Experimenten in der Welt der Elementarteilchen hergestellt.

Zwei Jahre später konnte das Korrespondierende Mitglied der Akademie der Wissenschaften der UdSSR, I. Pomerantschuk, noch eine weitere fundamentale Beziehung erhalten. Auch das Theorem von Pomerantschuk verknüpfte die Ausgangsaxiome mit dem Experiment.

Im Synchrophasotron von Dubna waren die Dispersionsverhältnisse bis zu einer Energie von 10 GeV überprüft worden. Dort konnten keinerlei Widersprüche entdeckt werden, doch einiges blieb unklar. Das Theorem von Pomerantschuk wurde im Versuch nicht bestätigt, und dies überraschte niemand. Im Theorem hieß es, daß hochener-

giereiche Teilchen und Antiteilchen mit dem gleichen Target die gleiche Wechselwirkungswahrscheinlichkeit bzw. den gleichen Streuquerschnitt haben sollten. Unbekannt war freilich, welcher Energiebereich als hinreichend hoch anzusehen ist. So blieb die Hoffnung erhalten, daß sich das Theorem in zukünftigen Experimenten bestätigen werde.

Nun wird verständlich, mit welcher Ungeduld sowohl die Theoretiker als auch die Experimentalphysiker auf die Inbetriebnahme des leistungsfähigeren Beschleunigers warteten. Der Gigant von Serpuchow stellte ihnen nicht nur Protonen mit einem neuen Energierekord zur Verfügung. Hier hatten sie eine Fabrik zur Produktion von Sekundärteilchen mit ganz außergewöhnlicher Leistungsfähigkeit erhalten. Auf der Angebotsliste standen π- und K-Mesonen, Antiprotonen und Neutrinos.

So konnten die Grundlagen der Theorie an verschiedenen Teilchenarten gleichzeitig überprüft werden. Eines der für diese Zwecke bequemsten Objekte bildeten die uns bereits bekannten erstaunlichen neutralen K-Mesonen. Sie entstanden beim Aufprall der mit (fast) Lichtgeschwindigkeit dahinrasenden Protonen auf das Target, das sich unmittelbar in der Vakuumkammer des Beschleunigers befand. Einen Augenblick später tauchten am Ausgang des 50-m-Kanals unsere alten Bekannten, die langlebigen neutralen K-Mesonen, auf.

Diese Partikeln sind — wie die Physiker sagen — ein ideales „Geschenk" der Natur zur Überprüfung des Pomerantschuk-Theorems. Jede derartige Partikel stellt einen bestimmten Mischungstyp von Teilchen und Antiteilchen, nämlich von K^0-Meson und Anti-K^0-Meson dar. Nun mußte man diesem Teilchenstrom nur eine stoffliche Barriere in den Weg stellen, und die Physiker konnten in einem einzigen Experiment vergleichen, wie sich die Vertreter von Materie und Antimaterie verhalten.

Ende August 1970 trafen sich in Kiew Wissenschaftler aus 40 Ländern zu einer Konferenz über Hochenergiephysik. Im malerisch gelegenen zentralen Teil der Stadt versammelten sich diejenigen im Saal des Oktober-Kulturpalastes, denen das „Wohl und Wehe" der weiteren Entwicklung der Physik der Elementarteilchen am Herzen liegt.

500 Vorträge konnten die Teilnehmer dieses bedeutenden Wissenschaftlerforums hören. Die größte Anziehungskraft hatten die Vorträge, in denen über die Versuchsergebnisse aus Serpuchow zur Überprüfung der Dispersionsverhältnisse und des Pomerantschuk-Theorems berichtet wurde.

Der Experimentalphysiker J. Prokoschkin, Korrespondierendes Mitglied der Akademie der Wissenschaften der UdSSR, berichtete über die Ergebnisse der Versuche zur Wechselwirkung zwischen Nukleonen einerseits und Protonen sowie Antiprotonen, π^+-Mesonen sowie π^--Mesonen, K^+-Mesonen sowie K^--Mesonen mit einer Energie bis zu 70 GeV andererseits.

Großes Interesse fanden die Versuchsergebnisse, die die Gruppe des Kandidaten der physikalisch-mathematischen Wissenschaften, I. Sawin, aus dem Hochenergielaboratorium des Vereinigten Instituts für Kernforschung unter Verwendung von neutralen K-Mesonen erhielt. In der Diskussion zum Vortrag gab der hervorragende amerikanische theoretische Physiker Yang eine besonders positive Beurteilung dieser Arbeit.

Mit Beifall begrüßten die Konferenzteilnehmer auch Dr. W. Nikitin. Unter seiner Leitung hatten die Wissenschaftler aus Dubna an der Anlage von Serpuchow einen der ersten Versuche zur Überprüfung der fundamentalen Grundlagen der Theorie durchgeführt.

Es ist leicht zu verstehen, warum die Experimente von Serpuchow unter den Wissenschaftlern aus aller Welt so großes Interesse fanden. Der Vorsitzende des Organisationskomitees der Konferenz, Akademiemitglied N. Bogoljubow, sagte: „Viele wichtige Schlußfolgerungen der Theoretiker wurden bislang auf der Grundlage von Experimentaltatsachen gezogen, die mit Hilfe von Beschleunigern erzielt worden sind, bei denen die Protonenenergie bis 30 GeV erreicht. Welche Gesetzmäßigkeiten werden sich nun bei wesentlich höheren Energien abzeichnen, wohin wandern die Versuchskurven? Werden sie nicht vielleicht die Basis der Theorie umstürzen?“

Überraschungen gab es diesmal allerdings nicht. Die Beratung der in Serpuchow erhaltenen Ergebnisse bestärkte die Physiker in ihrer Auffassung, daß die der Quantentheorie und der Relativitätstheorie zugrunde liegenden Axiome zur Beschreibung der Elementarteilchen geeignet sind.

Die Ruhe vor dem Sturm

Wir alle haben schon einmal jene kurze Frist erlebt, die man als Ruhe vor dem Sturm bezeichnet. Alles erstirbt, alles scheint unbeweglich und voller Erwartung. Doch ein Blick zum Himmel zeigt, daß dort mit großer Geschwindigkeit tiefhängende, regenschwere Wolken dahineilen. Sie haben sich zu einer großen schwarzen Wolke vereinigt, die unter ihrer Last immer tiefer herabsinkt.

Die gegenwärtige Periode in der Theorie der Elementarteilchen läßt sich mit dieser Ruhe vor dem Sturm vergleichen. Doch ein Blick in die wissenschaftlichen Zeitschriften, ein Gespräch mit Theoretikern genügt, um zu empfinden, wie intensiv die Arbeit läuft, wie gründlich die experimentellen Ergebnisse studiert werden und wie viele Versuche zu ihrer Erklärung unternommen werden.

Aus diesen von der Theorie noch nicht abgeschliffenen, gewissermaßen „rohen" Versuchsdaten soll ja gerade das „nächste Stockwerk" im Gebäude der Wissenschaft errichtet werden. Zwar wissen die Physiker noch nicht, wie das geschehen soll, doch sie können bereits bestimmte Einzelheiten der neuen Theorie erkennen. Es gibt keinen Zweifel, daß der veraltete Begriff von der punktförmigen Partikel nicht in die in den Geburtswehen liegende Theorie gelangen wird. Ein Punkt läßt sich nicht in Teile zerlegen. Scheinbar entsprechen die Elementarteilchen dieser Definition, denn noch niemand hat ein halbes Elektron oder ein drittel Neutron beobachtet. Andererseits entsteht aber beim Zusammenprall von Teilchen hoher Energie eine ganze Sammlung neuer Partikeln. Ist ein Elementarteilchen nun der einfachste punktförmige Baustein oder ein kompliziertes System?

Erinnern Sie sich, welche Nachrichten die Elektronengeschosse gebracht hatten, die zum ersten Mal „hautnah" an die Nukleonen herangekommen waren? Welche Sensation hatte die Entdeckung der elektronischen Struktur des Protons und des Neutrons sowie die Bestimmung ihrer räumlichen Größe ausgelöst!

In der Theorie bleiben allerdings sämtliche Partikeln nach wie vor punktförmig. Eine Folge hiervon ist u. a. die Tatsache, daß man bei Berechnung der Partikelnmasse unendliche Größen erhält. Wie sollte in die Theorie der

neue Begriff „Elementarteilchen“ eingeführt werden, der alles das beinhaltet, was wir aus dem Experiment darüber wissen?

Nicht besser liegen die Dinge mit den Partikelnkoordinaten. Die Heisenbergsche Unschärferelation zeigt, daß es in der Mikrowelt unmöglich ist, Koordinaten und Impulse einer Partikel gleichzeitig zu messen. Die Genauigkeit des Wertes einer dieser Größen jeweils für sich betrachtet, wird jedoch nicht eingeschränkt.

Angenommen, die Lage — bzw. Ortskoordinaten — eines Protons müßten ermittelt werden. Jeder Experimentator wird uns raten, die Lage des Protons aus der Streuung auftreffender γ-Quanten zu ermitteln. Folgen wir diesem Rat; denn je näher die γ-Quanten an die Partikel herankommen, um so größer ist die Genauigkeit, mit der wir ihre Koordinaten ermitteln. Dazu wiederum sind nur Quanten hoher Energie imstande. Nehmen wir an, es sei uns gelungen, solche Quanten „aufzutreiben“, und freuen wir uns im Vorgefühl eines höchst exakten Experiments. Doch was ist das? Aus dem Wasserstoff-Target, das wir in ein γ-Quantenbündel höchster Energie gebracht haben, fliegen nach allen möglichen Richtungen neue Protonen und Antiprotonen heraus. Es entstehen also genau jene Partikeln, deren Koordinaten wir messen wollen. Nun finde einmal jemand heraus, wo die primären und wo die sekundären Protonen sind. „Meiner Meinung nach wird der neuen Theorie“, schrieb I. Tamm, „eine prinzipielle Einschränkung des Genauigkeitswertes der Koordinaten für sich allein genommen zugrunde liegen, d. h. außerhalb der Abhängigkeit vom Impuls.“

So wird also auch der alte Partikelnkoordinatenbegriff der Prüfung in der Physik der Elementarteilchen nicht standhalten. Einige Wissenschaftler sind der Auffassung, es könne sich herausstellen, daß der Raum bei ultrakleinen Maßstäben nicht kontinuierlich, sondern diskret sei. Auf der Grundlage einer Hypothese von der Existenz einer elementaren Länge im Raum werden Versuche zur Konstruktion einer neuen Theorie unternommen. Der reale Erfolg dieser Idee ist allerdings im Moment nicht allzu groß.

Darin liegt auch die Dramatik in der Entwicklung der neuen Theorie. Weit vor uns schimmert als prächtige Vision mit unscharfen verschwimmenden Konturen der großartige „Palast“ der Elementarteilchenphysik. In der Rea-

lität stehen die Physiker jedoch vor einem riesigen Berg unbewältigter experimenteller Ergebnisse. Was mit diesem „Baumaterial" zu tun ist, wissen die Wissenschaftler vorläufig nicht.

Wir wollen keine Detektive sein

Wer den Film „Der Brillantenarm" gesehen hat, wird sich vielleicht erinnern, wie der nicht unbekannte Semjon Semjonowitsch über das Unglück berichtet, das ihm angeblich widerfahren ist: „Ich bin ausgerutscht, hingefallen, habe das Bewußtsein verloren, und als ich aufwache, liegt der Arm in Gips." Ungefähr dasselbe wird Ihnen der Experimentalphysiker von der Kernreaktion erzählen: „Ich habe Protonen hoher Energie auf das Target geschleudert, und dabei sind zwei Partikeln zusammengeprallt. Was passiert ist, weiß ich nicht, aber als ich hinsehe, zeigt das Nachweisgerät neue Teilchen an."

Der wesentliche Unterschied zwischen diesen beiden Berichten besteht lediglich darin, daß Semjon Semjonowitsch in Wahrheit genau gesehen hat, was mit seinem Arm geschah, während man den Physiker keineswegs der Heimlichtuerei beschuldigen darf.

Selbstverständlich befassen sich die Wissenschaftler nicht mit solcher Geschichtenerzählerei. Sie schreiben wissenschaftliche Artikel und halten Vorträge, die in strenge mathematische „Gewänder" gekleidet sind.

Doch weder die strenge Form noch die eindrucksvolle Bezeichnung können das Entscheidende verbergen und versuchen es auch gar nicht: Es ist das vollständige Fehlen von Angaben über den eigentlichen Prozeß, der beim Zusammenprall stattfindet.

Der Physiker, der sein Wasserstoff-Target in den Protonenstrahl bringt, weiß genau, daß sofort ein Zusammenprall zwischen einem beschleunigten und einem im Target befindlichen Proton stattfinden wird. Das sind die Anfangsbedingungen der Reaktion. Erinnern Sie sich: „Ich bin ausgerutscht, hingefallen..." Halt, alle verlassen den Saal. Der Beschleuniger wird eingeschaltet. Immer rascher läßt das elektrische Feld die Partikeln werden. Schließlich entläßt sie die gigantische Schleuder in die Freiheit. Zusammenstoß!

Dieses Wort enthält keinerlei Information außer jener, daß sich hier zwei „Hauptbewohner" der Mikrowelt mit gewaltiger Geschwindigkeit begegnet sind. Wie haben sie sich getroffen? Welche Zwischenteilchen entstanden? Welche Teilchen wurden sofort wieder absorbiert?

Die moderne Quantentheorie vermag keine einzige dieser Fragen zu beantworten. Bei so ungeheuren Energien des Zusammenstoßes versagt der mathematische Apparat der Theorie völlig. „...habe das Bewußtsein verloren..."

Unterdessen registrieren die Nachweisgeräte bereits die Ergebnisse der Kernreaktion. Im Meßzentrum unterziehen elektronische Geräte — die Analysatoren — die Information einer ersten Bearbeitung. Schließlich hält der Forscher die Wahrscheinlichkeitswerte für den Prozeß in den Händen, der ihn interessiert.

Genau diese Größe aber läßt sich nach den allgemeinen Prinzipien der Quantenmechanik mit Hilfe einer Gruppe mathematischer Funktionen, der sogenannten S-Matrix, ausdrücken. Ähnelt das nicht Semjon Semjonowitschs Ausspruch: „Als ich aufwache, liegt der Arm in Gips"?

Die S-Matrix ist eine Größe, die den Anfangszustand des Prozesses mit dem Endzustand verknüpft, eine Größe also, die im Versuch gemessen und theoretisch berechnet wird. Heute bildet sie das zentrale Verbindungsglied zwischen Theorie und Experiment, den „Knotenpunkt", wo sich Theoretiker und Experimentatoren treffen. Die S-Matrix ist die Sprache, in der sie sich untereinander verständigen.

Na schön, sie haben sich getroffen, sind klargekommen und haben das Versuchsergebnis verstanden. Also kann man doch auch eine Theorie entwickeln, um ihn (diesen Versuch) auch zu erklären! Man kann, nur wie?

Da ist einmal der althergebrachte Weg, der von der Quantenmechanik suggeriert wird. Mit größter Sorgfalt wird das Verhalten der an der Reaktion beteiligten Partikeln Schritt für Schritt untersucht, etwa so, wie ein Detektiv den Verbrecher entlarvt, indem er ihn weder tagsüber noch nachts aus den Augen läßt.

Doch während der Detektiv immerhin noch auf Erfolg hoffen darf, ist das Unternehmen des Theoretikers von vornherein zum Scheitern verurteilt. Vorläufig kann niemand die endlose Gleichungskette lösen. Aber nur sie ist imstande, mit Hilfe der Wellenfunktion jene Ereignisse zu beschrei-

ben, die im Augenblick des Zusammenstoßes ablaufen.

Das ist der Grund, warum einer der Begründer der Quantenmechanik, Werner Heisenberg, bereits 1941 den Gedanken ausgesprochen hat, daß die S-Matrix den grundlegenden mathematischen Apparat der modernen Quantentheorie darstellen muß.

Wir wollen keine Detektive sein; so kann man den Sinn dieser Idee verstehen. Wir wollen uns nicht mit der Untersuchung dessen befassen, was der Analyse vorläufig noch unzugänglich ist. Es muß eine Theorie geschaffen werden, deren Gleichungen lösbar sind. Diese Theorie, die nicht den Versuch unternimmt, konkret festzustellen, was im Augenblick des „Bewußtseinsverlustes", d. h. des Zusammenstoßes, stattfindet, würde alle befriedigen.

Der Archäologe braucht nicht zu wissen, wer und mit Hilfe welchen konkreten Instruments und an welchem Tag einen historisch wertvollen Fund gemacht hat. Für ihn ist es nur wichtig zu erfahren, an welchem Ort und in welcher Kulturschicht der betreffende Gegenstand entdeckt wurde. Dies entspricht vollauf den Anfangsbedingungen der Kernreaktion, die dem Experimentator wohlbekannt sind.

Weiter muß der Archäologe die Möglichkeit haben, den entdeckten Gegenstand unmittelbar zu untersuchen. Die Beschreibung des Fundes gewinnt, genau wie das experimentelle Ergebnis, das in der Physik der Elementarteilchen erhalten wird, seinen Wert erst nach der theoretischen Bearbeitung.

Der Archäologe wird unbedingt versuchen, den gefundenen Gegenstand wenigstens ungefähr zu datieren, um damit seine Bedeutung zu ermitteln. Doch wenn die Physiker das gleiche tun wollen, nämlich die Elemente der S-Matrix aus den Gleichungen zu erhalten, sehen sie sich unüberwindlichen Schwierigkeiten gegenüber. Der gerade Weg zur Entwicklung einer neuen Theorie ist auch bei Anwendung des Matrizenverfahrens vorläufig versperrt. Deshalb versucht man mancherlei Umwege. Die Theoretiker haben sich daran gewöhnt, die experimentell gewonnene Information so zu bearbeiten, daß sie bestimmte Eigenschaften der Matrixelemente einfach postulieren, d. h. konkrete Hypothesen ohne Beziehung zu den fundamentalen Axiomen aussprechen.

Dabei ist jeder Umweg nicht so sehr der unbeugsamen Logik des Erstbeschreiters als vielmehr seiner Intuition,

dem besonderen Gefühl für die richtige Behandlung der Experimentaldaten, verpflichtet.

Ob man das gesuchte Ziel auf diesen Wegen erreichen kann, ob es möglich sein wird, aus dem Steinhaufen ein „Gebäude" zu errichten, ist ungewiß. Vorläufig führen alle diese Wege nicht sehr weit und brechen dann plötzlich ab. Auf der Grundlage solcher Teilhypothesen lassen sich manchmal unerwartete Beziehungen zwischen den verschiedenen Prozessen ermitteln. Doch jedesmal gelingt es nur, eine sehr kleine Zahl von Steinen zu einem geschlossenen Ganzen zusammenzufügen.

„Die existierende Theorie hat Mosaikcharakter", sagte D. Blochinzew. „Einzelne Erscheinungen lassen sich verstehen und sogar berechnen. Doch häufig ist der Aspekt, der für eine bestimmte Gruppe von Erscheinungen zutrifft, nur schlecht mit einem anderen Aspekt zu vereinbaren, der eine andere Gruppe von Erscheinungen gut erklärt. Das Gesamtbild fehlt, nur einzelne Bruchstücke zeichnen sich ab."

Aus dem experimentell gewonnenen Tatsachenberg können die Theoretiker vorläufig nur einzelne Elemente des zukünftigen Gebäudes der modernen Physik bergen.

Doch vielleicht wird jemand bei Betrachtung dieses Mosaiks aus der Ferne plötzlich imstande sein, alle bisher gefundenen Einzelteile an ihren Ort zu bringen und die Teilhypothesen in einen einheitlichen „Architekturplan" des Gebäudes, in die Theorie der Elementarteilchen, einfließen zu lassen.

Der „Makroblick" in die Mikrowelt

Zuweilen muß man unbedingt das Gesamtbild eines Prozesses als Ganzes überschauen. Ein Blick vom Flugzeug aus genügt, um in Wällen, die die archäologischen Ausgrabungen behindern, versunkene Häuserruinen zu erraten. Unverständliche Streifen in den Steinen der mexikanischen Hochebene vereinigen sich, aus großer Höhe betrachtet, in das gigantische Abbild eines Vogels.

Die Arbeit der theoretischen Physiker, die jede experimentell gefundene Tatsache prüfen und abtasten, erinnert sehr an den Beginn der Ausgrabungsarbeiten an einem

äußerst interessanten, aber unverständlichen Bauwerk. Die Physiker sind überzeugt, daß der Schutt einmal weggeräumt sein wird. „Gewiß", sagte F. Dyson, „können wir immer nur ein ganz kleines Klötzchen vorwärtsstoßen, und nur sehr wenige davon rühren sich überhaupt vom Fleck, wenn wir sie anstoßen."

Die von der Theorie nicht erfaßte, unerkannte Welt der Elementarteilchen macht einen „seltsamen" Eindruck. Der englische Philosoph F. Bacon (1561—1626) schrieb: „Nichts wirklich Schönes existiert, das nicht auch einen Teil Seltsamkeit enthielte."

Ist diese Seltsamkeit wirklich so unvermeidlich?

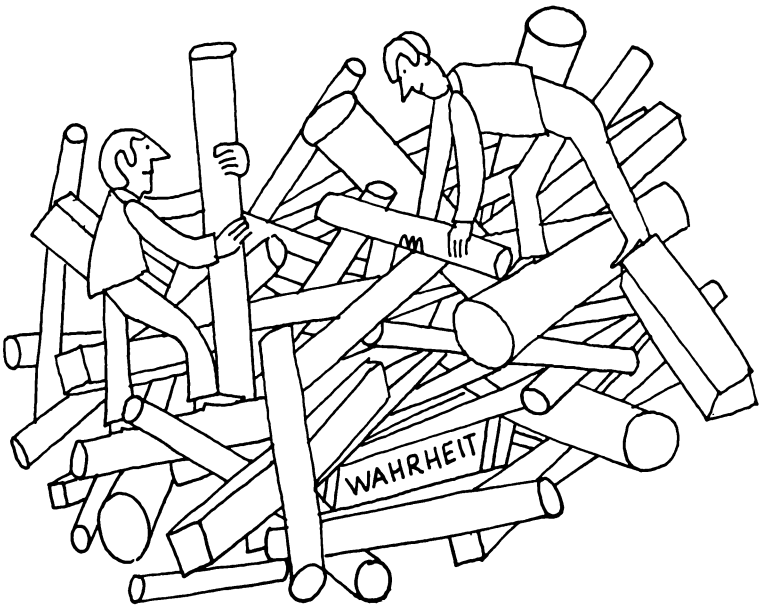
Versuchen wir, uns einmal von der ins einzelne gehenden Betrachtung der Partikeln und ihres Verhaltens zu lösen, und schauen den ganzen Haufen experimentell gewonnener Ergebnisse „von oben" an, um diese neue erstaunliche Welt mit einem einzigen Blick übersehen zu können.

„Ist es nicht so, daß zu große Störungen in den Proportionen und seltsame Abweichungen von der Ordnung die Schönheit vernichten?" fragt M. Gell-Mann. „Im Verlauf vieler Jahre litt eines der Hauptgebiete der physikalischen Wissenschaften — die Lehre vom Aufbau der Materie — an der Krankheit der Seltsamkeit. Als die Physiker die Materie aus den geringsten Entfernungen zu untersuchen begannen, gewannen sie den Eindruck, es handele sich um ein willkürliches Gemisch einzelner Elementarteilchen, unter denen sich keinerlei strenge Ordnung entdecken ließ. Heute endlich beginnt sich das Bild ein wenig aufzuklären. Auch das Wort Seltsamkeit selbst hat Eingang in das Vokabular der Physiker gefunden, und der Anteil dieser Seltsamkeit ist so weit reduziert worden, daß bereits die Schönheit der Ordnung hervorzutreten beginnt."

Partikeln, die bei Betrachtung aus geringer Entfernung so verschieden erscheinen wie das Proton und das Neutron, gleichen sich unter dem Aspekt der starken Wechselwirkungen völlig. Durch Einführung der neuen Quantenzahl Seltsamkeit ist es M. Gell-Mann und A. Nishijima gelungen, auch die seltsamen K-Mesonen in der Gesamtklassifikation der Partikeln unterzubringen. Je mehr Teilchen in einem Blick umfaßt werden, um so geordneter wird der früher so gestaltlos erscheinende Tatsachen„berg".

Anfang 1960 erschien in einer amerikanischen wissenschaftlichen Zeitschrift ein Artikel des jungen theoreti-

schen Physikers J. Sakurai. Der Veröffentlichung ging eine Periode quälenden Zweifels beim Verfasser voraus. Entscheidend dafür, daß er sich doch zur Herausgabe entschloß, dürfte seine Jugend gewesen sein. In jungen Jahren überwindet man jenes Furchtgefühl leichter, das jeder Forscher empfindet, wenn er hofft, wichtige Ergebnisse zu erzielen.



„Sie könnten vielleicht denken", sagte Paul Dirac, „daß ein guter Forscher das erzielte Resultat völlig ruhig ohne die geringste Erregung beurteilt, daß er immer nur logisch denkt und seinen Gedankengang ganz rational fortsetzt. Dem ist bei weitem nicht so. Der Forscher ist auch nur ein Mensch, und dort, wo er große Hoffnungen hegt, ist ihm auch die große Furcht nicht fremd."

Noch vor der Veröffentlichung seines Artikels kannte J. Sakurai die negative Einstellung seiner Arbeitskollegen dazu. „Die Teilchen, die du da vorhersagst, existieren nicht", hörte er von allen Seiten. Welche innere Sicherheit und welche vielleicht gar nicht bewußt gewordene Kühn-

heit und Entschiedenheit hat der letzte Schritt J. Sakurai abgefordert! Die strittige Arbeit wurde in den Druck gegeben.

Die Theoretiker nahmen ihr Erscheinen kühl auf; viele beachteten sie überhaupt nicht. Ganz anders war die Reaktion der Experimentalphysiker. Es war keinesfalls häufig, daß man von den Theoretikern konkrete Angaben erhielt. In der Hauptsache befaßten sich diese mit „Ausgrabungen" und mit der Bearbeitung bereits erzielter Resultate.

An den größten Beschleunigern der Welt wurden die entsprechenden Versuche unternommen. Nach kurzer Zeit fand man alle 3 von Sakurai beschriebenen Partikelntypen. Es waren bei weitem keine gewöhnlichen Teilchen. Ohne die Entdeckung der Vektormesonen, wie man sie nun bezeichnete, hätte nämlich die Idee von den Quarks nicht entstehen können.

Gell-Mann hat einmal gesagt, daß die Natur einfach ist, wenn man nur weiß, wie man sich ihr nähern soll. Es hat sich historisch nun einmal so ergeben, daß die Quantentheorie der elektromagnetischen Wechselwirkungen geschaffen wurde und erst danach in Analogie dazu die Theorie der starken nuklearen Wechselwirkung entstand. Darum stellte man sich den Verkehr der Nukleonen untereinander nach dem Ebenbild der Beziehungen vor, die zwischen geladenen Partikeln existieren. Die Elektronen tauschten elektromagnetische Feldquanten, die Photonen, untereinander aus. Bei den Neutronen oder Protonen waren es π-Mesonen. Wer aber wollte die Hand dafür ins Feuer legen, daß dies der einzig mögliche und richtige Weg ist?

„Unsere Theorie", sagte J. Sakurai, „erinnert auf ihre Art an einen Ausspruch R. Feynmans, wonach man neue Ideen entwickeln muß, indem man sich die Frage stellt: Was wäre, wenn die Geschichte einen anderen Verlauf genommen hätte?"

Der Weg, den Sakurai vorgeschlagen hatte, begann „im gleichen Dorf" wie der frühere, nämlich bei der Analogie zur elektromagnetischen Wechselwirkung.

Jeder Schüler der höheren Klassen weiß heute, daß die elektrische Ladung die Ursache des elektromagnetischen Feldes ist und daß diese Ladung die Wechselwirkungskraft zwischen den geladenen Körpern definiert. Außerdem ist weithin bekannt, daß die elektrische Ladung bei beliebigen Materieumwandlungen mit größter Genauigkeit erhalten

bleibt. Sowohl bei Kernreaktionen als auch beim Zusammenstoß von Elementarteilchen ist die elektrische Gesamtladung der Partikeln vor der Reaktion stets gleich der Ladung sämtlicher Partikeln nach der Reaktion. Das ist natürlich nichts Neues. Das Gesetz von der Erhaltung der elektrischen Ladung wurde vor sehr langer Zeit entdeckt, und die Experimentatoren sind von seiner Unerschütterlichkeit überzeugt.

Der theoretische Physiker E. Wigner wies in den 30er Jahren auf folgende Doppelrolle der elektrischen Ladung hin: Eine so interne Eigenschaft der Ladung, ihre Erhaltung, findet einen ebenso dynamischen Ausdruck (definiert die Wechselwirkungskraft) wie etwa der Charakter eines Menschen — bei dem der Temperamentstyp als dessen Grundlage tief im genetischen Code verankert ist — in seinen Handlungen im Alltag zum Ausdruck kommt.

Der wesentliche Inhalt des Gedankens von Wigner, Schwinger, Yang, Mills und Utijama bestand darin, daß die Kraft jeder beliebigen Wechselwirkung mit einer im Verlauf dieser Wechselwirkung erhaltengebliebenen Ladungsgröße verknüpft sein müsse.

Bei starken Wechselwirkungen existierten ebenfalls 3 Erhaltungsgrößen*. Was wäre, wenn auch sie in starken Wechselwirkungen einen dynamischen Ausdruck fänden? Dann eröffnete sich ein Weg zur Entwicklung der neuen Theorie!

Sakurai hatte sich nun gerade die Aufgabe gestellt, nachzuprüfen, ob diesen 3 Erhaltungsgrößen vielleicht 3 Wechselwirkungstypen entsprechen. Im Ergebnis seiner Untersuchungen stellte sich heraus, daß in der Natur analog zu den Überträgern des elektromagnetischen Feldes, den Photonen, 3 Typen von Vektormesonen existieren müssen, die die Überträger der starken Wechselwirkung bilden. Bald darauf wurden diese Teilchen auch von den Experimentalphysikern entdeckt.

„Sollte sich die vorgeschlagene Theorie als richtig erweisen", schreibt Sakurai, „dann entsteht naturgemäß die Frage: Beruhen nicht möglicherweise alle in der Natur existierenden fundamentalen Wechselwirkungen (elektromagnetische, nukleare, schwache und gravitative Wech-

*Es sind der Isospin, die Hyperladung und die Barionenladung, auf die wir aber hier nicht näher eingehen wollen.

selwirkung) auf Erhaltungssätzen bezüglich der inneren Eigenschaften?"

Hier zeichnet sich eine sehr weitreichende und zugleich anziehende Möglichkeit zur Erfassung aller Wechselwirkungstypen ab, um den „vielsprachigen" Wechselbeziehungen der Elementarteilchen ein einheitliches Alphabet, eine einheitliche theoretische Grundlage, zu geben! Doch die Hauptsache ist, daß diese Möglichkeit nicht durch Anwendung logisch geschlossener analytischer Methoden entstand, wie es bei der Entwicklung der Quantentheorie des Feldes geschah, sondern durch die Suche nach Symmetrieerscheinungen in den Wechselwirkungen zwischen den Partikeln.

„Vor dem Hintergrund einiger 100 Versuche eine befriedigende Theorie für die Erscheinungen der Mikrowelt aufzubauen", schreibt Prof. J. Smorodinski, „entstand ein neues Verfahren, eine neue Form der Überlegungen, die auf den ersten Blick keine klaren Grundlagen zeigte. Es war das Symmetrieverfahren, das sich in der Anwendung gerade auf jene Prozesse so außerordentlich effektiv erwiesen hat, bei denen die alte Theorie machtlos ist."

Zu der Zeit, von der hier die Rede ist, befaßte sich Gell-Mann bereits seit einigen Jahren mit der Systematik der Elementarteilchen und mit der Suche nach einem geeigneten Standpunkt, von dem aus alle fundamentalen Partikeln auf einen Blick überschaubar würden. Als Sakurais Artikel erschien, war Gell-Mann möglicherweise mehr als andere innerlich zur Aufnahme der darin enthaltenen Ideen bereit. Ohne der unfreundlichen Haltung fast sämtlicher Theoretiker auch nur die geringste Beachtung zu schenken, wandte er die hier ausgesprochene Idee auf die Klassifikation der Elementarteilchen („achtfacher Weg") an.

In seinen Erinnerungen schreibt der Kosmonaut W. Sewastjanow, daß er beim Überfliegen von Warschau beschloß, einmal herauszubekommen, wie weit der „Makroblick" aus dem Weltall über dem Zentrum des europäischen Kontinents reicht. Er sah die Skandinavische Halbinsel, die Ostsee, Leningrad, die Adria, das Schwarze Meer und — in Flugrichtung — Moskau.

Der Gedanke von Yang, Mills und Sakurai erlaubt einen „Makroblick" auf die Welt der Elementarteilchen und läßt ihre Ordnung erkennen. Sämtliche Teilchen zerfallen in einige große Familien zu je 8 oder 10 Gliedern. In jeder

dieser Familien sehen die Teilchen mathematisch äquivalent aus und sind symmetrisch zueinander.

Dies vermittelt jedoch nicht nur ästhetische Befriedigung. Die hier gefundene „Harmonie der Natur" dient den Physikern redlich bei der Lösung praktischer Aufgaben im Bereich der Mikrowelt. Mit ihrer Hilfe konnten erstmals die Wahrscheinlichkeiten für Prozesse unter Beteiligung von Partikeln aus ein und derselben Familie berechnet werden. Es zeichnete sich eine Abhängigkeit zwischen Erscheinungen ab, zwischen denen man früher nichts Gemeinsames finden konnte.

In seinem Schlußwort an die 12. Internationale Konferenz für Hochenergiephysik in Dubna (jene Konferenz, auf der die Wissenschaftler erstmals etwas über die Versuche mit K-Mesonen erfuhren) sagte D. Blochinzew, daß wir von unserem gemeinsamen Ziel nicht allzuweit entfernt sind, nämlich von der Entdeckung neuer theoretischer Prinzipien, die in der Welt der Elementarteilchen gelten. „Allerdings", fuhr Blochinzew fort, „könnten Skeptiker sagen: Ja, sie haben wahrscheinlich recht, und wir sind wirklich dem Ziel sehr nahe, wenn nur die Fahrtrichtung stimmt..."

Welcher der gegenwärtig in der Theorie existierenden Wege richtig ist, kann vorläufig nicht gesagt werden. Offenbar haben jene Wissenschaftler recht, die die Auffassung vertreten, daß jede der miteinander konkurrierenden Theorien einen Teil der Wahrheit enthält und daß sie sich auf bestimmte Weise gegenseitig ergänzen.

Die gespenstische Partikel

Wenden wir uns noch einmal dem Beschleuniger von Serpuchow zu, diesem in seiner Art einmaligen Werkzeug der Elementarteilchenphysik. Mit seiner Hilfe können wir in so wohlbehütete Tiefen der Materie eindringen, wo jeder Schritt vorwärts eine Entdeckung ist, obwohl diese Schritte ständig schwieriger werden.

Unser Blick kann sich nur schwer von der klaren Linie des Ringmagneten losreißen. Doch was ist das? Die fast ideale Symmetrie des Magneten von Serpuchow ist unterbrochen. Zwischen zwei seiner geradlinigen Sektionen ist

um die Vakuumkammer des Beschleunigers ein großes kugelförmiges Gebilde von etwa 5 m Durchmesser entstanden. „Anlage zur Registrierung des Dirac-Monopols*", so heißt sie bei den Physikern offiziell. Ganz einfach formuliert, ist sie die neueste Konstruktion einer Falle für eines der gespenstischsten Teilchen, dem die Wissenschaftler schon lange einmal begegnen möchten.

Die elektromagnetischen Wechselwirkungen sind vermutlich das einzige Gebiet der gegenwärtigen Physik, bei dem „Theorie und Experiment bereits jetzt bis auf tausendstel Prozent übereinstimmen", wie Prof. J. Smorodinski sagt, „was den Physikern immer wieder ehrfürchtiges Erstaunen im Angesicht der allumfassenden Kraft der Elektrodynamik abnötigt, die die Prozesse in den Galaxien ebenso redlich beschreibt wie Vorgänge in den Atomkernen." Allerdings gibt es selbst hier in der Quantenelektrodynamik, in der viele Wissenschaftler das Urbild einer zukünftigen Theorie der Elementarteilchen sehen, noch „weiße Flecken". Einer davon besteht darin, daß die Elementarteilchen — sehr verschieden nach Masse, Lebensdauer und anderen Eigenschaften — die absolut gleiche elektrische Ladung besitzen, die exakt der Elektronenladung entspricht.

Die einzige Erklärung für diese ungewöhnliche Experimentaltatsache hat Dirac 1931 gegeben. Seine Gleichung für das Elektron, die der Elektrodynamik zugrunde liegt, hat zum ersten Mal die „Tür" in die Antiwelt aufgestoßen. Diese Gleichung erlaubte es Dirac auch, noch eine weitere wichtige Schlußfolgerung über die mögliche Existenz einer Partikel mit magnetischer Ladung, dem sogenannten Monopol, zu ziehen.

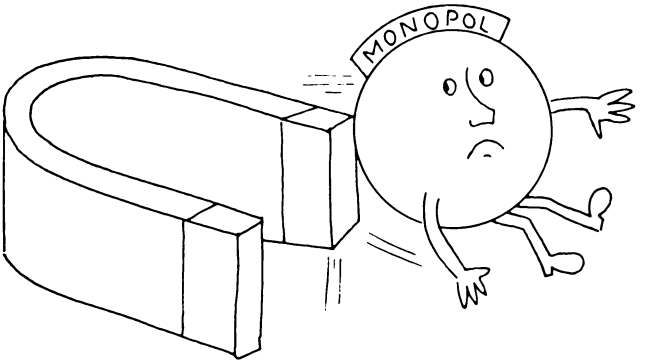
Wenn der Monopol Realität ist, dann folgt aus der Theorie, daß elektrische Ladungen stets ganzzahlige Vielfache des Elektrizitätsquants sein müssen, das wiederum gleich der Elektronenladung ist. Nachdem das Positron entdeckt war, begannen die Wissenschaftler, auch die zweite Voraussage ernstzunehmen.

Seit diese Idee ausgesprochen wurde, sind etwas mehr als vierzig Jahre verstrichen. Doch auch heute gibt es keinerlei andere Konkurrenzhypothesen. Naturgemäß bemühen

*Dirac-Monopole oder magnetische Monopole sind hypothetische Teilchen, die „magnetische" Ladung tragen.

sich die Experimentalphysiker seit langem darum, die Monopole nachzuweisen. Wie eine Fata Morgana in der Wüste neckt der Monopol die Vorstellungskraft der Wissenschaftler und veranlaßt sie, immer spitzfindigere Versuche zu seinem Nachweis zu unternehmen.

Wissen die Physiker eigentlich etwas über diese gespenstische Partikel? Erinnert ihre Suche nicht vielmehr an jene Situation, die in russischen Volksmärchen so bildhaft beschrieben wird: „Geh dorthin weißnichtwohin, finde das Weißnichtwas!“



Der Held einer Detektivgeschichte sagte einmal: „Ich habe nicht gelernt, Gespenster zu suchen, sondern muß über den Verbrecher wenigstens irgend etwas Konkretes wissen.“

Die Theorie macht es weder den Jägern auf Quarks noch den Jägern nach Monopolen leicht. Die einen wie die anderen haben nur ein einziges gesichertes Merkmal zur Verfügung. Das sind die gebrochene elektrische Ladung der Quarks und eine große magnetische Ladung bei der von Dirac vorhergesagten Partikel, die etwa das 70fache der Elektronenladung beträgt.

Das ist, wie Sie sehen, natürlich nicht viel. Doch wenn ein erfahrener Kriminalist selbst aus der Analyse des Staubes in der Kleidung des Verdächtigen den Ablauf des Verbrechens zu rekonstruieren vermag, kann sich der Physiker, ausgehend von der magnetischen Ladung der Partikel, eine gewisse Vorstellung von ihrem Verhalten in Materie machen.

Die Ladung ist ein außerordentlich wichtiges Indiz, das sich nicht verbergen läßt. Die sehr starke elektromagnetische Wechselwirkung ist es, worin sich der Monopol von allen anderen Elementarteilchen unterscheidet. Würde er in eine lichtempfindliche Emulsion eintauchen, dann müßte sich hier nach dem Entwickeln eine ebenso dichte und dikke Spur zeigen, wie sie von einem schweren Kern erzeugt wird.

Der Monopol mit seiner großen Ladung müßte dem Einfluß eines Magnetfeldes leicht „gehorchen". Selbst das schwache Erdfeld würde den Monopol ebenso stark beeinflussen wie ein elektrisches Feld von 10^7 V/m das Elektron!

Läßt sich dieser ungewöhnliche Umstand nicht irgendwie zum Nachweis des Monopols ausnutzen? Lange bevor die Hochleistungsbeschleuniger existierten, kam die Idee auf, freie Monopole in der Natur zu suchen, die eventuell mit der kosmischen Strahlung auf die Erde gelangt oder in der Erdatmosphäre entstanden sein könnten. Wo aber wären sie zu suchen? Niemand weiß ja, wohin sie geraten sind, nachdem sie einmal auf die Erde kamen.

Wieder hilft uns das Hauptmerkmal des Monopols weiter. Die magnetische Ladung läßt ihn besonders empfindlich für magnetische Stoffe werden. Die Partikel muß eine Driftbewegung längs der Kraftlinien des Magnetfeldes unseres Planeten ausführen und zwar so lange, bis sie auf ihrem Weg Eisen oder Eisenerze antrifft. Unter Wechselwirkung mit solchen Stoffen müßte sich die Partikel darin akkumulieren.

Ein Eisenspan, der in das Auge geraten ist, wird mit Hilfe eines Magneten entfernt, den man an das Auge heranbringt. Ebenso versuchte man mit Hilfe eines starken Magnetfeldes die Monopole „herauszuziehen", die möglicherweise in magnetischen Gesteinen „steckengeblieben" waren.

In den Adirondack Mountains der USA gibt es aus der Erdoberfläche hervortretende Magnetitgesteine, auf denen unmittelbar auf den Felsen ein hochleistungsfähiges Impulssolenoid installiert wurde. Im Zentrum des Solenoids und an der Oberfläche des Felsens betrug die magnetische Kraftflußdichte 6 Tesla. Im oberen Teil des Solenoids befanden sich Schichten aus lichtempfindlicher Emulsion, worin jeder aus den Gesteinen herausgezogene und im So-

lenoid beschleunigte Monopol unbedingt sein „Autogramm" hinterlassen müßte. Als man die Emulsion jedoch entwikkelte, zeigte sich, daß sie kein einziges der heißersehnten „Autogramme" enthielt.

Man versuchte, die Monopole auch aus Eisenmeteoriten „abzusaugen", die viele hundert Millionen Jahre durch die Weiten des Weltalls geirrt sind. Und man suchte sie in Proben magnetischer Minerale vom Ozeanboden. Die beim Zusammenstoß kosmischer Partikeln mit einer Energie bis 10^{20} eV mit der Atmosphäre entstehenden schnellen Monopole hätten sich hier im Verlauf von Jahrmillionen akkumulieren können. Doch die Suche war erfolglos. Die Wissenschaftler erwarteten weiterhin Spuren schneller kosmischer Monopole im Glimmer und in vulkanischem Glas zu finden. Aber auch hier war von den Teilchen keine Spur.

Vor einigen Jahren, als die Teilnehmer des Apollo-11-Mondfluges erstmals Mondboden zur Erde brachten, unternahm Professor Alvarez aus der Universität von Kalifornien einen originellen Versuch. Er beschloß, die Monopole in Mondbodenproben zu suchen. Der Mond hat ein recht solides Alter (3 bis 4 Mrd. Jahre), seine Oberfläche hat sich nur geringfügig verändert, und so hätte sich dort eine hinreichend große Zahl kosmischer Monopole akkumulieren können.

Das kostbare Gestein wurde auf einem langsam bewegten Band viele Male durch einen Schalterkreis aus supraleitfähigem Material gezogen. Monopole sind Ladungen und Urheber eines intensiven Magnetfeldes. Wenn das so ist, dann hätte in dem geschlossenen Leiter ein elektrischer Strom induziert werden müssen.

Der Untersuchung wurden nahezu alle 9 kg Mondboden unterzogen, den die amerikanischen Astronauten mitgebracht hatten. Ein induzierter Strom konnte aber nicht nachgewiesen werden.

Nun hätte man eigentlich endgültig schlußfolgern können, daß in der Natur keine Monopole existieren. Nicht so die Physiker. Niemand weiß ja genau, wie sich Monopole in Materie verhalten. Bei den Versuchen, diese Teilchen aus verschiedenen Stoffen „herauszuziehen", wurde stillschweigend vorausgesetzt, daß ihnen während der Akkumulationsdauer nichts geschehen ist. Doch woher kam diese Überzeugung?

Dazu gab es noch einen weiteren Unsicherheitsfaktor. Aus einigen Berechnungen zeigte sich, daß die Bindungsenergie der Monopole in Materie etwa der chemischen Bindungsenergie von nur einigen Elektronenvolt entspricht. Nach anderen Berechnungen dagegen konnte diese Energie einige hundert Millionen Elektronenvolt erreichen! Dann



allerdings war das Herausholen der Monopole aus Gesteinen mit Hilfe eines Magnetfeldes schlechthin unmöglich...

Die ersten Versuche in Berkeley mit Protonen einer Energie von 7 GeV veränderten die bestehende Situation nicht. Auch die Experimente mit Protonen einer Energie von 30 GeV bewirkten keine Änderung. Die Physiker vermuten, daß Paare von Monopolen ebenso wie andere Elementarteilchen beim Zusammenprall von Partikeln hoher Energie mit Materie entstehen können. Die Frage ist nur,

mit welcher konkreten Energie? Diracs Theorie gibt darauf keine Antwort. Die zur Erzeugung von Monopolen erforderliche Energie hängt von deren Masse ab, und gerade darüber wissen wir nichts.

So konnte in 20 Jahren ununterbrochener Suche nach diesen gespenstischen Teilchen kein einziges befriedigendes Ergebnis erzielt werden. Während einer so langen Zeit hätten die Wissenschaftler auch jedes Interesse am Problem des Monopols verlieren können.

Hören wir jedoch, was der Urheber der Monopoltheorie, Paul Dirac, noch vor einigen Jahren selbst gesagt hat: „Nachdem ich die Existenz des Positrons ermittelt hatte, kam ich auf den Gedanken, daß eine neue Partikel, der magnetische Monopol, existieren müsse. Diese Idee gründet sich auf mathematische Berechnungen von vollendeter Schönheit, und wir würden glücklich sein, wenn sich herausstellt, daß Monopole tatsächlich in der Natur existieren, so daß die hervorragenden mathematischen Berechnungen ihre Anwendung finden."

Dirac hat seine Vorhersage nicht aufgegeben. Der Anbau eines satellitenähnlichen, kugelförmigen Gebildes an der Kammer des Beschleunigers von Serpuchow ist der beste Beweis dafür, daß die Suche nach dieser Partikel mit ungemindertem Interesse fortgesetzt wird. Serpuchow hat eine neue Seite in dem Geschichtsbuch aufgeschlagen, in dem die Suche nach Diracs Monopolen verzeichnet wird. Die Energie, die die Partikeln im Beschleuniger erwerben, genügt zur Erzeugung von Monopolen, die 5mal so schwer wie Protonen wären.

Während der ersten Experimente in Serpuchow brachte eine Gruppe von Physikern des I. W.-Kurtschatow-Instituts für Atomenergie ein Target in einen Protonenstrom von ungeheurer Energie, worin — wie angenommen wurde — Monopole mit verschiedenen Vorzeichen der magnetischen Ladungen entstehen müßten. Das Magnetfeld des Beschleunigers hätte sie in die Gegenrichtung ablenken müssen, wo sich Akkumulationsfolien aus ferromagnetischem Material befanden. Nach 1 1/2 Jahren wurden die Folien, in denen sich die Monopole akkumulieren müßten, in ein Magnetfeld von über $1{,}6 \cdot 10^7$ A/m gebracht. Doch keine einzige Partikel konnte entdeckt werden.

Diese Experimente ähnelten nicht mehr der früheren Suche nach Monopolen in der Natur, die ein wenig an Schatz-

sucherei erinnerte. Jetzt wußten die Wissenschaftler genau, wo die rätselhaften Teilchen entstehen konnten, doch man versuchte sie leider nach dem Akkumulationsverfahren nachzuweisen, das bestimmte Mängel hat. Diese Mängel lassen sich nur überwinden, wenn man die Monopole ohne Verzögerung, d. h. im Augenblick ihrer Entstehung, registriert. Genau das ist die Aufgabe der Anlage, die am Beschleuniger von Serpuchow entstand. Diesmal beteiligte sich eine internationale Gruppe von Mitarbeitern des Vereinigten Instituts für Kernforschung an der Suche nach der Dirac-Partikel.

Jede geladene Partikel, die sich mit Überlichtgeschwindigkeit in Materie bewegt, verursacht eine elektromagnetische Strahlung, die nach ihrem Entdecker, dem Nobelpreisträger, Akademiemitglied Pawel Tscherenkow (geb. 1904), benannt ist. Heute ist das Registrierungsverfahren überschneller Partikeln anhand dieser Tscherenkow-Strahlung eines der wichtigsten Verfahren in der Hochenergiephysik.

Auf diesem Gedanken fußte auch das neue Experiment. Man machte sich die Tatsache zunutze, daß im Beschleuniger von Serpuchow Partikeln mit einer Geschwindigkeit entstehen können, die der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum nahekommt. Sobald derartige Partikeln in Materie geraten, erzeugt jede von ihnen die oben erwähnte Tscherenkow-Strahlung. Über eine besondere Schleuse wurde mit Hilfe einer automatischen Vorrichtung ein kleiner, sorgfältig polierter Kegel aus optischem Quarz in den Mittelpunkt der Vakuumkammer gebracht und dort befestigt. Beim Passieren dieses Quarzes, dem Herzstück des Tscherenkow-Zählers, müssen die beim Aufprall der Protonen auf den Quarz entstehenden Partikeln augenblicklich darin aufleuchten. Ein kompliziertes gekapseltes optisches System aus Linsen und Photovervielfachern sammelt und registriert dieses Licht.

Über eine Fernsehanlage beobachteten die Experimentatoren die Lage des Targets und sahen, wie es beim Auftreffen des Protonenbündels aufflammte und in allen Farben schimmerte. Völlig unwahrscheinlich schien es, daß die Photovervielfacher imstande sein sollen, inmitten diesen Leuchtens den Strahl aufzufangen, den gerade ein Monopol erzeugen würde.

Doch die Physiker zweifelten nicht am Erfolg. Ihr Gerät war mit 100prozentiger Wahrscheinlichkeit imstande,

jeden in der Anlage entstehenden Monopol zu entdecken, denn nach der Theorie, für die die Akademiemitglieder I. Tamm und I. Frank den Nobelpreis erhalten haben, emittiert eine magnetische Ladung zehntausendmal soviel Licht wie jede beliebige andere geladene Partikel.

Mehr noch, der Dirac-Monopol würde auch dann erfaßt, wenn er instabil sein sollte und nur für die Dauer eines Augenblicks besteht. „Ich bin einfach überzeugt davon", sagt der Versuchsleiter, der Kandidat der physikalisch-mathematischen Wissenschaften, W. Srelow, „daß die ‚magnetischen' Ladungen existieren. Vorläufig gibt es kein absolutes theoretisches Verbot, und ein solches Verbot auszudenken, ist keine Spur einfacher, als das Monopol zu entdecken. Sie wissen bereits, wie eine Reihe grundlegender, vielleicht dogmatischer Annahmen in der Physik im Bereich der schwachen Wechselwirkungen zusammengebrochen ist. Mir scheint, die gegenwärtige Situation sieht so aus, daß die Experimentalphysiker ein theoretisches Verbotsprinzip um so hartnäckiger attackieren, je schärfer es formuliert ist. Ich glaube, irgend jemand wird doch einmal das Glück haben, den Monopol zu entdecken."

* * *

1972 nahm der bisher größte Protonenbeschleuniger in Batavia in der Nähe von Chicago mit einer Energie von 400 GeV den Betrieb auf. Entstanden zu dieser neuen Anlage auch neue Aufgaben? Die Aufgaben waren die gleichen geblieben, da sie nach wie vor keine Lösung gefunden haben. Die hervorragende Anlage W. Nikitins mit dem Wasserstoffstrahl-Target reiste mit ihren Schöpfern über den Ozean zu Messungen in einem neuen Bereich der Protonenenergie. Mehr als die Hälfte aller Vorschläge zu Experimenten, die in Batavia ausgeführt werden sollen, betreffen die Suche nach Quarks und Dirac-Monopolen. Auch die hartnäckige Suche des sogenannten intermediären Bosons*, des Überträgers schwacher Wechselwirkungen, wird fortgesetzt. Große Bedeutung haben weiterhin Versuche mit Neutrinos mit bis dahin unzugänglicher Energie, die von starkem Interesse für die Überprüfung der neuen Theorie über schwache Wechselwirkungen von S. Wainberg sind. Diese Theorie

*Bosonen sind nach D. Bose benannte Teilchen mit ganzzahligem Spin.

hat einer der führenden Theoretiker als den größten Erfolg der letzten 15 Jahre bezeichnet. So sind alle Anstrengungen, wie wir sehen, auf einige wenige entscheidende Probleme gerichtet.

1969 hat der theoretische Physiker J. Schwinger den Kreis der experimentellen Probleme noch weiter eingeschränkt, indem er eine Hypothese aufstellte, nach der das Dyjon Bestandteil aller Elementarteilchen sein soll. Wo bleibt dann aber das Quarkmodell der Materie?

Sowohl die Monopole als auch die Quarks sind um ein Mehrfaches schwerer als die Protonen und werden mit Vorstellungen von der Existenz neuer Materiearten verknüpft. J. Schwinger hat die „Geschicke" dieser beiden Partikeln miteinander verbunden: Er hat das Problem der elektromagnetischen Wechselwirkungen — der Monopole von Dirac — mit dem Problem der Klassifikation der Elementarteilchen — mit den Quarks — verknüpft. Sollte der Monopol entdeckt werden, dann würde sofort auch klar werden, warum alle elektrischen Ladungen notwendigerweise Mehrfachladungen sind. Im gleichen Augenblick freilich verschwindet die Idee von den Quarks, d. h. von Partikeln mit einer Ladung von der Hälfte bzw. zwei Dritteln der Elektronenladung.

Das von Schwinger vorgeschlagene Dyjon rettet die Situation. Nur eine solche Partikel mit einer magnetischen Ladung könnte der Theorie zufolge eine gebrochene elektrische Ladung besitzen.

Die gebrochene elektrische Ladung dieses Hybridteilchens verträgt sich mit einer ganzzahligen Ladung, die ein Vielfaches der Elektronenladung darstellt, bei Elementarteilchen, die keine magnetische Ladung besitzen. Fände man die Dyjonen, dann könnte das sogar die Verletzung der CP-Symmetrie bei schwachen Wechselwirkungen erklären.

Werden die Experimentatoren imstande sein, klare Antworten auf die Fragen der Theoretiker zu geben? Werden diese Antworten genügen, um eine neue Theorie der Elementarteilchen aufzubauen? Vorläufig ist das unbekannt. Vielleicht wird sich alles im Laufe der nächsten Jahre entscheiden, vielleicht werden aber auch die erhaltenen Antworten in einen neuen Fragenkreis münden. Sicher ist nur die Unbegrenztheit des Unerkannten und die Unendlichkeit des glückseligen Weges der Erkenntnis.

Die große Wissenschaft

Einst und jetzt

Worin liegt das „Berufsgeheimnis“ der modernen Experimentalphysiker?

Früher konnte sich z. B. ein von der Wissenschaft weit entfernter Mensch, der hinter Rutherfords Rücken gestanden hätte, leicht als Teilnehmer an der Entdeckung des Atomkerns vorstellen, wenn er die auf dem Bildschirm aufleuchtenden Szintillationen beobachtete. Das war etwa so, wie wir uns vielleicht als Mitarbeiter eines Graveurs empfinden, weil wir alle Arbeitsgänge beobachten, die er nacheinander ausführt.

Chadwick benutzte für sein entscheidendes Experiment zur Entdeckung des Neutrons ein einziges Nachweisgerät, die Ionisationskammer. Sie besteht im einfachsten Fall aus einem Zylinder, der mit Luft oder einem Edelgas gefüllt und durch 2 isolierte, mit einer Spannungsquelle verbundene Plattenelektroden abgeschlossen ist. Ein in die Kammer eintretendes geladenes Teilchen erzeugt Ionenpaare, deren Anzahl insbesondere von der Art und der Energie der Teilchen abhängt.

Ein elektrischer Impuls am Ausgang der Kammer entsprach bei dem Versuch von Chadwick also dem Eintreffen eines geladenen Protons. Die Anschaulichkeit dieses Versuches ist zwar geringer als bei der Verwendung eines Szintillationsschirmes*, aber immer noch recht groß. Man brauchte nur die α-Strahlungsquelle ein Stück zur Seite zu tragen oder das vor der Kammer angeordnete Paraffin zu entfernen, aus dem die von den Neutronen herausgeschlagenen Protonen stammten, und das mechanische Nachweisgerät verstummte.

Rutherford hat große Entdeckungen unter Benutzung ganz primitiver Geräte gemacht, die er häufig auch selbst

*wird weiter unten genauer beschrieben.

anfertigte — fast könnte man sagen, aus leeren Konservenbüchsen. Zu seiner Zeit mußten die Physiker noch ohne Beschleuniger arbeiten, weil es sie noch nicht gab. Sie verwendeten radioaktive Strahlungsquellen und hatten es höchstens mit zwei verschiedenen Teilchenarten zu tun. Und wie „bequem" diese Partikeln waren! Sie waren entweder stabil wie die Elektronen und die Protonen oder langlebig wie die Neutronen. Ihr Nachweis verursachte keinerlei Schwierigkeiten:

Sie unterschieden sich nach dem erzeugten Ionisationsgrad voneinander. Jeder unerfahrene Neuling hätte ohne Schwierigkeiten ein α-Teilchen und ein Elektron auseinanderhalten können, und zwar einzig aufgrund der Größe des Impulses in der Ionisationskammer.

Doch die Einfachheit der Experimente zum Beginn unseres Jahrhunderts war nur scheinbar. Bei aller Primitivität der Geräte waren die Experimente zur Entdeckung des Atomkerns und der Elementarteilchen deshalb so unwahrscheinlich schwierig, weil es überhaupt die ersten Schritte in der Erforschung der Mikrowelt waren. Unerwartet zeigte sich die Materie den Wissenschaftlern in einer völlig neuen Qualität. Ohne den „Kompaß" der Theorie war es schwer, sich im uferlosen Ozean des Unbekannten zurechtzufinden. Die Quantenmechanik war erst im Entstehen, und von einer Theorie der Elementarteilchen konnte noch keine Rede sein. Unter diesen äußerst komplizierten Bedingungen den richtigen Kurs zu halten, war nur den bedeutendsten Physikern dieser Zeit möglich.

Heute hat sich der Schwerpunkt innerhalb der Experimentalphysik hoher Energien mehr zur Realisierung eines gedanklich bereits bekannten Experiments verlagert. Die zu untersuchenden Objekte sind so kompliziert, daß es schlechthin keine „einfachen" Methoden zu ihrer Erforschung mehr gibt. Gegenwärtig ist jedes beliebige Experiment im Bereich der Hochenergiephysik im Vergleich zu den früheren Versuchen ebenso viel komplizierter wie eine Atomuhr im Vergleich zur Sonnenuhr. Längst schon hat die Tätigkeit der Experimentalphysiker die Anziehungskraft ihrer ursprünglichen Einfachheit verloren.

Nur im Gedächtnis der Wissenschaftler der älteren Generation sind jene gar nicht einmal so weit zurückliegenden Jahre lebendig geblieben, als „das Schicksal eines physikalischen Experiments in den Händen eines guten Glas-

bläsers lag und als das Vorhandensein einer Drehbank im Labor bereits Grund zu optimistischen Prognosen war".

Die Entwicklung einer einmaligen Anlage — und jede moderne „gewöhnliche" Anlage ist einmalig — erfordert riesige materielle Mittel. Ihre Kosten erreichen einige Millionen Rubel. Darum wird jede Arbeit, die beispielsweise am Beschleuniger von Serpuchow ausgeführt wird, zunächst vom wissenschaftlichen Rat des Instituts für Hochenergiephysik beraten. Erst nach erfolgter Billigung gehen die Experimentatoren unmittelbar an die Entwicklung der erforderlichen Anlage.

Das wiederum ist, ohne Umschweife gesagt, eine extrem schwierige Aufgabe. Gelöst werden kann sie nur von Menschen, die das entscheidende Geheimnis ihres Berufes, die Kombination aus großem Wissen über die Eigenschaften und das Verhalten der Elementarteilchen und hoher Experimentierkunst kennen und beherrschen.

Ein Bad in flüssigem Wasserstoff

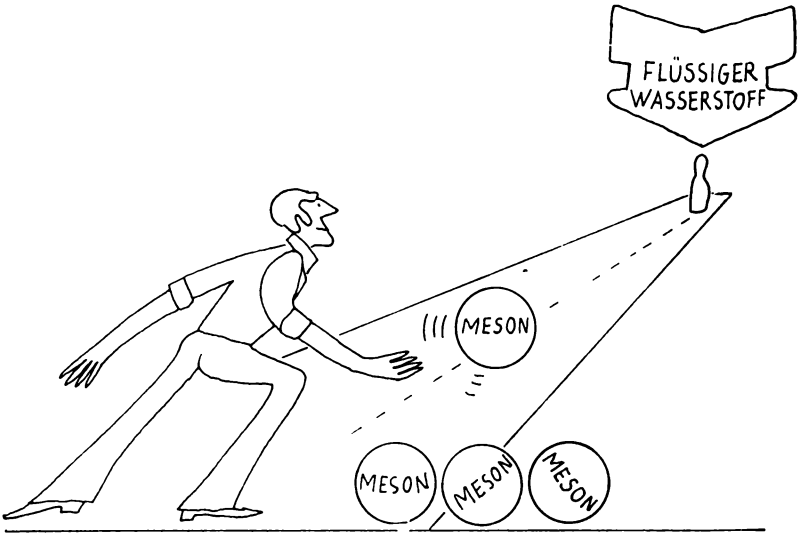
Die Nachprüfung des Pomerantschuk-Theorems mit Hilfe der K^0-Mesonen (das Ziel des Experiments) ist keine geniale Entdeckung, sondern, wie der Leiter dieser Gruppe I. Sawin sagte, „eine ganz durchsichtige Angelegenheit. Vor über 15 Jahren, kaum daß die Natur dieser Partikeln erkannt war, wurde auch klar, daß man mit ihrer Hilfe die Grundlagen der Theorie überprüfen könne. Doch das dazu erforderliche Experiment war so kompliziert, daß nur der gegenwärtige Entwicklungsstand der experimentellen Technik diese Idee praktisch realisierbar werden ließ."

Die Anlage zur Überprüfung dieses fundamentalen Theorems existiert; sie steht in Serpuchow. Selbst ein Meister des Sports würde mehr als 10 s benötigen, um die Entfernung zwischen dem Entstehungsort der schweren neutralen Partikeln in der Vakuumkammer des Beschleunigers und dem Ende des gesamten Versuchskomplexes zurückzulegen, der eine Länge von 100 m besitzt. Wir aber wollen uns Zeit lassen und diesen Weg in aller Ruhe gehen und an den wichtigsten Baugruppen der Anlage verweilen.

Im Verlauf der ersten 50 m geschieht mit den neutralen Kaonen nichts besonderes. Sie schlüpfen an einigen

Ablenkelektromagneten vorüber und passieren magnetische Linsen, die die anderen Partikeln entfernen. Dann tauchen sie in die Kollimatoren*, wo sie zu einem Bündel zusammengerafft werden.

Der Mesonenkanal, an dem wir nun vorübergehen, führt die größtmögliche Zahl von Partikeln „behutsam" zu dem aus flüssigem Wasserstoff bestehenden Target. Was ge-



schieht mit den langlebigen K^0-Mesonen nach ihrem Bad im flüssigen Wasserstoff?

Von Teilchen mit geringer Energie war bekannt, daß sie sich in kurzlebige K^0-Mesonen verwandeln müssen. Nun mußte man in Erfahrung bringen, wie sich die langlebigen K^0-Mesonen verhalten werden, wenn sie mit ungeheurer Energie in das Target einbrechen. War das Pomerantschuk-Theorem richtig und zeigten die Teilchen und Antiteilchen, aus denen die K^0-Mesonen bestehen, bei hohen Energien praktisch die gleiche Wechselwirkung mit den Protonen des Targets, dann mußten erheblich weniger kurzlebige Mesonen entstehen.

---

*Kollimatoren sind Abschirmungen aus Beton oder Metall zur Begrenzung des Querschnitts eines Strahls nergiereicher Teilchen.

An den Zustand des Wasserstoffs im Target stellten die Physiker eine Unzahl von Forderungen. Er sollte eine konstante Temperatur ebenso wie eine konstante Dichte besitzen. Die Hauptsache aber war: Er durfte in keinem Fall sieden! Bläschen, die die gesamte Schichtdicke des Targets durchziehen, sind ein heimtückischer Feind, weil sie unbemerkt die Targetdicke ändern. Diesen Vorgang aber hat man bisher nicht zu berücksichtigen gelernt. Es ist gar nicht so einfach, allen diesen Forderungen zu genügen, selbst dann nicht, wenn das Volumen des Flüssigwasserstofftargets klein ist. Bei diesem Versuch freilich mußte zur Vergrößerung der Zusammenstoßwahrscheinlichkeit von Kaonen und Protonen mit einem drei Meter langen Target gearbeitet werden!

So ordnete man ein entsprechend langes Rohr aus rostfreiem Stahl und gefüllt mit flüssigem Wasserstoff in einem zweiten Rohr von etwa 0,5 m Durchmesser an und evakuierte die Luft aus dem Zwischenraum zwischen beiden Rohren, um das Sieden des Wasserstoffs zu verhüten.

Jetzt allerdings entstand eine neue Schwierigkeit. Um den gewünschten Versuchsbedingungen zu genügen, durften die Kaonen auf ihrem Weg durch das Target weder vorher noch nachher auf zusätzliche Hindernisse stoßen. Diese Hindernisse aber existieren in Gestalt der Stirnwände des Targetrohres. Darum mußten die Fenster des Targets mit Polyesterfolie von 120 µm Dicke verschlossen werden. Unter dem Druck des flüssigen Wasserstoffs beulte sich allerdings die dünne Folie in Richtung des Vakuums aus. Das aber durfte auf gar keinen Fall zugelassen werden; aus dem Mesonenkanal käme ein Partikelbündel von einigen Zentimeter Durchmesser. Damit würde die Weglänge der verschiedenen Partikeln im Wasserstofftarget unterschiedlich und das Ergebnis des Experiments nicht eindeutig sein.

Die Lösung war wie immer unerwartet und ganz einfach. Man fertigte die Targetfenster aus zwei Polyesterschichten. In der inneren Folie wurde ein feines Loch angebracht, um einen Druckausgleich zu beiden Seiten dieser Folie zu bewirken; in den Zwischenraum zwischen beiden Folien konnte jedoch kein flüssiger Wasserstoff gelangen. Die originelle Konstruktion des Targetfensters und ein eigens für dieses Target konstruierter Druckregler ermöglichten es, die Wasserstoffmenge auf dem Weg der Partikeln für längere Zeit auf 0,05% genau aufrechtzuerhalten.

Der Blitz in der Schachtel

Wir haben das Target mit seiner komplizierten kältetechnischen Ausrüstung ebenso wie die beiden Steuerpulte hinter uns gelassen und gelangen nun zu der Stelle, wo die Physiker nur noch eine einzige Aufgabe zu lösen haben. Hier, 3 m vom Ende des Mesonenkanals entfernt, braucht man nur noch die Anzahl der kurzlebigen neutralen Mesonen auszuzählen, die aus dem Target austreten. Ihre Anzahl entspricht unmittelbar dem Unterschied in den Wechselwirkungswahrscheinlichkeiten für K^0- und Anti-K^0-Mesonen mit dem Wasserstoff. Das ist ganz einfach, nicht wahr?

Leider existieren die schweren kurzlebigen K^0-Mesonen nur unmittelbar nach ihrem Austritt aus dem Target und zerfallen danach sofort in die leichteren π^+- und π^--Mesonen. Darin liegt die größte Schwierigkeit des Experiments. Es genügt nicht, einfach zwei neue Partikeln zu registrieren, sondern überdies muß auch noch der Nachweis geführt werden, daß sie von einem Primärkaon, dem kurzlebigen K°-Meson, abstammen. Diese Aufgabe muß in Gegenwart einer großen Vielzahl störender Fremdpartikeln gelöst werden, die sowohl vom Beschleuniger als auch vom Target herrühren.

Aus dem Winkel zwischen den π-Mesonen sowie aus ihrer Energie läßt sich die Masse der Ursprungspartikel ermitteln. Stimmt diese mit der Masse eines K^0-Mesons überein, dann ist durchaus wahrscheinlich, daß die vorgefundenen geladenen Partikeln genau jene Partikeln sind, in die ein Kaon zerfällt, also π-Mesonen. Um auch in dieser Frage völlige Sicherheit zu erlangen, vergleicht man die Bewegungsrichtung der Partikel, die der Identität mit einem K^0-Meson „verdächtigt" wird, mit der Richtung des auf das Target auftreffenden Mesonen-Bündels. Beide Richtungen müssen übereinstimmen.

Für alle diese Messungen muß das Nachweisgerät innerhalb weniger milliardstel Sekunden unter einigen Millionen Partikeln die von den Physikern benötigten Teilchen „erkennen" und ihre Koordinaten im Raum auf Bruchteile eines Millimeters genau fixieren! Gut wäre es noch, wenn man die vorüberfliegenden Teilchen sehen könnte. Natürlich kann man die Elementarteilchen selbst nicht

beobachten, doch ihre Spuren in fotografischen Emulsionen „sichtbar“ zu machen, haben die Wissenschaftler bereits seit langem gelernt. (Solche Emulsionen wurden bereits zu Beginn der Entwicklung der Physik der Mikrowelt mit Erfolg benutzt, und mit dem gleichen Erfolg verwendet man sie auch heute. Ein Block, oder, wie die Physiker sagen, ein „Emulsionspaket“ wird am Versuch zum Nach-



weis des Dirac-Monopols am CERN-Beschleuniger beteiligt sein.)

Zur Überprüfung des Pomerantschuk-Theorems ist dieses Gerät leider nicht geeignet, da sich seine Funktion nicht steuern läßt. In den letzten Jahren ist für diesen Zweck eine neue Anlage, die sogenannte Funkenkammer, entstanden. Ohne ihre Verwendung könnten viele physikalische Probleme, darunter auch die Frage der K^0-Mesonen, nicht gelöst werden.

Der Aufbau einer Funkenkammer ist einfach. In einem abgedichteten und mit einem Edelgas gefüllten Behälter sind in einem bestimmten Abstand zueinander zwei Metallplatten oder -drähte angeordnet. Eine zwischen diesen Platten hindurchfliegende geladene Partikel hinterläßt auf ihrem Weg negative Elektronen, die sie den Atomen entrissen hat, und positiv geladene Ionen. Die an die Platten

angelegte Hochspannung vermittelt diesen Atombruchstükken eine zusätzliche Energie, so daß sie die Fähigkeit erwerben, ihrerseits Elektronen aus Atomen herauszuschlagen. Die neuen Elektronen und Ionen setzen diesen Vorgang fort, und im Ergebnis entsteht eine Lawine — ein Kanal ionisierten Gases. Nun ist der Weg für die Entladung frei, und an den Stellen des Gases, wo die Partikel hindurchgeflogen ist, tritt ein Überschlag ein. Es entstehen helleuchtende Funken, die die Bahnspur der Partikel sichtbar und der automatischen Messung zugänglich werden lassen.

Einen großen Beitrag zur Entwicklung dieser neuesten Methodik haben sowjetische Wissenschaftler geleistet. Ihnen ist gelungen, in den Entwicklungsprozeß des Entladungsvorganges einzugreifen. Durch Verkürzung des Hochspannungsimpulses an den Platten der Kammer gelang ihnen, die Entwicklung der Elektronenlawine beim Erreichen einer bestimmten kritischen Größe zu unterbrechen. Diese Unterbrechung erfolgt im sogenannten Streamerstadium, wo das elektrische Feld erst Zeit gefunden hat, die Köpfe der Entladungslawinen (Lawinenköpfe), die sogenannten Streamer, zu erzeugen*. Dadurch wurde eine sehr genaue Messung der Bahnspurkoordinaten möglich, unabhängig davon, unter welchem Winkel relativ zur Plattenrichtung die Bahnspur liegt.

Für die Entwicklung der Streamerkammer erhielt 1970 eine Wissenschaftlergruppe des Physikalischen Instituts der Akademie der Wissenschaften der Grusinischen SSR unter Leitung von G. Tschikowani sowie eine gemeinsame Gruppe von Wissenschaftlern des Physikalischen Instituts der Akademie der Wissenschaften der UdSSR und des Moskauer Ingenieurphysikalischen Instituts unter Leitung von Dr. B. Dolgoschein den Leninpreis.

Ungeachtet aller Vorzüge der Funkenkammer markierten die Funken darin nicht nur die Bahn „unserer“ π-Mesonen, sondern aller anderen geladenen Partikeln. Wie könnte man die Funkenkammer „veranlassen“, nicht auf diese anderen Partikeln zu reagieren?

Die einzige Möglichkeit bestand darin, sie nur für jene Teilchen einzuschalten, die von neutralen K^0-Mesonen „abstammen“. Die dafür notwendigen komplizierten Ge-

*Diese Ausführung der Funkenkammer wird auch als Streamerkammer bezeichnet.

räte in der Anlage zur Überprüfung des Pomerantschuk-Theorems haben eine Länge von fast 40 m. Die Experimentatoren gewannen eine klare Vorstellung von der Bahngeometrie der π-Mesonen, die vom Zerfall kurzlebiger K^0-Mesonen herrühren.

9 Funkenkammern vor dem Magneten und ebenso viele danach sind erforderlich, um die Partikelnkoordinaten im Raum hinreichend genau festzuhalten. Das heißt, dieses System ist imstande, Koordinatenänderungen festzustellen, die in der Größenordnung von 1 mm auf einer Länge von 5 m liegen!

Doch wenn man die Funktion der Funkenkammern ungesteuert läßt, würden diese ständig von den Bahnen der Hintergrundspartikeln „verstopft" sein. Es wäre dann schlechthin unmöglich, die uns interessierenden Partikeln herauszufinden. Andererseits kann man nicht vorher erraten, welche unter den in die Anlage gelangenden Partikeln registriert werden muß und welche nicht. Darum benötigt man eine gewisse Zeitreserve — und sei sie noch so gering — , um sich unter allen Partikeln zurechtzufinden.

Hier kommt uns nun die wichtigste Eigenschaft der Funkenkammer zu Hilfe. Wenn eine geladene Partikel die Kammer passiert hat, bildet sich zwischen ihren Metallplatten eine aus Ionen und Elektronen bestehende Bahn aus. Sie bleibt jedoch so lange unsichtbar, wie keine Hochspannung eingeschaltet ist. Im Verlauf von $1 \cdot 10^{-6}$s, während der die Teilchenpassage erfolgt, finden die Atomtrümmer keine Zeit, ihre Lage im Raum zu ändern. Darum ist die Kammer, selbst wenn sie mit dieser Verzögerung eingeschaltet wird, noch imstande, den Teilchenweg sichtbar zu machen.

So haben die Physiker $1 \cdot 10^{-6}$s gewonnen. In dieser Zeit müssen sie es nun fertigbringen, nicht nur „ihre" Partikeln zu erkennen, sondern außerdem noch den Befehl zum Einschalten der Funkenkammern zu erteilen.

Vom Monolog zum Dialog

Wie sehr unterscheiden sich doch heute die Arbeitsbedingungen der Experimentalphysiker von den Verhältnissen vor 30 Jahren!

Damals fand zwischen dem Forscher und dem Gerät eine aus langen Monologen bestehende gemächliche „Unterhaltung" statt. Erinnern Sie sich an unsere Schilderung, wie Rutherford sein Nachweisgerät nacheinander mit Luft, Stickstoff und Wasserstoff füllte und die Zahl der Szintillationen zählte, die von den aus der Kammer herausfliegenden Wasserstoffkernen ausgelöst wurden. Chadwick ermittelte zunächst die Zahl der Protonen, die von den Neutronen aus dem Paraffin herausgeschlagen wurden, nahm dann das Paraffin weg und überzeugte sich „in aller Ruhe" davon, daß nun keine Protonen mehr da waren. Dieses „Gesprächstempo" ist in der modernen Experimentalphysik hoher Energien schlechthin undenkbar. Heute muß die Unterhaltung lebhafter sein und möglichst keine Pausen aufweisen.

Schon seit langem haben die Experimentalphysiker den Szintillationszähler in ihrem Arsenal. In den Szintillationszähler einfallende geladene Partikeln erzeugen einen Lichtblitz, der von einer empfindlichen Photovervielfacherröhre sofort in einen elektrischen Impuls umgewandelt wird. Mit Hilfe dieses Zählers lassen sich anhand der Impulsamplitude Protonen leicht von Elektronen und Mesonen unterscheiden, wenn ihre Energieinhalte nicht allzu groß sind. Bei relativistischen, sich nahezu mit Lichtgeschwindigkeit bewegenden Teilchen sehen jedoch alle Impulse gleich aus, und die „Partikelnsorte" läßt sich nicht mehr feststellen. Die in der Hochenergiephysik arbeitenden Experimentatoren haben in diesem Gerät jedoch eine wertvolle Eigenschaft erkannt: Das Signal bezüglich jeder vorübergeflogenen Partikel geht aus dem Szintillationszähler sehr rasch, nämlich innerhalb von $1 \cdot 10^{-9}$ s ein. Das war genau das, was man brauchte.

Längs der gesamten Anlage sind etwa 50 Szintillationszähler angeordnet. Sie befinden sich vor den Funkenkammern sowie vor und hinter dem Magneten. Die Zähler sind so installiert, daß alle zu registrierenden Partikeln notwendigerweise zunächst die Zähler passieren müssen. Nun kann man aus der Reihenfolge der eingehenden Impulse — sie entspricht der Bahngeometrie der Partikeln innerhalb der Anlage — die π-Mesonen ermitteln, die durch Zerfall neutraler Kaonen entstehen und den Funkenkammern den Befehl zum Einschalten geben.

Das π-Meson ermitteln, ist leicht gesagt! Selbst der vielseitigste Mensch ist nicht imstande, alles das in Sekundenbruchteilen auszuführen. Darum treten besondere, „logische“ Schaltungen an seine Stelle. Sie vollbringen das Meisterstück, die Impulse aller Szintillationszähler im Verlauf von $1 \cdot 10^{-9}$ s zu analysieren. Nur wenn zwei Partikeln gleichzeitig sämtliche Zähler in der festgelegten Reihenfolge passiert haben, faßt die elektronische Schaltung sie als gesuchte Partikeln auf und gibt die Erlaubnis zum Einschalten der Kammern. Dann erst kommt es an den Stellen in jeder Kammer, wo die Partikelnpassage erfolgte, zur Funkenentladung. Über ein Gewirr vieler Drähte beginnt nun aus jeder der 18 Kammern die gewünschte Information über die Koordinaten (x und y) der Partikelnbahn im betrachteten Raumpunkt in Form elektrischer Impulse „zu fließen“.

So haben wir nun den ganzen Mesonenkanal und die Versuchsanlage zur Registrierung kurzlebiger K^0-Mesonen, die im Flüssigwasserstofftarget entstehen, Meter für Meter abgeschritten.

Doch was wir bisher sahen, ist noch nicht die vollständige Aufzählung aller wichtigen Baugruppen der Anlage. Ein wenig abseits, im „Experimentierhäuschen“, wo sich die Forscher während des Beschleunigerbetriebes aufhalten können, stehen Gestelle mit einigen 100 elektronischen Baugruppen, gespickt mit unzähligen Transistoren, in die die von der Anlage stammenden Impulse eingehen. In einem weiteren Raum schließlich ist das Gerät angeordnet, wo alle Information zusammenfließt. Hier erfolgt die Kontrolle aller Geräte gleichzeitig sowie jedes Gerätes im einzelnen. Ohne diese Kontrolle würde sich die Anlage, die „das letzte Wort“ in der experimentellen Wissenschaft und Technik darstellt, in eine ganz gewöhnliche Ausstellung moderner Geräte und Apparaturen verwandeln. Natürlich handelt es sich bei dieser Kontrollanlage um eine EDVA.

„Früher, d. h. vor der Entwicklung der Methodik der Experimentdurchführung in einer Linie mit der EDVA“, sagte I. Sawin, „war es einfach sinnlos, derartige Versuche zu unternehmen.“ Der Informationsumfang ist so groß, daß ein Rechner, der seinen Speicher bis an die Grenze der Leistungsfähigkeit belastet und bei höchstmöglicher Geschwindigkeit arbeitet, kaum mit der Aufnahme und Auf-

zeichnung der Angaben über die Bahnen der erforderlichen Teilchen auf Magnetband nachkommt.

Wieder ist eine Arbeitsperiode am Beschleuniger zu Ende. Schwer bepackt mit höchst wertvoller Fracht in Form der auf Magnetbänder codierten Versuchsergebnisse kehren die Physiker heim. Nun beginnt eine neue Arbeitsetappe, zu der die Wissenschaftler nicht den Beschleuniger, sondern einen Rechner zur Verarbeitung des „Informations-Halbfertigerzeugnisses" benötigen.

Im Hauptrechenzentrum von Dubna steht ein Rechner großer Leistung und hoher Arbeitsgeschwindigkeit. Nach einem besonderen mathematischen „Rekonstruktionsprogramm" reproduziert er aus den fixierten Bahnabschnitten das Gesamtbild des Zerfalls der kurzlebigen neutralen K^0-Mesonen. Die Maschine ermittelt selbständig den Zerfallspunkt, den Winkel zwischen den π-Mesonen und — aus der Ablenkung dieser Partikeln im Magnetfeld — auch deren Energie.

Sobald nun alle mit den im Flüssigwasserstofftarget entstandenen Kaonen verknüpften Ereignisse reproduziert und ihre Kenndaten in geeigneter Form auf neuen Magnetbändern gespeichert sind, wandern diese Bänder zur weiteren Verarbeitung.

Ungeachtet der Tatsache, daß die „logischen" Schaltungen ihre „Pflicht" erfüllt haben, ähneln einige der festgehaltenen Ereignisse nur äußerlich jener Kernreaktion, zu deren Erkundung diese ganze komplizierte Versuchsanlage eigens geschaffen worden ist; es kann sich um zufällige Ereignisse handeln. Darum gehört auch hier den Physikern das „letzte Wort".

Die von der internationalen Physikergruppe unter Leitung von I. Sawin erhaltenen Bänder mit den Ergebnissen wurden kopiert und in Dubna, Prag und Budapest endgültig bearbeitet. Ein großes Wissenschaftlerkollektiv benötigte zur Prüfung des Pomerantschuk-Theorems an Protonen, Neutronen sowie an Kernen des Wasserstoffisotops Deuterium einige Jahre angestrengter Arbeit. Eines der wichtigsten Theoreme in der modernen Physik konnte bestätigt werden: Je größer die Teilchenenergie ist, um so geringer ist auch der Unterschied im Verhalten dieser Teilchen und ihrer Antiteilchen.

Ein Wasserstoffstrahl als Target

Man sagt, daß Ideen wertvoll sind. Das ist richtig. Und doch spielt sich das „Drama der Ideen“ in unserer Praxis meist nicht in den höheren Regionen des Geistes, sondern in der Ebene ihrer Realisierung ab, meinen die Experimentalphysiker.

Während man für den Versuch mit den Kaonen ein nach Größe und Eigenschaften einmaliges Target brauchte, das eine verhältnismäßig große Wasserstoffmenge enthielt, benötigte man für die Experimente über die Streuung von Protonen an Protonen, die in Serpuchow unter der Leitung von W. Nikitin ausgeführt wurden, ein superdünnes Target mit einer Dichte von nur $1 \cdot 10^{-6}$ g/cm^3.

Jede Hülle, in die man ein solches Target aus gasförmigem Wasserstoff gebracht hätte, mußte alle Ergebnisse äußerst stark verfälschen. Der Trick des Versuchs bestand aber gerade darin, in Erfahrung zu bringen, wie sich schnelle Protonen beim Zusammenstoß mit einem Target aus reinem Wasserstoff verhalten. So wurde im Laboratorium hoher Energien des Vereinigten Instituts für Kernforschung zum ersten Mal in der Welt ein einmaliges Target in Gestalt eines Wasserstoffstrahls entwickelt, der sich im Inneren der Beschleunigerkammer befand.

Heute fällt es sogar den Schöpfern dieser originellen Anlage schwer zu sagen, ob die Idee am Anfang mehr Gegner oder mehr Anhänger gehabt hat. Auch bedeutende Wissenschaftler zweifelten an ihrer Realisierbarkeit, und zwar nicht ohne Grund.

Die Protonen im Beschleuniger von Serpuchow erreichten eine Energie von 70 GeV. Sie bewegten sich in einer Vakuumkammer auf einer geschlossenen Kreisbahn, wo der Druck mit größter Sorgfalt bei 10^{-7} Torr gehalten wurde. Wenn sich das Vakuum auch nur um ein Geringes verschlechterte, nahm die Anzahl der beschleunigten Protonen schlagartig ab: Beim Zusammenprall mit Luftpartikeln gerieten die Protonen an die Wände der Kammer und fielen damit aus dem Beschleunigungsprozeß heraus. Ihre Bewegung ähnelte dann eher dem Verhalten der Scheibe unter den Schlägen eines Hockey-Anfängers. Und trotz dieser „harten“ Vakuumbedingungen mußte regelmäßig eine Wasserstoffmenge in die Kammer injiziert werden, die zur

Druckerhöhung im Gesamtvolumen des Beschleunigers geführt hätte. Ein plötzliches Zusammenbrechen des Vakuums in der Beschleunigerkammer während des Versuchsablaufs hätte aber andererseits elektrische Durchschläge in den Hochfrequenzanlagen hervorgerufen, und der in seiner Art einmalige Beschleuniger wäre für längere Zeit ausgefallen.

Das Problem, dem sich die Konstrukteure hier gegenübersahen, erinnerte an die Situation, in der sich der Held eines orientalischen Märchens befand, als er unüberlegt die Flasche mit dem darin eingeschlossenen Geist öffnete. Um dieser „märchenhaften" Situation zu entgehen, beschlossen die Konstrukteure, den Geist in Gestalt eines Strahls aus gasförmigem Wasserstoff zwar aus der Flasche herauszulassen, doch dafür am anderen Ende eine neue Flasche, nämlich eine Vakuumpumpe, bereitzuhalten.

Immer wieder unternahmen die Kältetechniker des Hochenergielaboratoriums im Vereinigten Institut für Kernforschung Modellversuche, bis sich das Hochvakuum und der dichte Gasstrom einander nicht mehr widersprachen und sich die Konstruktion der zukünftigen Anlage abzuzeichnen begann.

Der aus einer Spezialvorrichtung mit Überschallgeschwindigkeit entlassene gasförmige Wasserstoffstrahl durchquerte ein Bündel schneller Protonen im Inneren der Beschleunigerkammer und übernahm für diesen Augenblick die Rolle des Targets. Unmittelbar darauf gelangte er in den „Hals" einer Heliumkondensationspumpe, die tatsächlich einer bauchigen Flasche ähnlich sieht. So wurde der in die Kammer eingelassene „Geist" in Sekundenbruchteilen wieder gebändigt, weil die Pumpe das Gas, das eben noch bereit war, sich nach allen Richtungen hin auszudehnen, sofort in einen unbeweglichen und völlig ungefährlichen Wasserstoffreif verwandelte.

Im März 1968 wurde mit dem Transport der fertiggestellten Anlage vom Vereinigten Institut für Kernforschung Dubna nach Serpuchow begonnen. Als eines der ersten Geräte kam sie in den riesigen, noch leeren Saal des Beschleunigers. Nun setzte eine monatelange angestrengte Arbeit zur Herstellung der Betriebsbereitschaft ein. Und schließlich kam auch der Tag, an dem — rund um die Uhr — die Messungen der Versuchsergebnisse anfingen.

Während sich die Physiker mit der Bearbeitung der erzielten Ergebnisse befaßten, fuhren die Konstruktions-

ingenieure fort, die Methodik des Strahltargets zu verbessern. Es mußte eine geringere Strahlbreite erreicht werden, um die Fehler in der Bestimmung der Austrittswinkel der Sekundärpartikeln zu beseitigen, die bei der Wechselwirkung der beschleunigten Protonen mit dem Target entstanden. Außerdem hatte sich gezeigt, daß das Strahltarget bei bestimmten Versuchen doch keine ausreichende Dichte aufwies, wodurch die Versuchszeit am Beschleuniger erhöht wurde.

Der Ausweg wurde gefunden, indem man den Strahl verdichtete: Von einem Gasstrahl mit Überschallgeschwindigkeit wechselte man zu einem Strom von Flüssigwasserstoffpartikeln mit geringerer Geschwindigkeit über. Die Breite dieses neuen Targets aus kondensiertem Wasserstoff hatte sich auf ein Viertel verringert, die Dichte war verzehnfacht worden, und die Menge des in den Beschleuniger eintretenden Gases nahm auf die Hälfte bzw. ein Drittel ab.

Im Frühjahr 1972 reiste die Gruppe W. Nikitins mit einigen Mitarbeitern der kältetechnischen Abteilung nach den USA. Sie sollte dort Versuche am neuen Beschleuniger in Batavia ausführen, der gerade erst in Betrieb genommen worden war und mit einer Energie von 400 GeV die leistungsfähigste Anlage in der Welt darstellt.

Die mit Hilfe dieses Beschleunigers erzielten ersten Meßergebnisse wurden bereits im Sommer 1972 auf der Konferenz über Hochenergiephysik in Batavia veröffentlicht.

Die „industrialisierte“ Wissenschaft

Betrachten wir den Versuchssaal eines modernen Beschleunigers. Eine 100 m lange Anlage, die unter dem gleichförmigen Brummen der Elektromagnete völlig automatisch arbeitet. Erinnert sie nicht an einen modernen Industriebetrieb mit seinen automatischen Taktstraßen? Der Unterschied besteht nur darin, daß man im Werk jederzeit an die Taktstraße herantreten und die einzelnen Anlagen nachregeln kann, wenn irgend etwas aus dem Tritt geraten ist. Für die Physiker bedeutet das gleiche Problem jedoch, daß der Beschleuniger abgeschaltet werden muß. Außerdem

können sie die in ihrer Anlage bearbeiteten „Teile“ nicht mit eigenen Augen sehen.

Eine Taktstraße wird gewöhnlich von einigen Operatoren bedient. Das gleiche Bild finden wir auch hier. An dem Versuch zur Überprüfung des Pomerantschuk-Theorems beispielsweise waren 50 Szintillationszähler, 18 Funkenkammern und der große Magnet beteiligt, die rund um die Uhr von 4 Personen überwacht und gewartet wurden. Zwei Personen vom Wartungspersonal sind mit den elektronischen Schaltungen beschäftigt, die die im Versuchsverlauf gewonnene Information empfangen und an den Rechner weitergeben. Zwei weitere Personen arbeiten unmittelbar am Rechner, nämlich dort, wo der Informationseingang in den Rechner verfolgt und die Funktion der einzelnen Zähler sowie der Anlage insgesamt kontrolliert werden kann.

Die Rechner bilden heute das Herz moderner Versuchsanlagen. Schon seit langem haben die Physiker Rechenmaschinen in ihren Dienst gestellt. Allerdings wurden sie früher nur zur Bearbeitung der Ergebnisse verwendet. Im Gegensatz dazu wird ihnen heute bei den größten Beschleunigern der Posten des „Dirigenten“ für den Gesamtversuch übertragen.

Kürzlich hat W. Nikitins Gruppe in Serpuchow ein 700-Stunden-Experiment abgeschlossen. Während dieser Zeit war der Rechner BESM-3M ununterbrochen mit dem Sortieren und Aufzeichnen der Information beschäftigt. Ohne die Hilfe der Maschine hätten die Wissenschaftler allein für die Niederschrift der Ergebnisse einen Heftstapel von 1 km Höhe benötigt!

„Die Arbeit an einem modernen Großrechner“, sagte W. Nikitin, „ist ein reines Vergnügen. Das gilt besonders für die Augenblicke, in denen der Leser die Karten nicht zerreißt, das Magnetband nicht im unpassendsten Moment zurückspult, das Tonbandgerät die eigene Programmbibliothek nicht irrtümlich löscht, wenn die parallel mitlaufende Aufgabe ihr eigenes Programm nicht herauswirft, weil an der Magnettrommel die Information überläuft, und wenn Ihnen die lieben Facharbeiterinnen für Datenverarbeitung mit einem strahlenden Lächeln mitteilen, daß Ihr Zeitlimit zwar abgelaufen ist, sie Ihnen aber gern 30 s zugeben (natürlich auf Konto des Zeitlimits von morgen).“

Es ist noch gar nicht so lange her, daß der Experimentalphysiker Alvarez in seiner Rede aus Anlaß der Verlei-

hung des Nobelpreises sagte, „die Zeit ist vorüber, als man am Schluß von Artikeln, die von einem einzigen Physiker unterzeichnet waren, den Satz lesen konnte: ‚Ich möchte Herrn Sowieso für die Entwicklung der Apparatur und für die Erzielung des größten Teiles der Ergebnisse danken.'"

Heute sind wissenschaftliche Mitarbeiter, Ingenieure, Programmierer und qualifizierte Laboranten mit Hochschulbildung gleichberechtigte Mitautoren der gemeinsam vollbrachten Arbeit. Der Artikel über die Prüfung des Pomerantschuk-Theorems am Wasserstofftarget war von 28 Autoren unterzeichnet! Unter ihnen befanden sich einige Physiker sowie mehrere Elektronikingenieure, Spezialisten für Funkenkammern und Mitarbeiter des Rechenzentrums im Vereinigten Institut für Kernforschung.

Natürlich bedeutet dies keineswegs, daß in der Elementarteilchenphysik nicht auch kleine Wissenschaftlergruppen arbeiten. Innerhalb solcher Gruppen gelingt es gelegentlich, dank überragender Ideen mit Hilfe relativ bescheidener Mittel glänzende Ergebnisse zu erzielen. Dies gilt besonders für diejenigen Physiker, die an Beschleunigern mit einer Energie bis 1 GeV arbeiten. Bei Maschinen mit einer Energie von einigen Dutzend GeV oder darüber müssen sich die Experimentatoren dagegen zu großen Gruppen zusammenschließen. In derartigen Kollektiven, die unter Einsatz moderner großtechnischer Mittel und Rechner arbeiten, existiert eine klar ausgeprägte Arbeitsteilung.

„Da die Forschungsarbeiten Massencharakter annehmen", sagte Akademiemitglied B. Kadomzew, „kommt es nicht selten vor, daß auf den Anteil des einzelnen wissenschaftlichen Mitarbeiters vergleichsweise geringfügige Aufgaben entfallen. Dies stellt nun einen gewissen Mangel der modernen Wissenschaft dar. Es steigt die Anzahl von Menschen, die gezwungen sind, derartige Aufgaben zu lösen."

Zweifellos hat sich der Charakter der Arbeit jedes Mitgliedes in einem großen wissenschaftlichen Kollektiv verändert. Doch zu den Aufgaben großer Gruppen gehört auch die Lösung wissenschaftlicher Probleme, von denen jene Forscher nicht einmal träumen konnten, die zur Zeit der „handwerklichen Manufakturarbeit" in der Wissenschaft tätig waren.

Den Mitarbeitern großer Gruppen macht die Arbeit an komplizierten Anlagen in der Regel Freude, und niemand

braucht ihren Enthusiasmus anzuheizen. Wesentlich schwerer fällt dies gelegentlich einem Absolventen, der in ein wissenschaftliches Institut eintritt. Erzogen im Geiste klassischer Beispiele aus der Geschichte der Physik, ahnt er zuweilen nicht einmal etwas von der Existenz der modernen „großen" Wissenschaft, wo viele Kollektive mit einer äußerst komplizierten Arbeit befaßt sind, deren Ergebnis sich erst in einigen Jahren erwarten läßt. Der Absolvent dagegen wünscht sich eine Tätigkeit, die ihn rasch zu einer Entdeckung führt. Und wenn er schließlich einsieht, daß dies schlechthin unmöglich ist, wird er oftmals vom Gefühl der Enttäuschung überwältigt.

Warum ist das so? „Die Wissenschaft ist heute sehr kompliziert", diese Auffassung vertritt Akademiemitglied B. Kadomzew, „und nur wenigen gelingt es, herausragende Erfolge zu erzielen. Stellt sich nun ein Student, der kurz vor dem Abschluß der Universität steht, von vornherein dieses Ziel, dann leuchtet ein, daß er sehr wahrscheinlich mit einem Mißerfolg rechnen muß. Vielleicht kann er schließlich zu seinem ‚jugendlichen Maximalismus' zurückfinden, nun bereits auf einer anderen Grundlage, nachdem er nämlich seine Fähigkeiten weiterentwickelt und sich davon überzeugt hat, daß seine eigenen Kräfte dem ins Auge gefaßten Ziel angemessen sind."

Der Charakter der Wissenschaft hat sich in den letzten 3 bis 4 Jahrzehnten stark verändert. Allerdings „haben die wissenschaftlichen Untersuchungen den altmodischen Geist unermüdlicher schöpferischer Suche behalten".

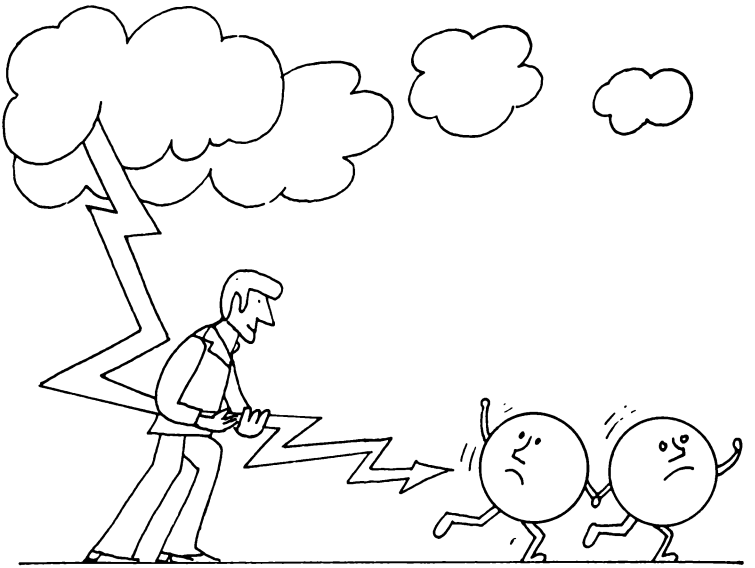
Der „Zauberstab"

Die schöpferische Unruhe war es, die dem damals längst nicht mehr jungen Ernest Rutherford keine Ruhe ließ. 1924 gelang es ihm, alle die leichten Kerne zu spalten, in die α-Teilchen eindringen konnten. Aber was weiter?

Der Nobelpreisträger F. Aston schrieb in jenen Jahren: „Nun ist die unvermeidliche Ruhepause eingetreten, in der wir auf die Entdeckung neuer Untersuchungselemente warten müssen." Es ist durchaus verständlich, daß Rutherford diese Periode des Stillstandes besonders unangenehm empfand. Er hatte kein „Werkzeug" zur Hand, um das

vor ihm liegende „atomar Neuland“ zu bearbeiten. Ja, wenn ihm Partikeln großer Energien zur Verfügung gestanden hätten...

Rutherford bat seinen Laboranten Key herauszufinden, ob man ein System aus Batterien oder Dynamomaschinen zur Erzeugung starker elektrischer Felder aufbauen könne? Als Key seinem Chef die Kostenaufstellung für eine derartige Anlage zeigte, die im Vergleich zu den Maßstäben



von heute gar nicht der Rede wert war, ließ Rutherford das Projekt „wie eine heiße Kartoffel fallen“.

Uns, die wir im Zeitalter gewaltiger Beschleuniger wie der in Serpuchow oder jener in Batavia leben, fällt es schwer, sich vorzustellen, daß die Herstellung von Anlagen zur Erzeugung hoher Gleichspannungen zu Rutherfords Zeiten unmöglich erschien.

Eine Gruppe italienischer Physiker unternahm den Versuch, Partikeln mit Hilfe von Blitzentladungen in den Bergen zu beschleunigen. Allerdings waren derartige Experimente mit einer so unbeständigen „Stromversorgungsanlage“ zumindest sehr unbequem.

Dann kam das Jahr 1932, als Rutherfords Mitarbeiter — seine „boys", wie er sie nannte — J. Cockcroft und und E. Walton einen Protonenstrahl erhielten, der in einer Entladungsröhre auf eine Energie von fast 1 MeV beschleunigt worden war. Das war damals ein glänzender Sieg. Zum ersten Mal in der Geschichte der Physik konnte man von künstlich beschleunigten Partikeln ausgelöste Kernreaktionen beobachten. Man kann Bohrs Begeisterung verstehen, der diese primitive Anlage in einem Brief an Rutherford als „leistungsfähiges Werkzeug" der Wissenschaft bezeichnete.

So begann die Ära der Beschleuniger in der Physik der Elementarteilchen. Der nächste wichtige Schritt war die Entwicklung des ringförmigen Beschleunigers durch E. Lawrence, den wir unter der Bezeichnung Zyklotron kennen und dessen Form die modernen gigantischen Maschinen „geerbt" haben. Das Funktionsprinzip des Zyklotrons erlaubte, die Partikeln allerdings nur bis zu Energien von einigen Dutzend Millionen Elektronenvolt zu beschleunigen. Man darf sagen, daß die eigentliche Geschichte der Beschleuniger, die in der Erkenntnisgeschichte der Mikrowelt eine ungeheure Rolle gespielt haben, 1944 begann. In diesem Jahr berichtete der sowjetische Wissenschaftler W. Weksler über die Entdeckung des Prinzips der automatischen Phasenstabilität*. Der Weg zu hohen Energien war frei.

Heute sind Beschleuniger mit Energien von einigen Milliarden Elektronenvolt und darüber in der Hand der Physiker zu jenem „Zauberstab" geworden, mit dessen Hilfe man zu jedem gewünschten Zeitpunkt ein „farbenprächtiges" Bild der verschiedensten Elementarteilchen erhalten kann.

Erinnern Sie sich daran, wie das alles geschieht: Die auf eine ungeheuer hohe Energie beschleunigten Protonen prallen mit dem Target zusammen, das sich entweder im Inneren einer Vakuumkammer oder an der Austrittsstelle des Protonenstrahls aus dem Beschleuniger befindet. Im Anschluß daran fliegen nach allen Seiten Neutronen, Protonen, Mesonen, Resonanzen u. a. auseinander.

*Unter automatischer Phasenstabilität ist die Synchronisierung zwischen der Frequenz der Beschleunigungsspannung und der Umlauffrequenz der zu beschleunigenden Teilchen zu verstehen.

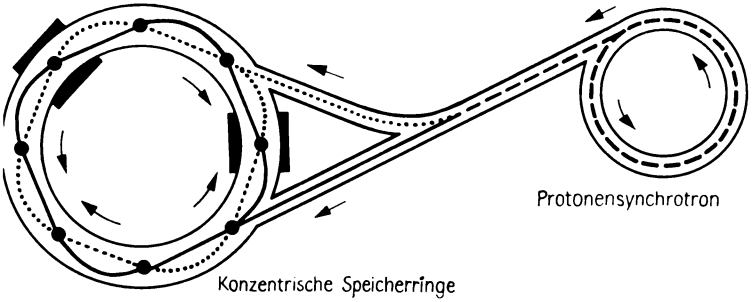
Leider wird nicht alle Energie der zusammenprallenden Teilchen zur Erzeugung neuer Partikeln aufgewendet. Die Masse der schnellen beschleunigten Protonen ist erheblich größer als die Masse der im ruhenden Target befindlichen Protonen. Beim Zusammenstoß geht ein gewaltiger Energieanteil des Geschoßprotons in Gestalt der Bewegungsenergie beider Teilchen verloren. So bleibt für die Erzeugung neuer Partikeln nur ganz wenig Energie übrig. Nur dann, wenn Teilchen mit gleicher Geschwindigkeit, aber genau entgegengesetzter Richtung aufeinanderprallen, kann Gesamtenergie in Wechselwirkungsenergie verwandelt werden. Aber ist es überhaupt möglich, den beschleunigten Protonen ein Target fast mit Lichtgeschwindigkeit entgegenzuschleudern?

Warum eigentlich nicht? Der Einsatz würde sich lohnen. Läge die Geschwindigkeit der einander begegnenden Partikeln in der Nähe der Lichtgeschwindigkeit, dann müßte sich der Wechselwirkungseffekt nicht vervierfachen, wie aus der Newtonschen Mechanik folgt, sondern aufgrund der Relativitätstheorie den 4000fachen Wert annehmen. Beim Zusammenprall zweier Elektronen mit einer Energie von 1 GeV wäre ihr Wechselwirkungseffekt einer Beschleunigerenergie von 4000 GeV äquivalent!

Soll man sich diesen Vorgang vielleicht in einem Beschleuniger ohne ein gewöhnliches Target vorstellen? Oder ist es ein Beschleuniger mit einem Target, das auf Lichtgeschwindigkeit „hochgedreht" ist? In diesem Fall würde sich allerdings das Target selbst in einen Strahl beschleunigter Protonen verwandeln. So entstand die Idee, Protonen mit möglichst hoher Energie gegeneinander zu schießen, anstatt nur ein hochenergetisches Teilchen auf eine ruhende Partikel treffen zu lassen. Die praktische Realisierung sieht freilich nicht so aus, daß man zwei Beschleuniger einander gegenüberstellt und sie ihre Protonenstrahlen kreuzen läßt wie einst die Degen im Turnier. Das Prinzip des sogenannten Speicherringbeschleunigers beruht vielmehr darauf, daß ein ganz normaler Beschleuniger einen Speicher in Gestalt eines einfachen Magnetrings (wie beim Synchrotron) längere Zeit hindurch mit hochbeschleunigten Protonen „füttert". Im extremen Vakuum dieses Speicherrings können die Protonen mehrere Stunden ohne Zufuhr von Hochfrequenzenergie umlaufen. Während dieser Zeit wird ein weiterer Speicherring „aufgepumpt", bei dem die Bewe-

gungsrichtung der Protonen gerade entgegengesetzt ist. Nun kann man die aufgespeicherten Protonen mit einem Schlag aufeinander loslassen.

Die Speicherringanlage, die kürzlich im CERN in Betrieb genommen wurde, besteht aus 2 einander durchdringenden Ringen von 300 m Durchmesser. Protonen aus einem „gewöhnlichen" Beschleuniger mit einer Energie von 23 GeV werden in die Speicherringe eingeschlossen und zeigen



Protonensynchrotron und Speicherring mit 8 Überschneidungen!

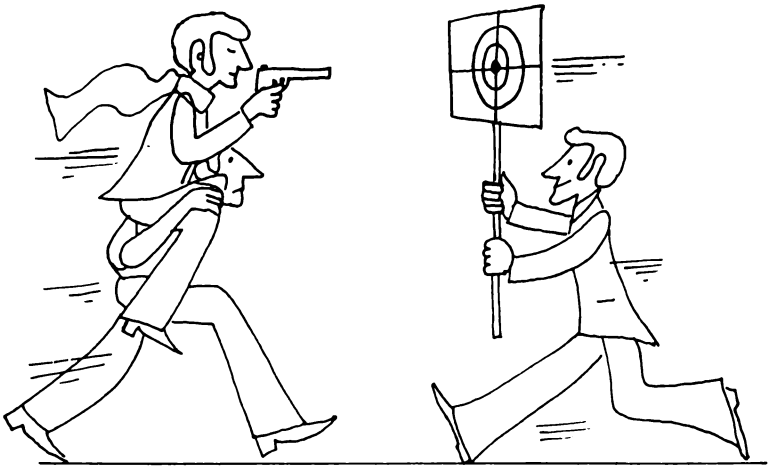
dann miteinander eine Wechselwirkung wie Partikeln mit einer 50fach höheren Energie: mit 1100 GeV!

Hier konnten die Wissenschaftler erstmals die Protonen-Protonen-Streuung bei dieser mit keinem klassischen Beschleuniger erreichbaren Energie beobachten. Ein kompliziertes System von Magneten mit einer Masse von 5000 t hielt die Teilchen in einer Kammer von etwa 1000 m Länge und 10 cm Durchmesser auf der „magnetischen Straße" fest. Zu ergänzen bleibt, daß diese Anlage im Verlauf von 5 Jahren von einem Physikerkollektiv aufgebaut wurde, das aus 300 Personen bestand.

Die neuen Beschleuniger hatten allerdings einen großen Mangel, eine schwache Stelle sozusagen. Die Achillesferse von Speicherringbeschleunigern besteht in der geringen Dichte des beweglichen Targets, d. h. des zweiten Strahls. Sie ist 10^{17}fach geringer als die Dichte eines gewöhnlichen ruhenden Targets. Das ist auch der Grund, warum man mit dem Bau solcher Beschleuniger erst vor verhältnismäßig kurzer Zeit begonnen hat, obwohl die Idee schon lange bekannt gewesen ist.

„Zwei Teilchen aufeinanderprallen zu lassen", sagte Akademiemitglied G. Budker, „ist etwa ebenso kompliziert, wie, wenn man erreichen will, daß zwei Pfeile aufeinandertreffen, die Robin Hood von der Erde und Wilhelm Tell von einem Planeten aus abgeschossen haben, der um den Sirius kreist."

Die Physiker müssen versuchen, daß sich die Partikelnbahnen möglichst oft durchdringen. Die Speicherringe im



CERN sind so ausgebildet, daß die Protonen an 8 dafür vorgesehenen Abschnitten aufeinandertreffen.

Im Institut für Kernphysik von Nowosibirsk werden unter G. Budkers Leitung aufeinandertreffende Protonen-Antiprotonen-Strahlen erforscht. Hier wird eine Anlage aufgebaut, wo Protonen und Antiprotonen mit einer Energie von je 25 GeV aufeinanderprallen, was einem gewöhnlichen Beschleuniger von 1200 GeV entspricht. Materie- und Antimateriepartikeln werden ihre Bahnen kreuzen. Wenn die Quarks wirklich existieren und ihre Masse nicht größer als 25 Protonenmassen ist, so besteht die Hoffnung, daß sie hier nachgewiesen werden können.

„Superhohe Energien lassen sich nur durch gegensinnig beschleunigte Partikelnbündel erreichen", meint G. Budker. Darum beraten die Physiker in Nowosibirsk bereits heute das Projekt einer neuen Anlage mit gegeneinander-

laufenden Protonen- und Antiprotonen-Bündeln, die einem Beschleuniger mit der Energie von $2 \cdot 10^6$ GeV (!) entspricht. Ein klassischer Beschleuniger dieser Energie müßte den Durchmesser des Erdballs haben, und seine Kosten würden ungefähr dem Nationaleinkommen unseres gesamten Planeten entsprechen!

Doch auch die Beschleuniger mit gegenläufigen Teilchenbündeln sind vorläufig noch sehr komplizierte und sperrige Anlagen. Zudem beruhen auch sie auf dem gewöhnlichen klassischen Beschleunigungsverfahren.

1956 schlug W. Weksler ein völlig neues Verfahren zur Beschleunigung von Elementarteilchen vor. Bis dahin waren alle Maschinen auf die Beschleunigung eines jeden Teilchens im einzelnen berechnet. Obwohl wir von einem Protonenstrahl sprechen und seine Dichte diskutieren, sind doch alle diese Protonen, die „Seite an Seite" auf der magnetischen Straße durch die Vakuumkammer rasen, im Grunde genommen voneinander unabhängig.

Weksler begriff als erster, daß man die Teilchen nicht einzeln zu beschleunigen braucht, sondern daß vielmehr „alle Stärke im Kollektiv liegt". So sprach er einen Gedanken aus, der gänzlich phantastisch erschien. Anfangs begriffen nicht einmal so hervorragende Beschleunigerfachleute wie E. Lawrence, was Weksler meinte.

Man kann sich tatsächlich auch schwer vorstellen, daß sich Protonen beispielsweise durch ein elektrisches Feld beschleunigen lassen, das nicht von äußeren Quellen erzeugt wird, sondern von einem „Elektronenplasma" stammt. Elektronen mit einer Energie von nur 1 MeV bewegen sich bereits mit einer Geschwindigkeit dahin, die der Lichtgeschwindigkeit nahekommt. Würden nun Protonen von einer größeren Anhäufung derartiger Elektronen erfaßt und mitgeführt, dann müßten sich die Geschwindigkeiten beider Teilchenarten nach einiger Zeit aneinander angleichen. Protonen haben aber etwa das 2000fache der Elektronenmasse. Um den gleichen Faktor muß dann auch ihre Energie größer sein. Sie müßte einige Milliarden Elektronenvolt erreichen!

So ist nicht ausgeschlossen, daß dieser Gedanke in einem neuen Verfahren zur Erzeugung spezifischer Teilchenströme für kernphysikalische Untersuchungen seine Realisierung finden wird.

Fernphysik

Ende April 1953 lernten sich während einer Tagung der amerikanischen physikalischen Gesellschaft beim Lunch im Hotelgarten zwei zukünftige Nobelpreisträger, der damals bereits bekannte Experimentalphysiker Luis Alvarez (geb. 1911) und der völlig unbekannte Donald Glaser (geb. 1926), kennen. Glaser war sehr betrübt darüber, daß wohl niemand seine 10minütige Mitteilung mehr hören würde, weil sie als letzter Vortrag auf der Tagesordnung stand.

„Zu jener Zeit, der Zeit der langsamen Flugzeuge", erinnerte sich Alvarez später, „hörten dem letzten Vortrag auf einer Tagung noch weniger Menschen als heute zu (wenn das überhaupt möglich ist). Da ich annahm, daß ich vielleicht selbst auch nicht mehr bei diesem Vortrag anwesend sein würde, bat ich ihn, mir zu erklären, worüber er berichten wollte. So erfuhr ich von Glaser zum ersten Mal von dessen Erfindung, der Blasenkammer. Seine Arbeit hinterließ bei mir einen denkbar starken Eindruck, und ich empfand sogleich, daß dies möglicherweise gerade der rettende Einfall war, dessen die Physik der Elementarteilchen so dringend bedurfte."

Funkenkammern gab es damals noch nicht, und die Experimentalphysiker waren ratlos, wie man an die Erforschung der gerade erst entdeckten Partikeln, der Kaonen und Hyperonen, gehen sollte. Klar war nur eins: Um eine Reaktion untersuchen zu können, bei der durch Wechselwirkung zwischen negativen π-Mesonen und Protonen zwei neutrale seltsame Partikeln entstehen, mußte der Physiker unbedingt alles vom Anfang bis zum Ende mit eigenen Augen beobachten können. Das heißt, man mußte den Ort auffinden, wo die Spur des π-Mesons abbricht und wo dann in einer bestimmten Entfernung zwei „Gabeln", bestehend aus den Spuren der geladenen Teilchen, auftauchen, in die die seltsamen neutralen Partikeln zerfallen.

Auch das Problem des neutralen Σ-Hyperons war noch ungelöst. Die Zerfallsreaktion dieses Teilchens hat V. Weiskopf während einer wissenschaftlichen Konferenz zum Gegenstand eines Scherzes gemacht. Der bekannte Theoretiker erheiterte sein Auditorium, indem er eine völlig leere Fotografie einer Wilsonschen Nebelkammer vorzeigte und dazu sagte, daß sie den Beweis für den Zerfall des neuen

neutralen Σ-Hyperons in zwei andere, ebenfalls neutrale Partikeln darstelle. Diese scherzhaft gemeinte Bemerkung zeigte die ganze Hilflosigkeit der Experimentalphysiker vor der Erfindung der Blasenkammer im Angesicht derartiger Reaktionen.

Fotografische Emulsionen sind zum Studium solcher Reaktionen ungeeignet, innerhalb derer es eine Unterbrechung, d. h. einen leeren Zwischenraum, gibt, der der Flugbahn von neutralen Partikeln entspricht. Auch der erste Bahndetektor, die uns bereits bekannte Wilsonsche Nebelkammer, gibt über derartige Reaktionen keine ausreichende Antwort. Sie hat aber ohne Zweifel in der Erkenntnisgeschichte der Mikrowelt eine außerordentlich große Rolle gespielt. Noch zu Beginn unseres Jahrhunderts stellten einige Physiker nicht nur die Existenz der Elementarteilchen, sondern sogar die Existenz der Atome in Frage. Die Wilsonsche Nebelkammer, in der man die Spuren der einzelnen geladenen Partikeln und ionisierten Atome unmittelbar sehen konnte, setzte allen Zweifeln ein Ende. Niels Bohr gibt in einem Brief an Rutherford den Eindruck der Physiker jener Zeit ausgezeichnet wieder, die zum ersten Mal mit eigenen Augen die Umwandlung des Atomkerns sahen: „Wenn man erfährt, daß sich ein Proton und ein Lithiumkern einfach zu einem α-Teilchen vereinigen, dann empfindet man, daß es gar nicht anders sein konnte, obwohl niemand den Mut aufbrachte, daran zu glauben."

Dieses Gerät ist bis zum heutigen Tage in Gebrauch geblieben, wird jedoch für einen begrenzten Problemkreis eingesetzt. Der in der Wilsonschen Nebelkammer befindliche Dampf besitzt nur eine geringe Dichte, und darum ist die Wahrscheinlichkeit einer Wechselwirkung zwischen negativen Mesonen und Protonen z. B. innerhalb des Kammervolumens sehr gering.

So sah also die Situation vor der Entwicklung des neuen Bahnnachweisgerätes, der Blasenkammer, durch Glaser aus. Wir geben hier eine kurze Beschreibung ihres Funktionsprinzips. Innerhalb der Kammer befindet sich durch geeignet gewählte Druck- und Temperaturbedingungen kurzzeitig (bei modernen Blasenkammern etwa für die Dauer von 10 ms) eine überhitzte Flüssigkeit. Werden im Zustand der Überhitzung hochenergetische Teilchen durch die Flüssigkeit geschossen, beginnt diese aufgrund der von den Teilchen abgegebenen hohen Ionisierungsenergie und

der damit verbundenen lokalen Überhitzung längs der Teilchenbahn zu sieden, und es entwickeln sich Dampfblasen.

Man kann die Kammer mit verschiedenen Flüssigkeiten füllen und diese so auswählen, daß darin gerade jene Reaktionen ablaufen, die man untersuchen will. Zur Erforschung der Wechselwirkung verschiedener Partikeln mit Protonen wurde die Kammer z. B. mit Flüssigwasserstoff gefüllt, der eine beträchtliche Dichte aufweist. In diesem Füllstoff konnte nun der gesamte Reaktionsablauf von der Entstehung bis zum Zerfall jedes beliebigen Elementarteilchens beobachtet werden.

Blasenkammern sind in allen Laboratorien der Welt zu einem sehr populären Nachweisgerät geworden. Warum das so ist, ist leicht zu verstehen. Solange die Beschleuniger eine geringere Leistung besaßen, entstanden im Verlauf von Kernreaktionen gleichzeitig nur 2 oder 3 Partikeln. Diese ließen sich stets mit Hilfe einiger Szintillationszähler verfolgen. Bei den großen Energien von heute ergibt sich jedoch die Möglichkeit, Prozesse zu untersuchen, bei denen viele Partikeln — zwischen 5 und 14 verschiedene Partikelnarten — auftreten. Zum Nachweis dafür ist die Blasenkammer das geeignete Instrument.

Während seiner Unterhaltung mit Alvarez auf der Tagung der amerikanischen physikalischen Gesellschaft zeigte Glaser diesem seine ersten Bahnspuraufnahmen, die er in einem Glasbehälter von etwa 1 cm Durchmesser und 2 cm Länge erhielt; die Füllung bestand aus Diäthyläther. Nur 4 Jahre später nahm die erste Blasenkammer mit einem Durchmesser von 180 cm ihren Betrieb auf.

Resonanzen, die bis zum Zerfall einen Weg von einigen Kernradien zurücklegen, und seltene Reaktionen unter Entstehung seltsamer Partikeln — alles das war nun dem „scharfen Auge“ der Blasenkammer zugänglich. 1960 wurde D. Glasers Erfindung durch den Nobelpreis gewürdigt.

Übrigens konnte mit Hilfe der 2-m-Blasenkammer des Laboratoriums von Brookhaven das berühmte Ω^--Hyperon entdeckt werden, das die „Aktien“ des „achtfachen Weges“ so stark anziehen ließ. 1970 wurde im Argonne-Laboratorium eigens für Versuche mit Neutrinos eine Flüssigwasserstoffkammer von 3,6 m Länge in Betrieb genommen. 1972 entstand im französischen Kernforschungszentrum in Saclay eine Blasenkammer von 4,7 m Durchmesser.

Eine moderne Blasenkammer stellt im Grunde genommen

eine ganze Fabrik mit umfangreichen Vakuum-, Energie-, Gas- und Elektronikanlagen dar. Dieses Gerät zur Erforschung der kleinsten Materiebausteine ist geradezu ein Konzentrat aller neuesten Errungenschaften der Tieftemperaturphysik, der Kältetechnik, der Rasteroptik und vieler anderer Bereiche von Wissenschaft und Technik. Jede derartige Anlage wird im Verlauf vieler Jahre von großen Wissenschaftlerkollektiven, Kältetechnikern, Ingenieuren und Technikern entwickelt.

Die in der Flüssigwasserstoffkammer entstehenden Bahnspuren werden durch Fenster aus optischem Glas fotografiert, die einige 100 kg wiegen. Als die ersten derartigen Kammern gebaut wurden, erschien das Problem eines großen Fensters unlösbar. L. Alvarez, einer der Schöpfer der großen Blasenkammern, erinnert sich: „Als ich einmal ein Verzeichnis der Vorträge durchblätterte, die auf einer kürzlich beendeten Konferenz über Kältetechnik gehalten worden waren, stieß ich auf eine Arbeit mit dem Titel: ‚Ein großes Glasfenster zur Flüssigwasserstoffbeobachtung'. Voll brennender Ungeduld stürzte ich davon, um das Vortragsmanuskript aufzutreiben; allerdings war darin ein metallisches Thermosgefäß mit einem Fenster von 1 Zoll Durchmesser beschrieben."

Im Hochenergielaboratorium des Vereinigten Instituts für Kernforschung in Dubna wurde eine 2-m-Flüssigwasserstoff-Blasenkammer entwickelt. „Ludmilla", so haben die Physiker ihre Anlage getauft, entstand in angestrengter Arbeit des größten Teils aller Labormitarbeiter. Nach dem erforderlichen finanziellen und arbeitsmäßigen Aufwand liegt „Ludmilla" um das 5- bis 10fache höher als die Kosten eines komplizierten Versuchskomplexes für die Arbeit mit neutralen K-Mesonen.

Von einem großen Magneten eingefaßt und von allen Seiten von zahllosen Rohren und Röhrchen und allen möglichen Hilfskonstruktionen umgeben, macht die Kammer keinen besonders erfreulichen Eindruck. So ist es kein Wunder, wenn ein Teilnehmer der Feierlichkeiten aus Anlaß der Inbetriebnahme dieser Kammer die Frage stellte: „Warum haben Sie eigentlich diesem Ungeheuer einen so poetischen Namen gegeben? Haben Sie sich vielleicht von den gleichen Überlegungen leiten lassen, aus denen man die schrecklichsten Taifune in den südlichen Meeren mit den schönsten Mädchennamen versieht?"

Der Direktor des Hochenergielaboratoriums, Prof. A. Baldin, erklärte diesen Namen so: „Die Bezeichnung ‚Ludmilla' für unsere Blasenkammer entstand mehr oder weniger zufällig, gefiel dann aber vielen. ‚Ludmilla' bedeutet übersetzt soviel wie ‚diejenige, die den Menschen am Herzen liegt'. Wir wünschen, daß ‚Ludmilla' den Menschen viel Freude am wissenschaftlichen Schöpfertum und viele bedeutsame wissenschaftliche Ergebnisse bringen möge."

Am 1. Januar 1970 wurde zum ersten Mal damit begonnen, „Ludmilla" mit Flüssigwasserstoff zu füllen. Es kommt selten vor, daß ein Experiment im Bereich der Hochenergiephysik ohne die Mitarbeit von Kältetechnikern ablaufen kann. Für die Entwicklung der Flüssigwasserstoff-Blasenkammer war ihre Teilnahme hingegen entscheidend. Darum erfolgte die erste Inbetriebnahme von „Ludmilla" unter Leitung der Mitarbeiter der kältetechnischen Abteilung. Der Chef dieser Abteilung, Doktor der Technischen Wissenschaften, A. Seldowitsch, hat den entscheidenden Moment der Inbetriebnahme mit nahezu dokumentarischer Genauigkeit beschrieben:

„Die Kammer ist fast voll. Stop! Wieder eine Verstopfung. Wir wechseln den Filter. Beim ersten Anfahren geht immer irgend etwas in die Binsen. Wir setzen die Füllung fort. Wir wissen nicht mehr, ob draußen Tag oder Nacht ist. Endlich sehen wir den Flüssigwasserstoffspiegel; er erreicht das Deckglas. Die Kammer wird verschlossen. Wir heizen. Wieder eine Verstopfung und noch eine. Dann muß ganz dringend etwas am Steuerpult umgelötet werden. Schließlich fahren wir den ersten Kammerzyklus ab. Zwei Mitarbeiter beobachten die Bahnspuren vorläufig noch mit unbewaffnetem Auge. Jetzt ist man endlich mit der Montage der Filmkamera fertig, und die Aufnahme beginnt. Das erste Stück Probefilm. Im Operativjournal taucht diese Eintragung auf: ‚8. Januar, 14.20 Uhr. Schafranow hat Bahnspuren auf dem Film entdeckt!!!' Alle laufen glückstrahlend umher. Das Maximalprogramm ist geschafft. Wir registrieren noch eine Versuchstatsache. Der Korken auf der Champagnerflasche fliegt nicht bis zur Decke, sondern nur bis zum Brückenkran."

Im Februar 1971 begann man, die Kammer für den Transport nach Serpuchow in das Institut für Hochenergiephysik zu demontieren. Ein halbes Jahr lang nahmen die

angestrengten Arbeiten zur Demontage, zum Transport und zum Wiederaufbau der „Ludmilla“ in Anspruch. Manchmal wurden bis zu 7 Lastkraftwagen am Tag in Dubna abgefertigt und in Serpuchow von den Mitarbeitern der Wasserstoffkammerabteilung in Empfang genommen.

Der Leiter der Anlage atmete erleichtert auf, als man das 700 kg schwere optische Glas unversehrt in das Kammerfenster eingesetzt hatte. Im September war „Ludmilla“ aus ihren Einzelteilen am neuen Ort wiedererstanden. Nun begann die Wasserstofferprobung. Die Wissenschaftler mußten der Kammer ein zweites Mal Leben „einhauchen“.

„Der erste Eindruck“, so erinnert sich A. Baldin, „den die meisten nach ihrer ersten Bekanntschaft mit den Systemen der Kammer hatten, war folgender: ‚Es ist ausgeschlossen, daß dieser unabsehbare Wust von Baugruppen und Verbindungen einwandfrei arbeiten kann; dazu ist er einfach zu groß.‘“

„Auf jeden Fall ist es unmöglich, daß alles nach der Montage gleich anspringt, das gibt es gar nicht“, dies war nun bereits die Meinung einiger bekannter Fachleute, in äußerst kategorischer Form ausgesprochen.

Doch der Elektromagnet — eines der größten und wichtigsten Bauteile der gesamten Anlage — „kam“ sofort und „ohne Rauch“, der sonst gelegentlich auftritt. Der Magnet erzeugt ein Feld von 30 Tesla in einem Schacht, dessen Volumen 6 m^3 beträgt. In diesen Schacht wird die Wasserstoffblasenkammer in einem Thermosgefäß eingelassen.

Streng nach Zeitplan und ohne irgendwelche Ausfälle verlief das erste Anfahren der Kammer. Alle Systeme der Anlage funktionierten einwandfrei. Ende September bzw. Anfang Oktober lag „Ludmilla“ bereits in einem Protonenstrahl von 35 GeV, und die ersten Kernreaktionsaufnahmen waren entwickelt.

Doch nun stellten sich neue Sorgen ein: Um die eigentliche Betriebsbestrahlung aufzunehmen, mußten zunächst alle möglichen größeren und kleineren Mängel beseitigt werden, die in der Eile noch unerledigt geblieben waren. Wie anziehend ein starkes Magnetfeld für Experimentalphysiker auch immer ist; noch interessanter wird es, wenn man es genau gemessen hat. Natürlich mußte diese Messung innerhalb der Wasserstoffkammer bei Betriebsver-

hältnissen, d. h. bei einer Temperatur von —248 °C, erfolgen!

Spezialisten aus Leningrad konstruierten einen Mechanismus, der im Gehäuse der montierten Kammer autonom ferngesteuert wird. Wer wollte bestreiten, daß die Arbeitsbedingungen dieses Geräts nicht gerade sehr viel angenehmer waren als die des berühmten Lunochods.

Am 14. Januar 1972 fand in Protwino die offizielle Eröffnung der Flüssigwasserstoffkammer „Ludmilla" statt. Akademiemitglied N. Bogoljubow sagte: „In der ganzen Welt existieren nur wenige derartige Kammern. Diese hier besitzt jedoch einen wesentlichen Vorzug. Sie wird die erste große Anlage sein, die kombiniert mit dem größten Beschleuniger der Welt für geladene Partikeln arbeitet, dem sowjetischen Beschleuniger in Serpuchow. Die Flüssigwasserstoffkammer von Dubna wird den Instituten und Universitäten der sozialistischen Länder, darunter auch der Sowjetunion, die Möglichkeit geben, sich an der Erforschung der elementaren Wechselwirkungen und der Elementarteilchen bei höchsten Energien zu beteiligen, die mit Hilfe des gigantischen Beschleunigers erhalten werden. Die Wissenschaftler verschiedener Länder können nun Hunderttausende Bahnspuraufnahmen von geradezu einmaligen nuklearen Ereignissen erhalten und untersuchen."

Sogar ein neuer Begriff ist entstanden; er lautet „Fernphysik" und bedeutet soviel, daß sich mit Hochenergiephysik nicht nur jene Wissenschaftler befassen können, die unmittelbar an größten Beschleunigern und Anlagen wie der „Ludmilla" arbeiten. In der Blasenkammer werden einige Millionen Aufnahmen im Jahr hergestellt, auf denen „leidenschaftslos" und „unvoreingenommen" ohne jede Auswahl alle Elementarteilchen festgehalten sind, die in die Kammer eintraten, und auch alles das, was innerhalb der Kammer mit ihnen geschah.

Nach einer Primärbearbeitung dieser Fotos in einem besonderen Durchsichtautomaten wird alle darauf enthaltene Information auf Magnetband aufgezeichnet. In dieser handlichen Form gelangen die „Informationshalbfertigerzeugnisse" aus der großen Blasenkammer oder aus einer Versuchsanordnung wie der zur Überprüfung des Pomerantschuk-Theorems in die verschiedensten Institute. Mit dieser Tatsache läßt sich die Geburt eines neuen Forschungsverfahrens sozusagen „aus der Ferne" erkennen. Die „Fern-

physik“ wird in nicht allzu weiter Zukunft imstande sein, wesentlich mehr Leute an die „Frontlinie“ zu bringen, die sich mit der Erforschung der Mikrowelt befassen.

Viele 1000 km von Serpuchow entfernt arbeitende Wissenschaftler werden nun imstande sein, neue Partikeln, neue Kernreaktionen oder bis dahin unbekannte Wechselwirkungsarten zwischen Elementarteilchen zu entdecken.

Wurzeln und Früchte

Vom Feldstein zur Antimaterie

Heute wird alles mit Zahlen erklärt. Mathematiker und Biologen, Kybernetiker und Demographen, Wirtschaftler und Journalisten nehmen sie zu Hilfe. Auch wir wollen hier mit Zahlen beginnen.

Der Bau des kürzlich in Batavia (USA) in Betrieb genommenen größten Beschleunigers für eine Energie bis zu 400 GeV kostete die Staatskasse 250 Mill. Dollar. Ungefähr die gleiche Summe wird eine analoge Anlage verschlingen, mit deren Errichtung man im CERN begonnen hat, dem Institut, das die Wissenschaftler der westeuropäischen Länder vereinigt.

Der Aufwand für die Konstruktion und die Herstellung der Versuchsapparaturen zum Einsatz am Beschleuniger beträgt mehr als die Hälfte der Kosten des Beschleunigers selbst. Kein anderer Bereich der Grundlagenforschung außer Elementarteilchenphysik kann sich solcher grandioser Ausgaben „rühmen". Doch dies ist keine Laune der Wissenschaftler und auch keine Nachlässigkeit der Finanzierungs- oder Planungsorgane. Es ist eine elementare Notwendigkeit.

Jedes neue Körnchen Wissen über die Welt der Elementarteilchen erfordert immer größere Anstrengungen. Jedes Vorwärtsschreiten in dieser Richtung ist nicht etwa nur für ein einzelnes Laboratorium oder Institut schwierig, sondern sogar für einen einzelnen Staat. Der Ausweg bestand in der internationalen Wissenschaftlerkooperation, in deren Rahmen die Entwicklung und effektive Nutzung vieler teurer Anlagen möglich wurde.

Seit dem 26. März 1956 existiert das Vereinigte Institut für Kernforschung in Dubna bei Moskau. Gemeinsam mit sowjetischen Wissenschaftlern arbeiten hier 400 Physiker und Ingenieure aus sozialistischen Ländern, den Partnerländern des Instituts. Allein in der Wissenschaftlergruppe des Hochenergielaboratoriums im Vereinigten Institut für

Kernforschung, die kürzlich das erwähnte wichtige Experiment in Serpuchow abgeschlossen hat, gab es vier Arbeitssprachen. Zwischen dem Vereinigten Institut für Kernforschung und CERN bestehen seit langem gute Arbeitsbeziehungen. Am Beschleuniger von Serpuchow führen sowjetische Wissenschaftler gemeinsam mit ihren Kollegen aus Frankreich, den USA sowie vom CERN Experimente durch.

Während einer Versammlung aus Anlaß der Bestätigung des Projektes für einen Protonenbeschleuniger von 400 GeV äußerte Prof. G. Adams, Direktor des Laboratoriums CERN-2, die Meinung, daß der Beschleuniger der nächsten Generation für eine Energie von 10 000 GeV nur durch die gemeinsamen Anstrengungen der UdSSR, der USA und Westeuropas entwickelt werden kann.

Ist die Physik der Elementarteilchen nicht schon zu teuer geworden? Amerikanische Wissenschaftler haben errechnet, daß alle Kosten für Grundlagenforschungen seit Archimedes bis in unsere Tage nicht größer sind als der Wert des Gesamtnationaleinkommens der USA in nur 10 Tagen! Daraus ergibt sich ein erster unerwarteter Schluß: Die Ausgaben für die Grundlagenwissenschaften wachsen langsamer als der Reichtum der Gesellschaft. Ihr Anteil an der Schaffung des modernen Niveaus der materiellen Produktion hingegen ist ungeheuer groß.

Und was sagen die Physiker selbst dazu? „Wie die Geschichte zeigt", äußerte A. Baldin, „spiegelt sich die Entdeckung grundlegender Naturgesetze früher oder später sehr stark im Leben der Gesellschaft wider. Die Stärke der Grundlagenwissenschaften liegt darin, daß sie qualitativ neue Ideen liefern. So gelingt es mit ihrer Hilfe, plötzlich, mit einem einzigen Sprung, viele äußerst komplizierte praktische Probleme zu lösen. Ein überzeugendes Beispiel dafür ist das Eindringen der neuen Methoden der Quantentheorie des Feldes (die eigens für den Aufbau der Theorie der Elementarteilchen entwickelt wurde) in die Festkörperphysik. Die Festkörperphysik wiederum (Supraleitfähigkeit, Halbleiterphysik, Physik der Metalle usw.) hat unmittelbare Bezüge zur Technik."

„Es ist unmöglich, die praktische Anwendung von Dingen vorher zu wissen, die noch nicht erforscht sind", war die Meinung des Korrespondierenden Mitglieds der Akademie der Wissenschaften F. Schapiro. „Dazu ein Beispiel

aus der Vergangenheit: J. J. Thomson entdeckte die Elektronen. Als Ergebnis haben wir die Elektronik, die Fernsehapparate und die Halbleiter. Thomson wollte aber einfach nur in Erfahrung bringen, wie der Stromfluß in Gasen eigentlich erfolgt. Man kann gegenwärtig nicht von irgendwelchen konkreten zukünftigen Möglichkeiten für den Einsatz der Kernkräfte in der Praxis sprechen. Man kann nur sagen, daß — wenn man sie jetzt nicht erforscht — überhaupt keinerlei derartige Möglichkeiten bestehen werden. Existiert erst einmal neues Wissen, dann wird es auch Erfindungen in diesem Bereich geben. Wenn es aber kein neues Wissen geben wird, kann man eben nur wissenschaftlich phantastische Romane schreiben."

„Ich könnte eine Vielzahl von Beispielen dafür anführen", sagte Akademiemitglied N. Bogoljubow, Direktor des Vereinigten Instituts für Kernforschung, „bei denen scheinbar rein theoretische Grundlagenforschungen genau jenen Vorlauf lieferten, der völlig neue Gebiete der Technik ins Leben rief. Ich bin zutiefst überzeugt davon, daß das Eindringen in die Geheimnisse der Tiefenstruktur der Materie zu großen und möglicherweise völlig unerwarteten praktischen Anwendungsmöglichkeiten führen muß. Freilich sind alle an den Früchten der Wissenschaft interessiert, und das ist natürlich. Nur muß man dabei auch den tief verborgenen Wurzeln jenes Baumes Aufmerksamkeit schenken, an dem diese Früchte wachsen und gedeihen können."

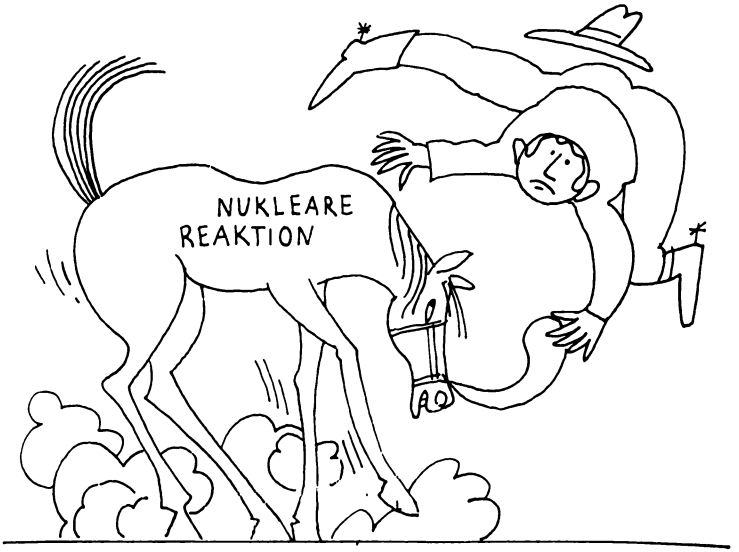
Im folgenden wollen wir versuchen, einen Blick in die Zukunft zu werfen. Wir wissen, daß das Niveau der technischen Entwicklung einer Zivilisation davon abhängt, wieviel Energie sie zu erzeugen vermag.

Fachleute für außerirdische Zivilisationen definieren mehrere Stufen in der Entwicklung einer Zivilisation, beginnend mit der Schaffung einer einheitlichen Energiewirtschaft für den Gesamtplaneten bis hin zur gesteuerten Energieemission ganzer Sternhaufen.

Vor dem Eindringen in die Mikrowelt verwandte der Mensch Energiequellen, die er zufällig an der Erdoberfläche fand: ein Feuer aus Zweigen, Steinkohle, Erdöl. Später lernte er, die Energie des Wassers zu nutzen. Die Physik der Elementarteilchen gab der Menschheit eine neue Energiequelle, die Kernspaltungsenergie. Das ist ein klassisches Beispiel dafür, wie die Grundlagenforschung über die Reak-

tionen schwerer Atomkerne das für die Menschheit so entscheidende Problem der Energiegewinnung lösen hilft.

Die Wissenschaftler fanden weiterhin, daß auch bei der Verschmelzungsreaktion zweier leichter Kerne eine ungeheuer große Energie frei wird. Freilich haben wir noch nicht gelernt, die Reaktionen gesteuert ablaufen zu lassen. Heute ist dieses Problem von erstrangiger praktischer Bedeutung,



und an der Lösung arbeiten große Wissenschaftlerkollektive.

Für die Entwicklung einer Zivilisation ist indessen nicht nur die Gewinnung von Energie in immer größeren Mengen wichtig, sondern auch die Möglichkeit, diese Energie in „bequemer" Form zu speichern und gesteuert abzugeben.

Der Urmensch nutzte nur einen verschwindend geringen Teil der z. B. in 1 kg Materie eingeschlossenen Energie, wenn er auf der Jagd mit einem Stein nach der Beute warf. Die Kernspaltungsreaktion unter Verwendung schwerer Elemente ist eine ungewöhnlich leistungsfähige, steuerbare und außerordentlich konzentrierte Energiequelle. 1 kg Uran oder Plutonium „ersetzt" viele 1000 t besten chemischen Brennstoff bzw. die „Wirkung" von 10^{13} Feldsteinen. Dieser Wert übersteigt bei weitem die Anzahl aller Steine,

die irgendwann einmal von allen Menschen unserer Erde geworfen wurden!

Die Physiker haben noch mancherlei in ihren „Vorratskammern". Beim Zusammenstoß von Teilchen und Antiteilchen tritt eine Annihilationsreaktion ein, bei der die Reaktionspartner vernichtet werden. Ein Elektron und ein Positron verschwinden beim Zusammenstoß und verwandeln sich in ein Energiequant. Hier haben wir die Erfüllung des uralten Menschheitstraums von der vollständigen Masseumwandlung eines Stoffs in Energie! Die Effektivität, die sich durch Nutzung aller in Materie eingeschlossenen Energie erzielen läßt, ist 1000fach größer als bei der Kernspaltung. „Aber vorläufig ist Antimaterie sehr viel teurer als jene Energie, die bei ihrer Verbrennung freigesetzt wird", stellte das Korrespondierende Mitglied der Akademie der Wissenschaften der UdSSR D. Blochinzew fest. „Allerdings ist nicht ausgeschlossen, daß es möglich sein wird, Antimaterie als konzentrierten Treibstoff bei Raumflügen einzusetzen. Natürlich müssen zunächst jene Schwierigkeiten überwunden werden, die mit der Lagerung, dem Transport usw. von Antimaterie verknüpft sind."

Lassen wir unserer Phantasie freien Lauf, dann können wir uns die ferne Zukunft der Energetik z. B. so vorstellen: Auf einem Asteroiden oder einem künstlich geschaffenen Planeten wird durch eine Synthesereaktion leichter Kerne Energie erzeugt, d. h. auf die gleiche Weise wie auf unserer Sonne und einer Vielzahl ebenso alter Sterne. Gleichzeitig gewinnt man auf der Erde die Energie aus der gesteuerten Synthese von Elementarteilchen aus freien Quarks, die in beliebiger Menge zu gewinnen man gelernt haben wird.

Heute ist das noch zügellose Phantasie. Aber verfolgen wir, was Akademiemitglied B. Pontecorvo über die Quarks gesagt hat: „Wenn die Quarks existieren, so zweifle ich nicht daran, daß sie auch benutzt werden können. Ein stabiler ‚Stoff' mit völlig neuen Eigenschaften wird unbedingt praktische Anwendung finden."

Das gleiche läßt sich auch über magnetische Materie sagen, die aus den Dirac-Monopolen aufgebaut ist.

Alle diese und noch viele andere „wenns" können nur durch Arbeiten zur Grundlagenforschung in der Hochenergiephysik und in der Physik der Elementarteilchen ausgeräumt werden.

Universelle Maschinen

Die Zukunft vorherzusagen war schon immer ein schwieriges und undankbares Unterfangen. Stets war die Wirklichkeit sehr viel reicher und bedeutsamer, als man sie sich in den Prognosen vorstellte. Spätere Generationen wunderten sich dann meist über die flügellahme Phantasie der Vorfahren.

Heute können wir kaum begreifen, wieso Rutherford nur zwei Jahre vor der Entdeckung der Kernspaltungsreaktion überhaupt an der Möglichkeit irgendeiner Verwendung der Kernenergie zweifelte.

Was dagegen die Frage nach dem Nutzen der Physik der Elementarteilchen heute betrifft, so braucht man sich hier nicht in nebelhaften Versprechungen zu verlieren, sondern kann durchaus höchst konkrete, reale Anwendungen nennen.

1950 wurde in einer amerikanischen Zeitschrift ein Artikel des bekannten Physikers und Nobelpreisträgers E. Wigner veröffentlicht, der folgende Zeilen enthielt: „Unsere Wissenschaft läßt unsere Macht mit größerem Erfolg wachsen, als sie uns Wissen von rein menschlichem Interesse vermittelt."

Heute, mehr als 20 Jahre später, kann man diese Worte nicht länger akzeptieren. Selbst wenn man von der Atomenergie absieht, müßte die Physik der Elementarteilchen nicht mit leeren Händen antreten, wenn die Wissenschaften vorzeigen sollten, womit sie dem Menschen nützlich sind.

Am Vorabend der ersten Internationalen Konferenz für die friedliche Anwendung der Atomenergie im Jahre 1955 fand zu diesen Problemen eine Sitzung der Akademie der Wissenschaften der UdSSR statt. Akademiemitglied A. Nesmejanow sagte bereits damals, daß „die Atomindustrie der Wissenschaft und Technik radioaktive Elemente liefert, deren Strahlung in der Medizin zur Therapie und Diagnose sowie in der Lebensmittelindustrie, der Automatik, der Werkstoffprüfung, der geologischen Erkundung und in einer Vielzahl anderer Richtungen verwendet wird. Die Chemie ebenso wie die Physik, die Metallurgie, die Mechanik der Gase, der Flüssigkeiten und der Festkörper, aber auch besonders die Biologie mit ihrer Vielzahl von Gebie-

ten und Richtungen von der Physiologie der höheren Nerventätigkeit bis zur Agronomie sind zum Anwendungsbereich markierter Atome geworden, mit deren Hilfe neue Arbeitsverfahren erschlossen und neue Entdeckungen gemacht werden konnten."

Doch was wird gegenwärtig Neues in diesen Richtungen erreicht? Bringen die größten und teuersten Anlagen der Physik der Elementarteilchen, die Beschleuniger, den Menschen irgendeinen Nutzen?

Als in Dubna einer der ersten Beschleuniger aufgebaut wurde, wunderten sich die Bauleute darüber, daß kein Eisenbahnanschluß für den Abtransport der „Erzeugnisse" verlegt wurde, die diese große Maschine ihrer Meinung nach produzieren müsse.

Zyklotrone, Phasotrone, eingehüllt in den „geheimnisvollen Nebel" der Wissenschaft, erregen wie alles Unbekannte und Unverständliche allgemeine Aufmerksamkeit. Häufig kommen Besucher nach Dubna, die der Wissenschaft sehr fern stehen. Die meisten von ihnen starren ehrfurchtsvoll und schüchtern auf die riesigen stählernen Konstruktionen und verstehen noch weniger von der Wissenschaft als zuvor, wenn sie ihre „seelenlosen" Anlagen betrachten.

Sind eigentlich die komplizierten Konstruktionen einer Erdölraffinerie „menschlicher"? Von ihnen wissen die Menschen jedenfalls, daß in diesen Anlagen Heizöl und Benzin erzeugt wird. Selbst die riesigen Mittel für die Landung von Menschen auf dem Mond erscheinen nutzbringender als die Ausgaben für Forschungsarbeiten im Bereich der Hochenergiephysik; diesen Gedanken äußerte der bekannte amerikanische Physiker V. Weiskopf auf einem Symposium in Tbilissi im Jahre 1969.

Leider wissen die meisten Menschen bis heute praktisch nichts von dem gewaltigen Beitrag, den die Beschleuniger und die Experimentalphysik hoher Energien insgesamt für den Alltag leisten. Mit Hilfe des großen Synchrozyklotrons, das bereits Ende 1949, d. h. in der schweren Nachkriegszeit, aufgebaut wurde, wurde am Institut für Kernprobleme der Akademie der Wissenschaften der UdSSR der Prozeß der Spaltung schwerer Kerne unter dem Einfluß von Neutronen untersucht. Die hier erzielten Ergebnisse waren zur Lösung von Problemen der praktischen Nutzung der Atomenergie unbedingt notwendig. Heute

arbeiten an Beschleunigern dieser Klasse nicht nur Physiker, sondern auch Vertreter gänzlich anderer Fachrichtungen, wie der Radiochemie und Medizin, der Radiobiologie und Geochemie, sowie Mitarbeiter wissenschaftlicher Institute, die in unmittelbarer Beziehung zur Industrie stehen.

Hier werden Sonnenbatterien auf ihre Beständigkeit gegen Strahlenbelastung geprüft und das Problem des Strahlungsschutzes von Menschen gelöst, die dem Einfluß der Strahlungsgürtel der Erde und der Sonneneruptionen ausgesetzt sind.

Die Entwicklung der Beschleunigertechnik hat die Menschheit in der Nuklearmedizin und in der Strahlentherapie weit vorangebracht. Mehr als die Hälfte aller bekannten radioaktiven Kerne wurden im Verlauf von Reaktionen entdeckt, die die Physiker an Beschleunigern studierten. Die meisten Isotope werden in Kernreaktoren gewonnen. Das radioaktive Zinkisotop ^{72}Zn, das z. B. zur Früherkennung des Krebses der Vorsteherdrüse genutzt wird, läßt sich nur in Beschleunigern erzeugen.

Seit langem schon verwenden die Mediziner die Kobaltkanone zur Therapie bösartiger Geschwülste mittels γ-Quanten, die von dem radioaktiven Kobaltisotop emittiert werden. Leider schädigt diese Strahlung auch die gesunden Gewebe in der Nachbarschaft. Darum erscheint die Verwendung von Protonen, besonders aber der π-Mesonen, aussichtsreich. Werden sie in Materie gebremst, dann setzen sie auf sehr geringem Volumen eine große Energiemenge frei. Die Physiker haben bereits gelernt, im Synchrozyklotron von Dubna sowie mit Hilfe des Protonensynchrotrons in Moskau eigene „medizinische" Protonenbündel zu erzeugen. Mediziner aus dem Institut für experimentelle und klinische Onkologie der medizinischen Akademie der Wissenschaften der UdSSR studieren gegenwärtig die Möglichkeiten zur Verwendung solcher Protonenbündel für die Verbesserung der Strahlentherapie des Krebses.

Auf diese Art und Weise sind die Beschleuniger fast unbemerkt dem Menschen nähergekommen.

Auch in der Industrie haben die Beschleuniger ein großes Betätigungsfeld gefunden. Mit Hilfe von Protonen der Energie von etwa 150 MeV kann man die Dicke von Graphit mit einer Genauigkeit bis zu 0,0015% messen, während

bei Verwendung von α-Teilchen oder Elektronen für diesen Zweck „nur" 2% Meßgenauigkeit erreicht werden. Nach einer Strahlungsbehandlung von Werkstoffen im Beschleuniger erhöht sich ihr Schmelzpunkt, die Zugfestigkeit nimmt zu, desgleichen die Festigkeit; außerdem verändern sich Struktur und Eigenschaften von Polymerwerkstoffen.

Der amerikanische Physiker L. Rousen teilte während der Nationalkonferenz über Beschleuniger in Chikago mit, daß von 1000 Beschleunigern, die in den USA betrieben werden, nur weniger als 150 ausschließlich zur Grundlagenforschung eingesetzt werden. Ungefähr ein Drittel wird in Industrie und Medizin benutzt, während die übrigen in angewandten Wissenschaften Verwendung finden.

Auf mittelbarem Wege beeinflußt die Physik der Elementarteilchen den Verlauf des technischen Fortschritts der Menschheit. „Da sie in der Tat eine führende Wissenschaft ist", sagte B. Pontecorvo, „hat sie für ihre Zwecke eine Reihe neuer methodischer Entwicklungen direkt bewirkt oder ihre Entwicklung stimuliert. Diese Entwicklungen, die häufig an der Grenze der Möglichkeiten unserer modernen Technik liegen, gingen in die Kerntechnik, die Medizin, die Biologie, in die Erforschung des Weltalls, in die Erkundung von Bodenschätzen sowie in die Rechen- und Verteidigungstechnik ein. Es ist kein Zufall, daß gerade die Physik der Elementarteilchen gegenwärtig die Entwicklung supraleitender Magnete stimuliert, die ohne Zweifel in verschiedenen Bereichen der Technik bedeutsame praktische Verwendung finden werden."

Eine Gruppe der kältetechnischen Abteilung des Hochenergielaboratoriums im Vereinigten Institut für Kernforschung arbeitete lange an der Entwicklung eines Flüssigwasserstoff- und Deuteriumtargets für Versuche mit K^0-Mesonen. Im Verlauf dieser Arbeit entwickelten die Wissenschaftler spezielle Thermosgefäße. Diese fanden das Interesse vieler Industriebetriebe. Der Leiter der kältetechnischen Abteilung A. Seldowitsch erinnerte sich daran, wie man bei Entwicklung der Flüssigwasserstoffkammern „nebenbei" große Wasserstoffverflüssiger konstruieren mußte. Diese Anlagen wurden nach den Zeichnungen der Physiker in Serienproduktion genommen. Zum ersten Mal begann man mit ihrer Hilfe in der UdSSR flüssigen Parawasserstoff zu gewinnen.

Akademiemitglied G. Flerow, der Direktor des Labo-

ratoriums für Kernreaktionen im Vereinigten Institut für Kernforschung sagte über die praktische Verwendung der von seinem Kollektiv erzielten Resultate folgendes: „Die gesamte hochgezüchtete Technik, die wir in unserem Laboratorium zur Herauslösung einzelner schwerer Kerne aus einer großen Materiemasse entwickelt haben, wird bereits in der großtechnischen Feintechnologie eingesetzt. Bildlich ausgedrückt, sind wir imstande, die berühmte Stecknadel im Heuhaufen zu finden. Die bei uns verwendeten, extremempfindlichen Analysenverfahren werden schon längst zur Erzeugung höchstreiner chemischer Stoffe benutzt."

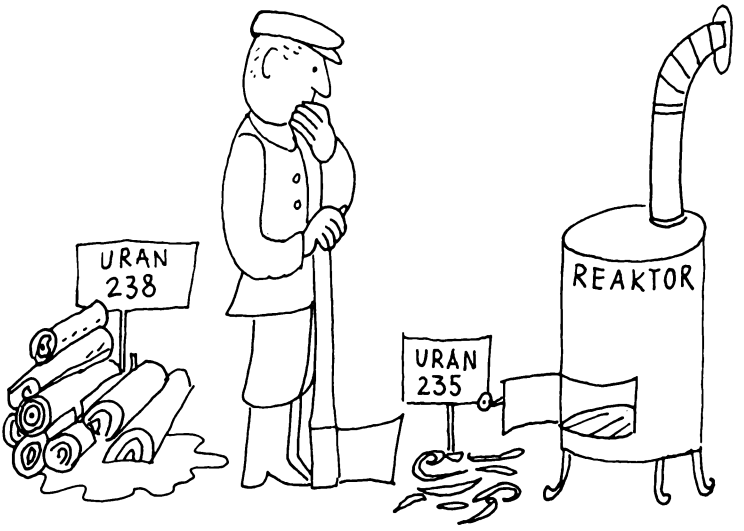
Selbst aus einem prinzipiellen Mangel, der dem Elektronenbeschleuniger (Synchrotron) eigen ist, konnte Nutzen gezogen werden. Bei der Bewegung der Elektronen auf kreisförmigen Bahnen im Magnetfeld des Beschleunigers werden sie gebremst und emittieren die sogenannte „Synchrotronstrahlung". Dieser Effekt, der sich praktisch nicht vermeiden läßt, behindert die weitere Beschleunigung der Elektronen in zyklischen Anlagen. Doch für Biologen, Chemiker und Mediziner ist die „Synchrotronstrahlung" eine außerordentlich erwünschte Erscheinung, da man nach keinem anderen Verfahren so intensive Ströme weicher Röntgenquanten erzielen kann. So paradox es klingt: Heute werden bereits spezielle Beschleuniger entwickelt, bei denen zu Forschungszwecken nicht die beschleunigten Elektronen selbst, sondern gerade das benutzt wird, was ihre Beschleunigung behindert.

Der Beschleuniger als Energieerzeuger

Elementarteilchenbeschleuniger werden heute in sehr großem Umfang verwendet. Doch selbst bei äußerst lebhafter Vorstellungskraft fällt es schwer, von dem Wort „Beschleuniger" eine Brücke zu dem Wort „Generator" zu schlagen, d. h. zu einem Gerät, das Energie erzeugt. Der schreiende Widerspruch in der Kombination dieser beiden Worte ist beim besten Willen nicht zu überhören. Wie sollte ein Beschleuniger zu einem Energieerzeuger werden können, wenn er doch selbst ständig Energie verbraucht, und das in recht soliden Mengen?

Schaltet man die Stromzufuhr ab, dann kommt die riesige Maschine sofort zum Stillstand. Niemand wüßte auch nur von einem einzigen Fall zu berichten, bei dem ein Beschleuniger die aufgewandte Energie wieder zurückgeliefert hätte, ganz zu schweigen von wirklicher Energieerzeugung.

Trotzdem ist das, was die Überschrift behauptet, kein Märchen. Freilich ist es vorläufig auch noch keine Realität,



dafür aber bereits eine durchaus reale Möglichkeit. Wie sich herausgestellt hat, kann man mit Hilfe eines Beschleunigers für Elementarteilchen Brennstoff für die Kernenergetik gewinnen.

1955 nahm das erste Atomkraftwerk in Obninsk bei Moskau mit einer Leistung von nur 5 MW den Betrieb auf. Heute arbeiten auf der ganzen Welt über 230 Kernkraftwerke mit einer Gesamtleistung von 20 000 MW. Vorläufig sind dies nur 2% der Energiekapazität unseres Planeten. Den Prognosen der Energetiker zufolge wird sich dieser prozentuale Anteil bis 1980 auf 30% und bis zum Ende unseres Jahrhunderts auf 50% erhöhen!

Die Zeit ist herangekommen, in der die Atomenergie aus einer unerwarteten Entdeckung zu einer wichtigen Energiequelle der Erde wird.

„Man kann sich leicht davon überzeugen", sagte Akademiemitglied N. Bogoljubow, „daß im Zeitraum von der I. Internationalen Genfer Konferenz zur friedlichen Nutzung der Atomenergie im Jahre 1955 bis zur IV. Konferenz im September 1971 radikale Veränderungen in den Beziehungen zwischen Atom und Gesellschaft eingetreten sind."

Tatsächlich interessiert sich jetzt ein großer Kreis von Fachleuten für dieses Problem, an dem früher nur Wissenschaftler arbeiteten, die sich mit Kernreaktoren befaßten. Die Generalversammlung der UNO hat der IV. Genfer Konferenz ein neues wichtiges Ziel gesetzt: Sie soll nicht nur für Wissenschaftler und Ingenieure, sondern auch für die Organisatoren der Industrie, für Verwaltungstechniker und Ökonomen nützlich sein. Die Atomenergetik verwandelt sich in eine Lebensnotwendigkeit.

Kehren wir zum Problem des Kernbrennstoffs zurück. Was verstehen wir unter diesem Wort? Der Brennstoff für Kernkraftwerke ist natürliches Uran. Doch was „schenkt" uns die Natur hierbei eigentlich? Nur 0,7% dieses „Geschenks" bestehen aus dem Uranisotop ^{235}U, dem „Feuerholz", das im Reaktor verbrennt. Alles übrige ist „nasses Holz", unbrennbares ^{238}U. Könnte man auch dieses Uran verwenden, dann würde die bisher gewonnene Menge für einige 100 Jahre reichen. Doch in den thermischen Reaktoren wird nur ein verschwindend geringer Teil davon verbrannt. Stellt man die Gewinnung von Uran heute seiner „unvollständigen" Verbrennung in den Reaktoren gegenüber, dann ist das Ergebnis alles andere als beruhigend. Ungeachtet des außerordentlichen „Heizwertes" von Uranbrennstoff, gibt es viel zu wenig davon für die Atomenergetik der Zukunft.

Doch die Natur ist nicht geizig. Außer ^{235}U hat sie auch ^{239}P (Plutonium) und ^{233}U spaltbar gemacht, uns aber zugleich der Möglichkeit beraubt, diese Stoffe auf natürlichem Wege zu gewinnen. Weder das eine noch das andere Isotop kommen in der Natur vor.

Die Kernphysiker wissen allerdings, daß man Plutonium aus ^{238}U und ^{233}U aus dem nichtbrennbaren natürlichen Thorium herstellen kann, wenn man die jeweiligen

Ausgangsstoffe einer intensiven Bestrahlung mit Neutronen aussetzt.

Auf dem VII. Weltkongreß für Energetik sagte Akademiemitglied A. Alexandrow: „Wenn wir vom praktisch unerschöpflichen Energieinhalt des Kernbrennstoffs sprechen, dann meinen wir die Notwendigkeit und Möglichkeit einen Sekundärbrennstoff, nämlich Plutonium, ins Spiel zu bringen und auf diese Weise überwiegend die Vorräte an ^{238}U zu nutzen. Ohne dies kann keine Rede von einer langfristigen Kernenergetik in den Maßstäben sein, die sich aus den gegenwärtigen Geschwindigkeiten des technischen Fortschritts ergeben, da die Ressourcen an ^{235}U dafür ungenügend sind."

Die erkundeten Rohstoffvorräte können den Uranbedarf nur bis zum Ende der 70er Jahre decken. Darum ist bereits heute das Problem aktuell, die Produktion von Sekundärbrennstoff in großem Umfang aufzunehmen.

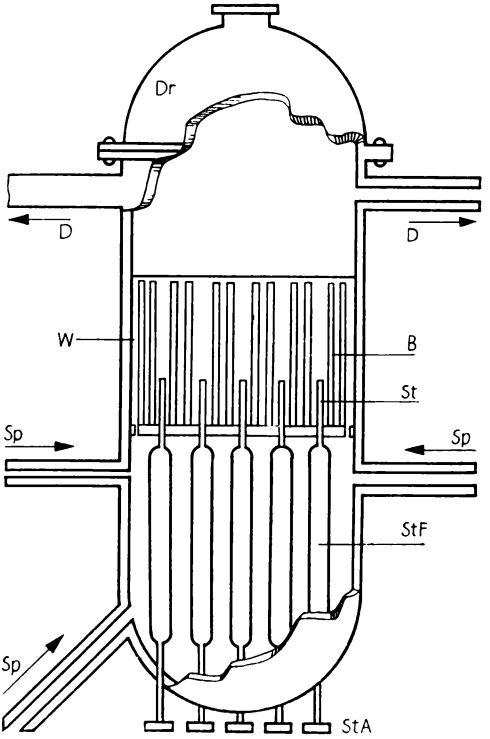
Plutonium läßt sich erzeugen, wenn man Neutronen in großer Zahl zur Verfügung hat. Aber woher soll man sie nehmen? So ergibt sich ein weiteres Problem, die Erzeugung intensiver Neutronenströme.

Eine gewisse Zahl von Neutronen entsteht bei der Kernspaltung in Atomreaktoren. Ein Teil von ihnen wird sofort zur Aufrechterhaltung der Kettenreaktion absorbiert. Einige Neutronen jedoch fallen den Kernen des ^{238}U zum Opfer. Aus den verbrauchten Uranstäben gewinnt man einen neuen Kernbrennstoff, Plutonium.

Wesentlich effektiver verläuft dieser Prozeß in Reaktoren mit schnellen Neutronen. Die aktive Zone des Reaktors, der mit dem reinem ^{235}U oder mit Plutonium arbeitet, wird mit dem unbrennbaren, „rohen" Uranisotop oder mit Thorium umgeben. Durch Absorption der aus dieser Zone herausfliegenden schnellen Neutronen setzen sich die genannten Stoffe in spaltbares Material um.

Vorläufig sehen sich allerdings die Schöpfer dieser Reaktoren einer ganzen Reihe ungelöster ingenieurtechnischer und physikalischer Probleme gegenüber. Die Reaktoren müssen wirtschaftlich sein. Die wichtigste Bedingung aber ist, daß sich die Plutoniummenge in diesen Reaktoren zur Sicherung des notwendigen Entwicklungstempos der Kernenergetik in 5 bis 7 Jahren mindestens verdoppelt. Alle bereits existierenden oder im Bau befindlichen Reaktoren mit schnellen Neutronen ermöglichen die Verdoppelung

des Plutoniums, jedoch nur in einem 2- bis 4fach längeren Zeitraum als dem erforderlichen. Deshalb schlugen die Physiker ein Verfahren zur Gewinnung spaltbaren Materials vor, das nicht länger an thermische oder schnelle Reaktoren gebunden war, sondern Elementarteilchenbeschleuniger benutzte.



Schema eines Siedewasser-Kernreaktors (*Dr* Druckkessel, *W* Wasserfüllung, *B* Brennelemente, *St* Steuerstäbe, *StF* Steuerstabführungen, *StA* Steuerstabantriebe, *Sp* Speisewassereintritt, *D* Dampfaustritt)

Die Atomkerne sind regelrechte, bis oben hin mit Nukleonen vollgestopfte „Lagerhäuser". Das Problem ist nur, wie man sich Zugang zu ihnen verschaffen kann. In den Kernreaktoren werden die Neutronen durch Spaltungsreaktionen freigesetzt. Doch es gibt auch eine andere Möglichkeit. Zu Beginn unseres Jahrhunderts gelang es Rutherford,

mit Hilfe eines ganz primitiven Werkzeugs, mit einer α-Teilchenquelle, zum ersten Mal aus leichten Kernen Protonen herauszuschlagen. Aber wieviel kann man erreichen, wenn man im Schloß des gut gesicherten Kern„safes“ fast nur mit bloßen Händen „herumstochert“? Als sich die Wissenschaftler mit Geschützen größeren Kalibers bewaffneten, mit hochleistungsfähigen Elementarteilchenbeschleunigern, gelang es ihnen, auch die Spaltungsreaktion schwerer Atome auszulösen. Beschleunigte Protonen schütteln die mit nur schwach gebundenen Nukleonen buchstäblich überladenen Kerne so stark durch, daß auf einmal einige Dutzend Partikeln herausfallen. Ein Proton hoher Energie kann etwa 17 Neutronen aus einem Urankern und ungefähr 12 aus einem Bleikern „herausscheuchen“. Die freigesetzten Partikeln besitzen eine hinreichend große Energie, um beim Zusammenprall mit anderen Kernen nun ihrerseits auch diese in Unruhe zu versetzen. So öffnet sich eine „Tür“ nach der anderen in den nuklearen „Vorratshäusern“. Bei Kernspaltungsreaktionen kann man immer nur einige wenige Neutronen aus den Kernen des seltenen spaltbaren Materials gewinnen. Bringt man jedoch ein Stück Blei in ein intensives Protonenbündel, das aus dem Beschleuniger austritt, dann verwandelt sich das Blei in einen Neutronengenerator.

Und nun benutzen wir anstelle des Bleis ein hinreichend großes massives Target aus ^{238}U oder aus Thorium. Jetzt braucht man nur den Beschleuniger einzuschalten, damit die Protonen die Kerne des Targets „zu schütteln“ beginnen, und die „abfallenden“ Neutronen „trocknen“ das unbrennbare Uran. Dieses Verfahren zur Gewinnung von sekundärem Kernbrennstoff hat die Bezeichnung „elektronukleares Verfahren“ erhalten.

Der Grundgedanke dieses Verfahrens, seine physikalischen Grundlagen, sind seit langem bekannt. Er konnte jedoch früher nicht angewendet werden, weil der dazu erforderliche Beschleuniger fehlte. Heute steht den Physikern eine große Auswahl zur Verfügung: Zyklotron, Phasotron, Synchrophasotron. Doch keine unter den existierenden Anlagen ist für diesen Zweck geeignet.

Der Beschleuniger von Serpuchow beschleunigt Protonen auf 70 GeV. Die Zahl der vom Beschleuniger gleichzeitig beschleunigten Partikeln ist jedoch nicht groß und beträgt 10^{12} Protonen in der Sekunde. Für die großtechni-

sche Neutronenproduktion nach dem elektronuklearen Verfahren genügt für die Protonen eine Energie von 1 GeV, doch der Beschleuniger muß 10^{-6}mal mehr Partikeln liefern. Wie könnte man das Magnetfeld des Beschleunigers veranlassen, eine so ungeheuer große Zahl von Protonen zu erfassen, festzuhalten und zu beschleunigen? In einem Beschleuniger für starke Teilchenströme müssen die Partikeln mit Hilfe des Magnetfeldes noch stärker fokussiert werden als im Beschleuniger von Serpuchow. Die Frage war: Ist es überhaupt möglich, zur gleichen Zeit die Dichte des Protonenbündels zu steigern und die Umlauffrequenz konstant zu halten?

Zunächst sah es so aus, als könnte man beiden Forderungen nicht gleichzeitig genügen. Ein Versuch würde sicherlich die Frage zu klären helfen, aber woran sollte er angestellt werden? Ehe man daran gehen kann, einen komplizierten und teuren Beschleuniger zu bauen, muß man auch sicher sein, daß er funktionsfähig sein wird. Den Teufelskreis zu durchbrechen gelang sowjetischen Wissenschaftlern, die unter der Leitung des Korrespondierenden Mitglieds der Akademie der Wissenschaften der UdSSR W. Dshelepow und Prof. W. Dmitrijewski ein Modell des Protonenzyklotrons für starke Teilchenströme entwickelten.

Wenn man von einem Modell für einen neuen Maschinentyp spricht, so meint man gewöhnlich eine verkleinerte Kopie. Was bedeutet hingegen die Schaffung eines Beschleunigermodells? Ein Minibeschleuniger, dessen Maße sämtlich um einen bestimmten Faktor reduziert sind, kann nur ein Anschauungsmodell, jedoch kein funktionsfähiges Modell sein. Der Minimagnet, dessen Maße allesamt auf einen gewissen Bruchteil reduziert sind, kann ja die Protonen niemals auf eine Energie von 1 GeV beschleunigen, während die Partikelnbewegung bei der Geschwindigkeit modelliert werden muß, die die Partikeln gerade bei dieser Energie haben.

Ein Protonenmodell zu finden, ist leicht gesagt. Aber man fand es doch! Als gleichberechtigte Bürger in der Welt der Elementarteilchen besitzt auch das Elektron die Einheitsladung, hat dafür aber nur etwa $2 \cdot 10^{-3}$ der Protonenmasse. Elektronen mit einer Energie von nur 0,5 MeV besitzen die gleiche Geschwindigkeit wie die schweren Protonen bei 1 GeV und ahmen die Bewegung der Protonen im Magnetfeld ausgezeichnet nach.

An einem kleinen „elektronischen" Modell des Protonenzyklotrons mit einem Durchmesser von nur 2 m gelang es, die notwendige Feldkonfiguration auszuwählen. Das Modell war durchaus lebensfähig. Anfang 1971 teilte der Direktor des Laboratoriums für Kernprobleme im Vereinigten Institut für Kernforschung W. Dshelepow mit: „Die Versuche am ‚elektronischen' Modell haben gezeigt, daß es möglich sein wird, Protonen auf eine Energie der Größenordnung 1 GeV zu beschleunigen, wobei den Beschleuniger 10^{18} Partikeln/s verlassen werden! Die Leistung dieses Strahls wird einige 100 MW erreichen. Dies ist der Weg zur Schaffung außerordentlich leistungsfähiger Mesonenfabriken, Neutronengeneratoren u. a."

„Mesonenfabrik" — diese Bezeichnung haben die Beschleuniger erhalten, deren Protonenenergie nicht über 1 GeV liegt, bei denen die Partikelnintensität jedoch um einige Größenordnungen höher ist als bei gewöhnlichen Anlagen. An diesen Geräten lassen sich intensive Bündel von π- und μ-Mesonen erzielen. Man benötigt sie nicht nur für die Grundlagenforschung, sondern auch für rein praktische Anwendungsfälle.

In der UdSSR gibt es wenig erschlossene Gegenden mit billigen Energiequellen, so z. B. Ostsibirien mit seinen schier unerschöpflichen Wasserkraftvorräten. Der von den sibirischen Wasserkraftwerken erzeugte Strom fließt heute über sehr ausgedehnte Hochspannungsleitungen in das Gesamtenergiesystem. Die Verluste, die in diesen Leitungen auftreten, sind recht hoch. Ein Beschleuniger für starke Teilchenströme mit einem Target-Reaktor könnte diese billige Energie an Ort und Stelle und mit hohem wirtschaftlichem Nutzen in Kernbrennstoff umsetzen. Die sehr „kompakten" Produktionserzeugnisse dieses „Werkes" könnte man dann ohne alle Schwierigkeiten dorthin transportieren, wo sie benötigt werden.

Wir wissen vorläufig noch nicht, wann, wo und in welcher Variante eine Anlage zur Gewinnung von Sekundärbrennstoff aufgebaut wird. Das ist von vielen Faktoren abhängig: von der Weiterentwicklung der Beschleunigertechnik, davon, ob es gelingen wird, für die Konstruktion des Target-Reaktors eine günstige ingenieurtechnische Lösung zu finden, und schließlich davon, ob diese reale Anlage ökonomisch vorteilhaft sein wird.

Sicher ist eines: Hier wird ein neues Verfahren zur Er-

zielung spaltbaren Materials vorgeschlagen, das auf einer tiefgehenden Kenntnis des Verhaltens von Elementarteilchen hoher Energien fußt.

Atome von Menschenhand

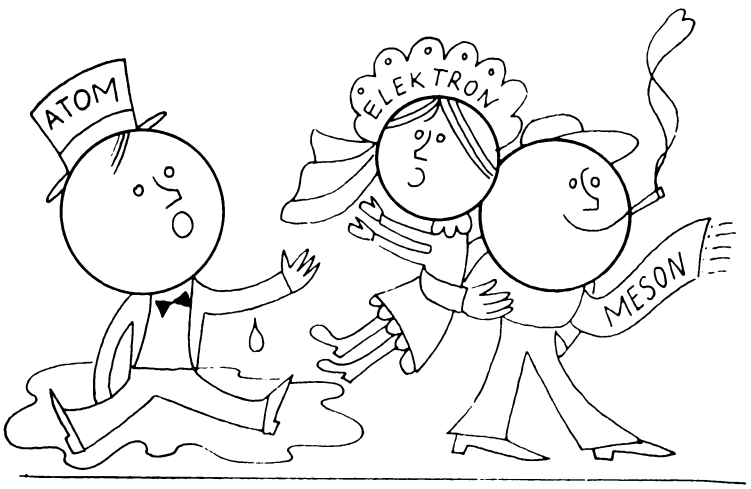
Im Sommer 1971 empfing die Stadt Dubna in der Nähe von Moskau wieder einmal Gäste; es waren die Teilnehmer der IV. Internationalen Konferenz über Hochenergiephysik und Kernstruktur. Im Verlauf dieser Konferenz traten nacheinander 3 sowjetische Wissenschaftler an das Rednerpult und berichteten über die Erfolge auf einem neuen in Dubna entstandenen Forschungsgebiet, der Mesochemie. „Die Arbeiten der sowjetischen Wissenschaftler im Bereich der Mesochemie sind die besten in der Welt. Wir haben den Wunsch, mit ihnen zusammenzuarbeiten", sagte Prof. L. Rousen aus den USA im Verlauf der Konferenz.

Was ist das eigentlich, Mesochemie? An der Wand des großen Saales, in dem das Synchrozyklotron des Vereinigten Instituts für Kernforschung steht, münden die Öffnungen einer Reihe von Kanälen, über die aus dem Beschleuniger verschiedene Partikeln (Protonen, Neutronen, π-Mesonen) für Versuchszwecke „angeliefert" werden. Dort, wo die gebündelten μ-Mesonen austreten, stehen Anlagen, in denen mit Hilfe dieser Partikeln die wichtigsten Parameter chemischer Reaktionen studiert werden. Diese Anlagen sind von vielen anderen ähnlichen Geräten im Raum kaum zu unterscheiden. Sie sind sehr „physikalisch", bestehen aus Elementarteilchenzähler, massiven Bleipanzern u. a. Nirgends ist etwas „Chemisches" zu sehen, keine Kolben, Reagenzgläser oder Destillationsapparate. Auch mit dem untersuchten Stoff kommt der Chemiker hier nicht unmittelbar in Berührung. Während der Laufzeit des Beschleunigers befinden sich die Wissenschaftler einige Dutzend Meter von diesem Raum entfernt und verfolgen nur anhand der Nachweisgeräte die im Material des Targets ablaufenden Reaktionen.

Wie kam es zu diesem neuen erstaunlichen Verfahren zur Erforschung der chemischen Eigenschaften der Elemente? Das μ-Meson ist einer der Veteranen in der Liste der Elementarteilchen. Man fand es bereits 1938 in der

kosmischen Strahlung, einige Jahre nachdem der japanische theoretische Physiker H. Yukawa eine leichte instabile Partikel als Überträger der Kernkräfte vorhergesagt hatte.

Doch bald waren die Physiker von diesem Teilchen, das sich auf ihren „Aufruf" hin so rasch gemeldet hatte, enttäuscht. Das μ-Meson war nicht für die Rolle geeignet,



die man ihm zugedacht hatte. Dafür tauchte die Frage auf, welche Stellung dieses Teilchen in der Natur einnimmt, das einem Elektron bis auf den Fakt, daß seine Masse 200-fach höher lag, ähnelte? Diese bereits vor 30 Jahren aufgeworfene Frage ist bis heute unbeantwortet geblieben, obwohl sie im Mittelpunkt der Aufmerksamkeit vieler Physiker steht.

„Offenbar", so äußerte sich Akademiemitglied M. Markow, „ist eines der grundlegenden Probleme der modernen Elementarteilchentheorie darin zu verstehen, welche Unterschiede in den physikalischen Eigenschaften des μ-Mesons einerseits und des Elektrons andererseits bestehen und welchen Platz das μ-Meson und das Elektron in der Systematik der Elementarteilchen einnehmen."

Mit Hilfe der Beschleuniger haben die Experimentalphysiker seit den 50er Jahren die Eigenschaften schneller Mesonen ebenso wie die Eigenschaften von Mesonen, die in Materie zum Stillstand kommen, detailliert untersucht.

Das rätselvolle Teilchen gab jedoch den Wissenschaftlern seine Geheimnisse nicht preis. Dafür haben aber gerade diese Arbeiten die Entstehung der Mesochemie stimuliert.

μ^+- und μ^--Mesonen bilden sich beim Zerfall einer schwereren instabilen Partikel, des π-Mesons. Bei ihrer Entstehung tritt auch ein Neutrino auf. Dieses erstaunliche Teilchen wiederum beschert seinen „Taufpaten" stets irgendeine ungewöhnliche Eigenschaft.

Auch die μ-Mesonen gehen nicht „leer" aus. Die magnetischen Momente aller Partikeln gleichen Vorzeichens besitzen eine streng definierte Richtung. Man sagt, daß sie polarisiert sind. Wie groß war jedoch das Erstaunen der Physiker, als sie feststellten, daß eine Bremsung dieser Partikeln in Materie unter anschließendem Stillstand genügt, damit die Mehrzahl der Mesonen in den wenigen millionstel Sekunden, die bis zu ihrem Zerfall verbleiben, ihre Polarisation verliert. Was geschieht mit dem Target, das sich diesen Partikeln in den Weg stellt?

Obwohl man an verschiedenen Stoffen Messungen vornahm, ließen sich die erhaltenen Meßergebnisse nicht interpretieren. Bei bestimmten Targets verloren weniger als die Hälfte aller Mesonen, bei anderen dagegen fast sämtliche Partikeln ihre ursprüngliche Polarisierung. Die Polarisation änderte sich abhängig von der Temperatur des Targetmaterials sowie von dessen Molekularstruktur, von Verunreinigungen sowie von der Stärke eines äußeren Magnetfeldes und von vielen anderen äußeren Bedingungen.

Der hervorragende sowjetische theoretische Physiker L. Landau erklärte als einer der ersten, was einem μ^+-Meson geschieht, das in Materie zum Stillstand kommt. Wie sich herausstellte, entreißt das μ-Meson (Myon) einem der Atome in seiner Umgebung ein nur schwach gebundenes Außenelektron, wodurch ein eigenes Atom, das Myoniumatom, entsteht.

Das Myonium konnten die Experimentatoren nachweisen. Unklar blieb nur eins: Was geschieht im Anschluß, in den letzten millionstel Sekunden bis zum Zerfall? Das Myonium besitzt einen „Kern" mit positiver Ladung, nämlich das μ^+-Meson, und trägt in der „Hülle" ein negatives Elektron. So ist das Myonium dem Wasserstoffatom sehr ähnlich. Nur die Masse wird nicht ganz erreicht, denn das Meson besitzt nur ein Neuntel der Protonenmasse, d. h. der Masse eines Wasserstoffkerns. Außerdem reicht die

Lebensdauer des Myoniums nur bis zum Zerfall des μ-Mesons in zwei Neutrinos und ein Positron. Doch auch während dieser verschwindend geringen Zeit bleibt es von den Nachbaratomen nicht „unbemerkt".

Nach seinen chemischen Eigenschaften ist das Myonium ein Doppelgänger des Wasserstoffatoms. Daher geht es die gleichen chemischen Reaktionen ein wie das Wasserstoffatom. Somit führt das μ-Meson innerhalb des Myoniums während der letzten Augenblicke seines Daseins ein für Elementarteilchen ganz ungewöhnliches „Leben"; es lebt als chemisches Element. Dies wiederum kommt in der Richtung seines magnetischen Moments zum Ausdruck.

Die Mitarbeiter des Instituts für theoretische und experimentelle Physik erkannten und wiesen experimentell nach, daß man aus der Änderung der Polarisation der μ-Mesonen mit hoher Genauigkeit die Absolutgeschwindigkeit und den Typ der chemischen Reaktion des Myoniums — damit aber auch des Wasserstoffs — mit dem Umgebungsmaterial bestimmen kann. Mittels gewöhnlicher chemischer Verfahren ist dies unmöglich. Für das Mesonenverfahren dagegen existieren hier keine Probleme. Das markierte radioaktive Myoniumatom „berichtet" mit Hilfe des beim Zerfall freigesetzten Positrons über den Ablauf der chemischen Reaktion in einer festen, flüssigen oder gasförmigen Probe. Damit entfällt für die Wissenschaftler die Notwendigkeit, das Endprodukt der chemischen Reaktion aus dem untersuchten Material abzutrennen.

Anders verläuft das „Schicksal" des μ^--Mesons. Sobald es in Materie abgebremst ist, wird es sofort von einem Atomkern eingefangen und umkreist diesen auf einer Umlaufbahn. Hier spielt das negative Myon die Rolle eines „schweren" Elektrons. So entsteht ein Mesoatom, das man als eigentümliches „Isotop" eines in der Natur existierenden Elements auffassen kann. Im chemischen Sinn ähnelt das Mesoatom dem Atom eines real existierenden Elements, das im Periodensystem eine Stelle weiter links steht als das Targetmaterial, in dem das negative Meson zum Stillstand gekommen ist.

Eine Gruppe wissenschaftlicher Mitarbeiter des Laboratoriums für Kernprobleme im Vereinigten Institut für Kernforschung hat sich mehrere Jahre lang mit folgender Frage befaßt: Warum ändern die μ-Mesonen bei der Erzeugung eines Mesoatoms unter verschiedenartigen Bedin-

gungen die Richtung ihrer magnetischen Momente unterschiedlich? Nach einer Vielzahl von Versuchen am Beschleuniger erkannten die Physiker schließlich, daß sie Zeugen einer außerordentlich interessanten Erscheinung, der chemischen Reaktionen des Mesoatoms, geworden waren! In einem wassergefüllten Target fingen die Sauerstoffatome μ^--Mesonen ein und verwandelten sich dadurch in Mesoatome, die man mit Stickstoffatomen vergleichen kann. Es entstanden funktionsfähige Modelle von atomarem Stickstoff.

Mesostickstoffatome stießen mit Atomen, Molekülen oder Molekülbruchstücken ihrer Umgebung zusammen und gingen rasch chemische Verbindungen ein. Wiederum wurde die Polarisation der Mesonen gestört. Diese Veränderung konnten die hochempfindlichen Geräte zur Registrierung der nach dem Zerfall der Mesonen aus dem Target herausfliegenden Elektronen sofort erfassen. Aus der Störung der Polarisation läßt sich der Ablauf der chemischen Reaktion wiederum leicht ermitteln.

Wasserstoff ist eine der „Hauptpersonen" in der organischen Chemie. Fast 90% aller Reaktionen in komplizierten technologischen Prozessen wie etwa dem Kracken von Erdöl laufen unter Beteiligung von atomarem Wasserstoff ab. Wären die Absolutgeschwindigkeiten aller Reaktionen des Wasserstoffs mit hoher Genauigkeit bekannt, dann könnte man mittels elektronischer Rechner für jeden großtechnischen chemischen Prozeß die optimale Variante vorausberechnen. Heute ist diese Tatsache noch ein Wunschtraum. Die Technologie wird nach dem schrittweisen Verfahren des „Probierens und Annäherns" im Verlauf einiger Jahre oder sogar Jahrzehnte „eingefahren".

Es ist mit gewöhnlichen chemischen Verfahren einfach unmöglich, eine gewisse Kanalisierung der chemischen Reaktionen zu erreichen. Die Reaktionen laufen praktisch stets nichteindeutig ab und werden in den verschiedenen Anlagen durch alle möglichen Nebenreaktionsschleifen überlagert. Das ist auch der Grund dafür, warum sich die von verschiedenen Forschern erhaltenen Absolutwerte für die Reaktionsgeschwindigkeiten so stark voneinander unterscheiden. Diese Differenzen sind so groß, daß unter Chemikern Unterschiede der Reaktionsgeschwindigkeiten um den Faktor 100 zwar als schlecht, aber doch als erträglich gelten; ein Unterschied um den Faktor 10 wird als befrie-

digend und um den Faktor 2 bis 3 als voll befriedigend angesehen.

Unter gänzlich anderen Verhältnissen arbeiten die Physiker bei der Erforschung der Elementarteilchen. Ihre Verfahren sind so exakt, daß die erhaltenen Ergebnisse von den Versuchsbedingungen praktisch unabhängig sind. Auch das neue Mesonenverfahren zeichnet sich durch diese Eigenschaften aus. Mittels μ-Mesonen kann man die Absolutgeschwindigkeiten sehr rasch ablaufender chemischer Reaktionen von Wasserstoff aber auch schwereren Atomen mit verschiedenen Stoffen und bei unterschiedlichen Temperaturen auf 10% genau ermitteln.

Einige Sorgen bereitet den Chemikern auch ein anderes, nicht weniger populäres Element als der Wasserstoff, der Stickstoff. Salpetersäure ist in der chemischen Industrie unentbehrlich. Eine großtechnische Chemie ohne Ammoniak wäre ebenso undenkbar wie der Flug einer Raumrakete ohne Hydrazin.

Die chemischen Eigenschaften von atomarem Stickstoff, einem Element, das die Menschen seit langem kennen, sind bis heute nur sehr schlecht erforscht. Das hängt in erster Linie mit der großen chemischen Aktivität des Stickstoffs zusammen. Sie verhindert die Herauslösung der einzelnen Reaktionsmechanismen ebenso wie die Bestimmung ihrer quantitativen Parameter, die für die Praxis so wichtig sind.

Hier kommen die Mesoatome zu Hilfe. Durch Untersuchung der Mesoatome des Stickstoffs erhielten die Wissenschaftler erste Angaben über den Charakter der chemischen Wechselwirkung zwischen Stickstoff- und Wasserstoffatomen sowie Wasserstoffperoxidmolekülen. Mit Hilfe elektronischer Apparaturen gelang es festzustellen, daß der Mesostickstoff bei Zimmertemperatur in Wasser sowie in wäßrigen Lösungen innerhalb einer verschwindend kleinen Zeit in der Größenordnung von 10^{-11} s reagiert. Auch die Messung der Absolutgeschwindigkeiten einiger dieser Reaktionen war erfolgreich. Natürlich beschränkt sich die Angelegenheit nicht auf Wasserstoff und Stickstoff. Durch geeignete Auswahl von Elementen für die Bremsung negativ geladener μ-Mesonen kann man funktionsfähige Modelle vieler anderer Atome herstellen und ihr Verhalten untersuchen. Andererseits ist es auch mit Hilfe der Mesoatome möglich, verschiedene Umweltprozesse zu studieren.

Dubna, das „Mekka“ der Mesochemie

In den Schauspielen Chemie und Physik auf der „Bühne der Natur“ treten im Grunde genommen stets die gleichen Darsteller auf. Allerdings sind in den traditionell chemischen Handlungen die Atome und Moleküle in farbenprächtige Gewänder aus furchterregenden Bezeichnungen für die verschiedenen Verbindungen gehüllt. Sie sind durch die chemischen Vorschriften so eingeengt, daß es schwer fällt, hinter dieser ganzen Maskerade die physikalische Grundlage ihres Verhaltens zu erkennen. Es ist wie in einem Maskentheater, wo das wahre Antlitz des Schauspielers nicht zu sehen ist.

Durch die Enthüllung der Atomstruktur haben die Physiker der Chemie zur Selbsterkenntnis verholfen; nun waren die Beziehungen zu erkennen, die in der Natur zwischen der Struktur der Elektronenhüllen und den chemischen Eigenschaften eines Elements bestehen.

Die herkömmlichen Methoden der Experimentalchemie gestatten allerdings die Aufdeckung dieser Beziehungen nicht in jedem konkreten Einzelfall. So entstand die Situation, daß den Experimentatoren die Stütze der Theorie fehlte, während den Theoretikern das erforderliche experimentelle Material zur Prüfung ihrer Berechnungen nicht zur Verfügung stand. Auch Hochleistungsrechner helfen hier nicht weiter. Vorläufig sind die Möglichkeiten der theoretischen Chemie beschränkt.

Die Mitarbeiter des Laboratoriums für Kernprobleme entdeckten als erste, daß die Merkmale der von Mesoatomen herrührenden Röntgenstrahlung die Besonderheiten der chemischen Struktur des Targetmaterials widerspiegeln. Bei der Untersuchung der Oxide verschiedener Elemente fanden die Physiker eine klare Periodizität in den Eigenschaften der Mesoröntgenstrahlung. Wäre das Periodensystem der Elemente nicht bereits vor 100 Jahren entdeckt worden, dann hätte man es aufgrund der Experimente mit den Myonen vorhersagen können.

Das μ^--Meson, das in irgendein Atom gelangt, bewirkt die Emission einer Reihe von Signalen in Form von Röntgenstrahlung, noch ehe es vom Kern eingefangen wird. Aus diesen Signalen kann man unschwer erraten, von welchem Atom es eingefangen wurde.

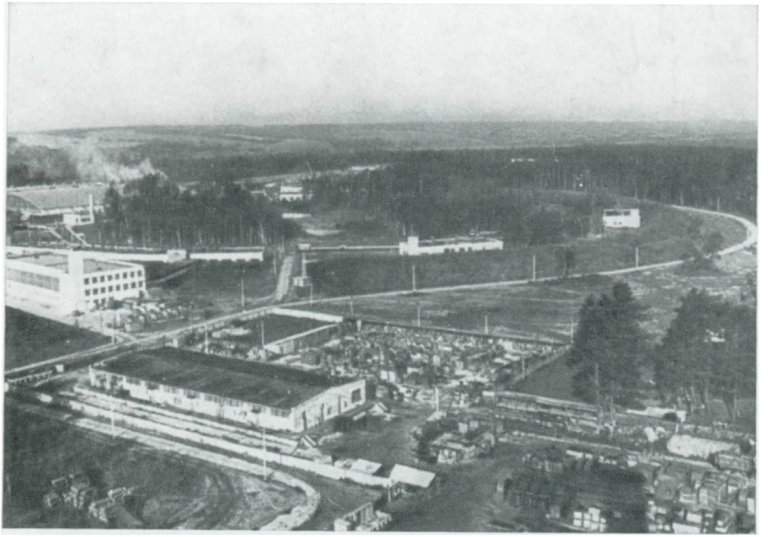
Sind die Wissenschaftler eigentlich imstande zu ermitteln, welche chemischen Elemente sich in einer festverschlossenen Schachtel befinden? Die Experimentalphysiker, die mit μ-Mesonen arbeiten, können durch Bestrahlung der Schachtel mit negativen Mesonen aufgrund der daraufhin emittierten Röntgenstrahlung sofort feststellen, welche chemischen Elemente sich in dieser Schachtel befinden.

Ein bleistiftdünnes Elementarteilchenbündel, wie es in der „Mesonenfabrik" von Los Alamos in den USA erzeugt wird, vermag ohne Schwierigkeiten in jedes innere Organ eines Menschen vorzudringen. So wird es möglich, die Strahlung von gesundem Gewebe mit der Strahlung zu vergleichen, die von erkranktem Gewebe emittiert wird. Die medizinische Frühdiagnose bildet die notwendige Voraussetzung für die rasche Wiedergesundung des Menschen, und gerade diese Voraussetzung vermag die Grundlagenforschung über die Eigenschaften der Mesoatome zu erfüllen.

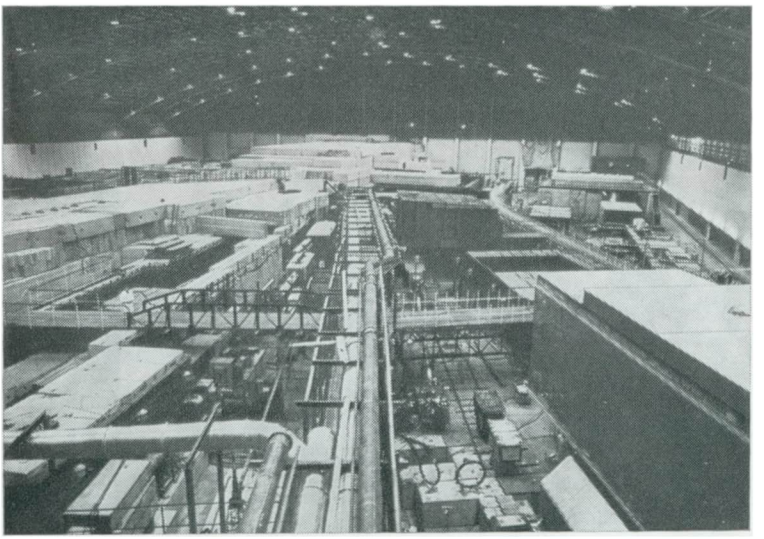
Erstaunlich war auch die Entdeckung des Einflusses der Elektronenstruktur wasserstoffhaltiger Verbindungen auf die Wahrscheinlichkeit der Kernreaktion unter Absorption negativ geladener π-Mesonen durch Protonen. Damit haben die π-Mesonen ihren „zweiten Beruf erlernt". Ihre Fähigkeit, rasch dahinterzukommen, unter welchen Verhältnissen die Wasserstoffatome in den Molekülen komplizierter Verbindungen existieren, läßt diese Partikeln viele chemische Geheimnisse lüften.

Wie beeinflussen sich ein Lösungsmittel und der darin gelöste Stoff gegenseitig? Jahrzehntelang ist diese Frage unbeantwortet geblieben. Mendelejew vermutete, daß der Lösungsvorgang keine mechanische Verkleinerung in Partikeln immer geringerer Größe bis hin zu den Molekülen, sondern eine chemische Wechselwirkung darstellt. Doch weder er noch Chemiker späterer Generationen hatten dafür Beweise zur Hand.

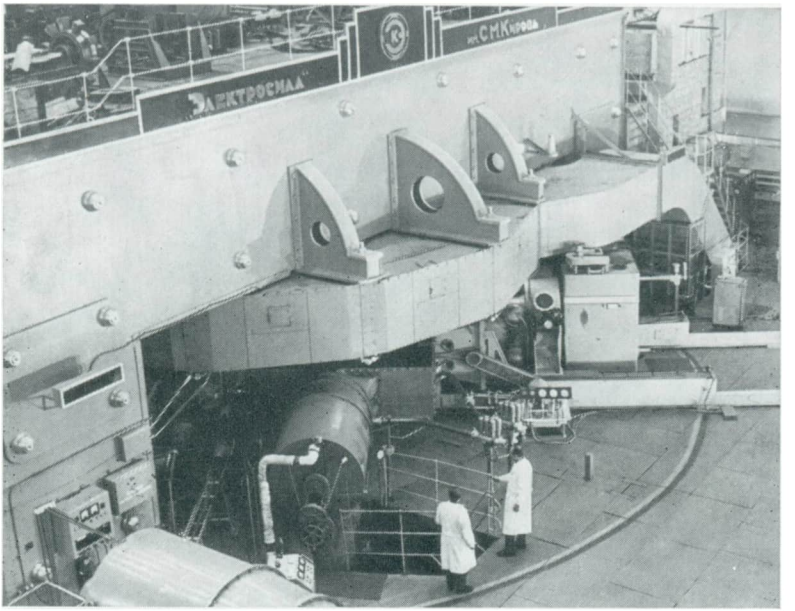
Es ist gar nicht so lange her, daß die Physiker in einen π-Mesonenstrahl, der das Synchrozyklotron des Laboratoriums für Kernprobleme im Vereinigten Institut für Kernforschung verließ, zunächst ein Target brachten, das mit destilliertem Wasser gefüllt war. Danach wurde das gleiche Target, das nun aber eine wäßrige Lösung bestimmter Stoffe enthielt, benutzt. Welche Folgerungen ergaben sich aus diesen Experimenten? Im zweiten Fall veränderte sich die Wahrscheinlichkeit des π-Mesoneneinfangs. Also hatte



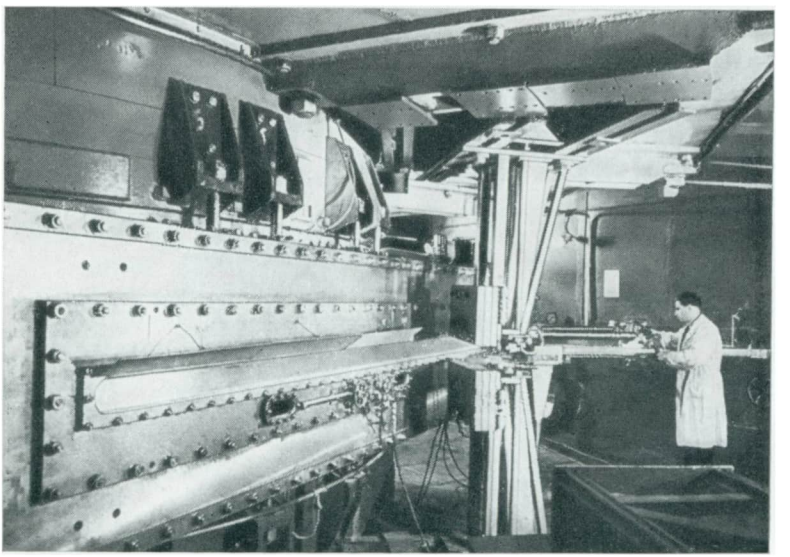
Gesamtansicht des 76-GeV-Protonenbeschleunigers in Serpuchow bei Moskau



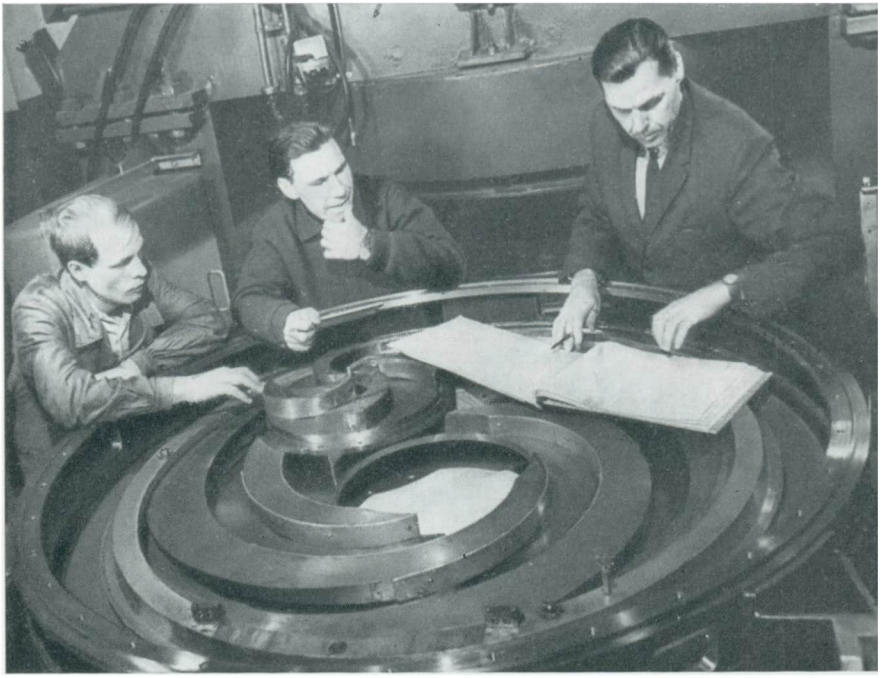
Blick in die 90 160 m² große Experimentierhalle des 76-GeV-Synchrophasotrons



Synchrozyklotron im VIK Dubna zur Beschleunigung von Protonen auf Energien bis zu 680 MeV



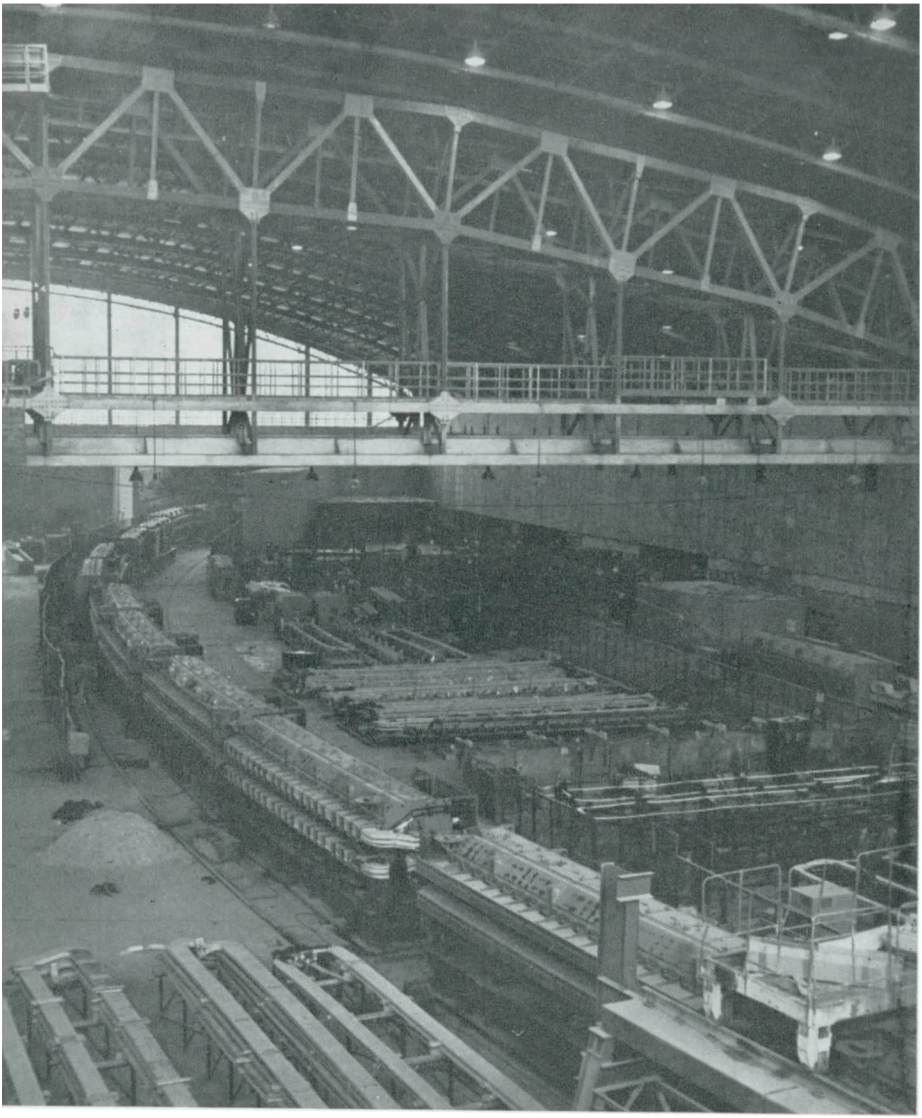
Strahlfenster in der Beschleunigungskammer des 680-MeV-Synchrozyklotrons im VIK Dubna



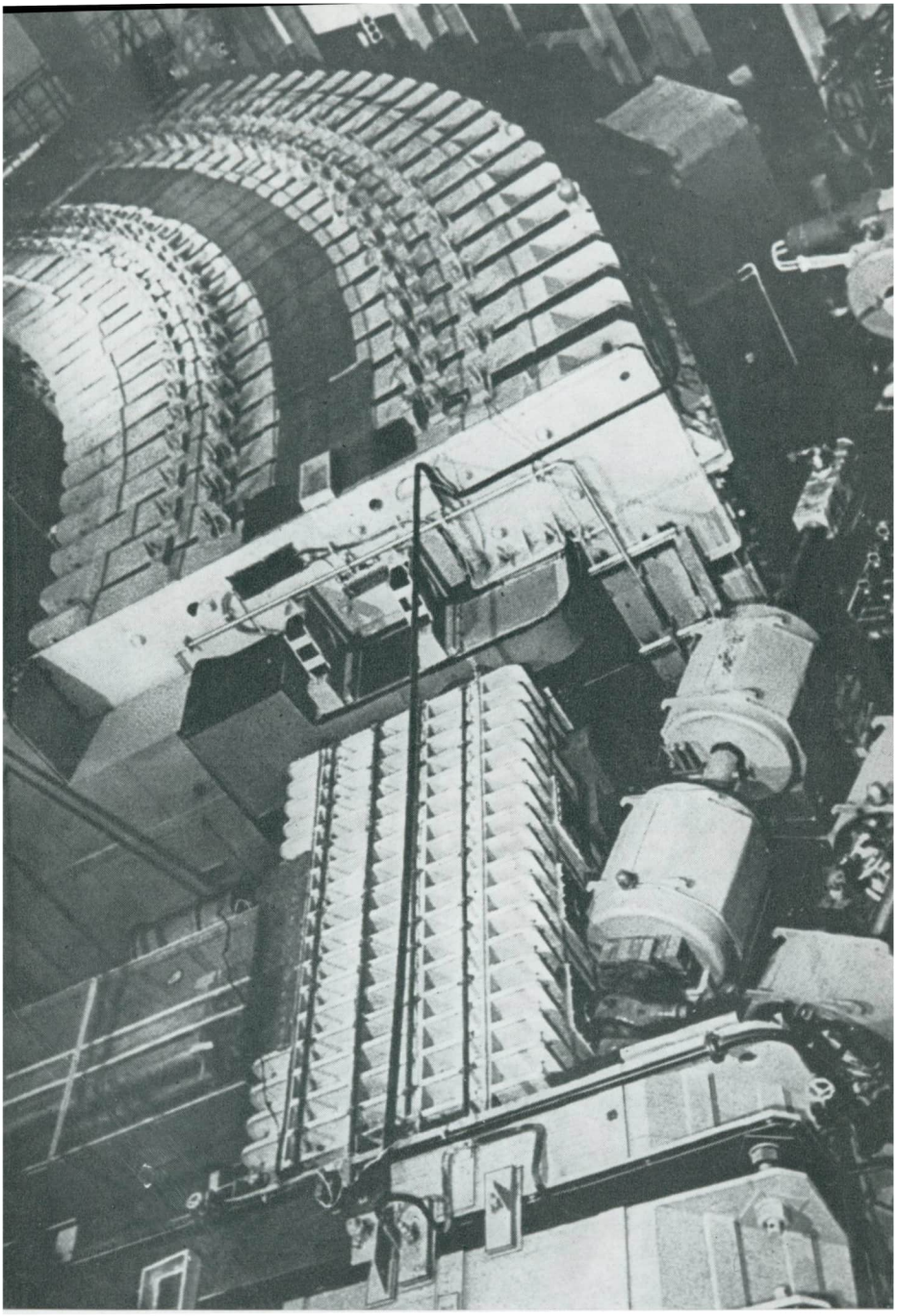
Modell des Magnetsystems für ein Phasotron mit hoher Strahlintensität



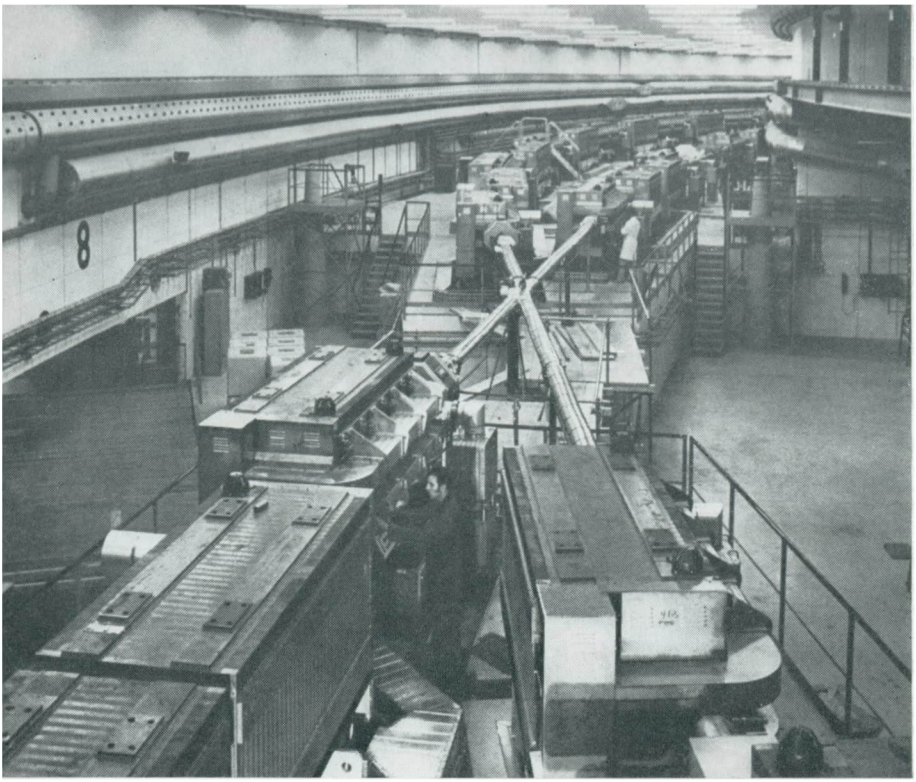
Polschuh des Isochronzyklotrons U-200 im VIK Dubna



Beschleunigungsring während der Montage im Institut für Physik hoher Energien in Serpuchow



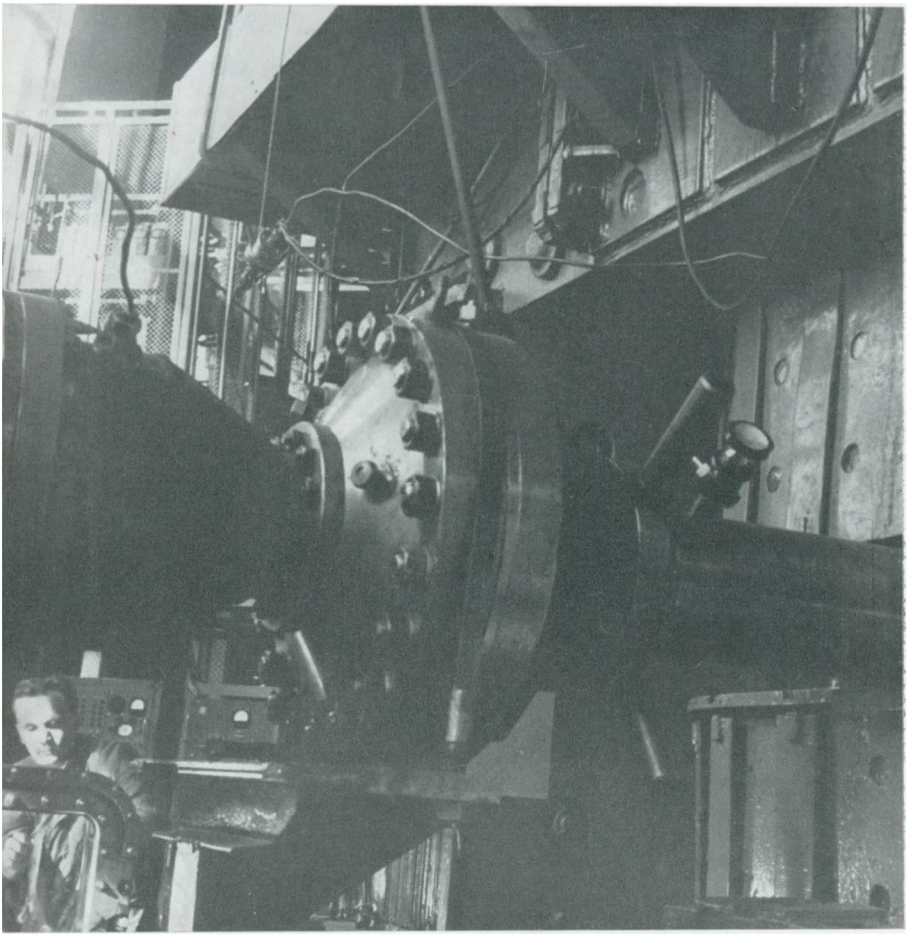
Ringmagnet, Beschleunigungsstrecke (Mitte) und Strahlherausführungen (rechts) am 10-GeV-Synchrophasotron mit schwacher Fokussierung im VIK Dubna



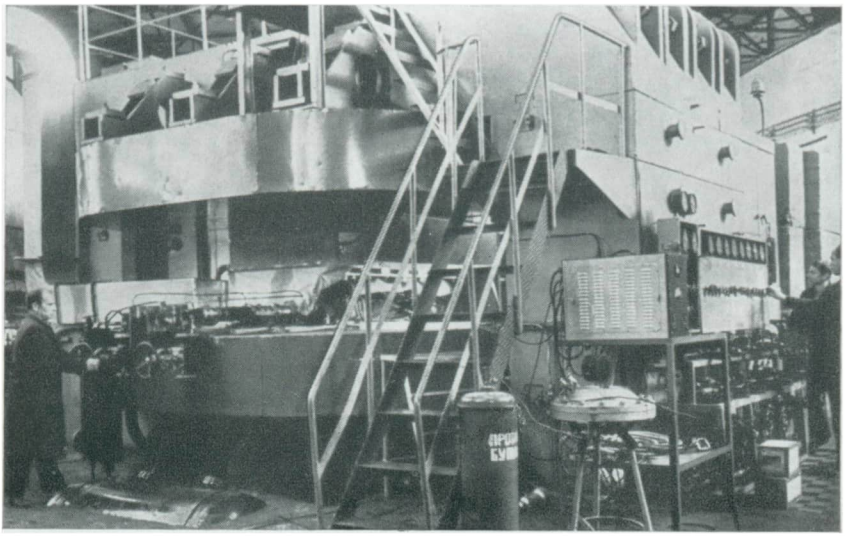
Speicherring für Protonen im CERN bei Genf
mit Kreuzungsstelle



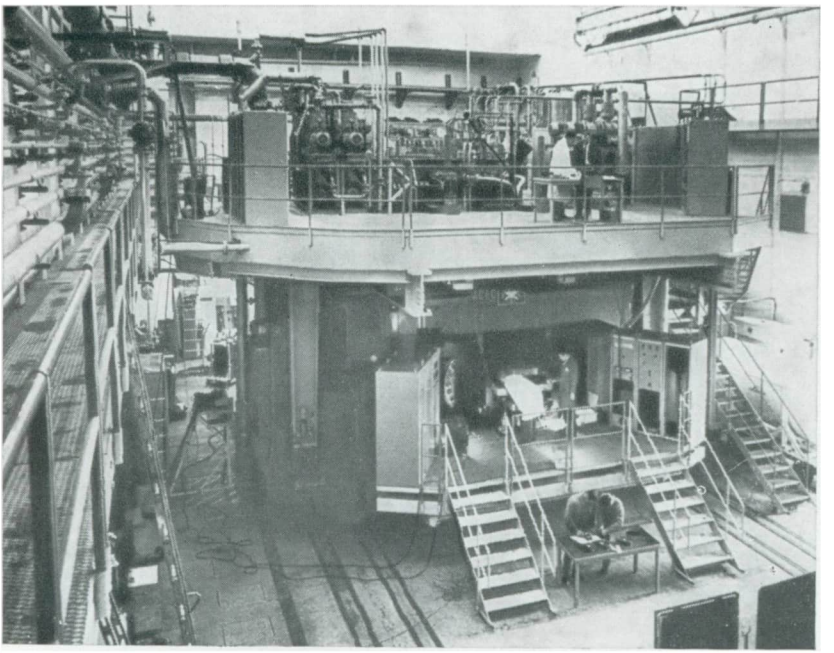
Magnetische Linsen des π-Mesonentraktes am 680-MeV-Synchrozyklotron im VIK Dubna



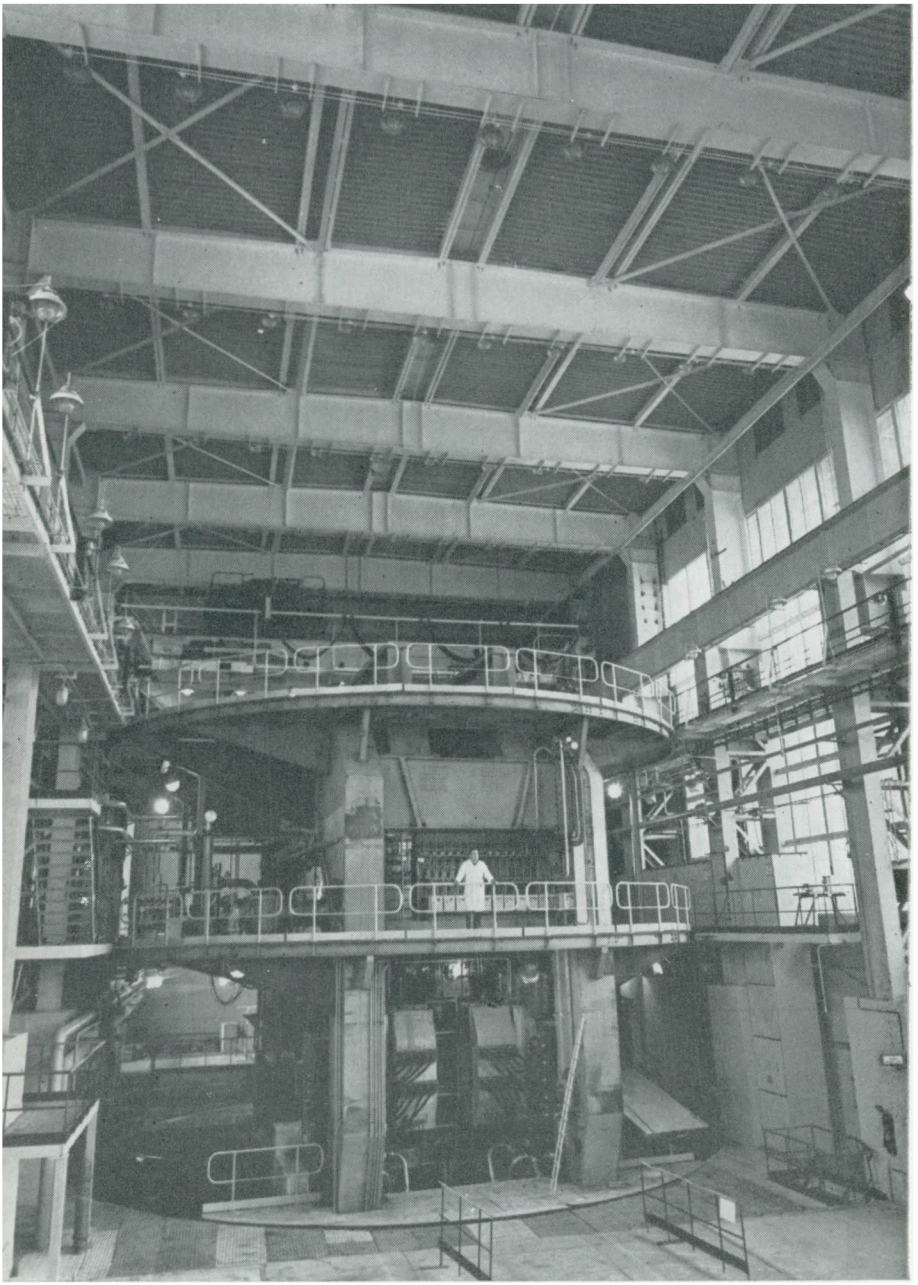
Strahlausgang des 10-GeV-Synchrozyklotrons



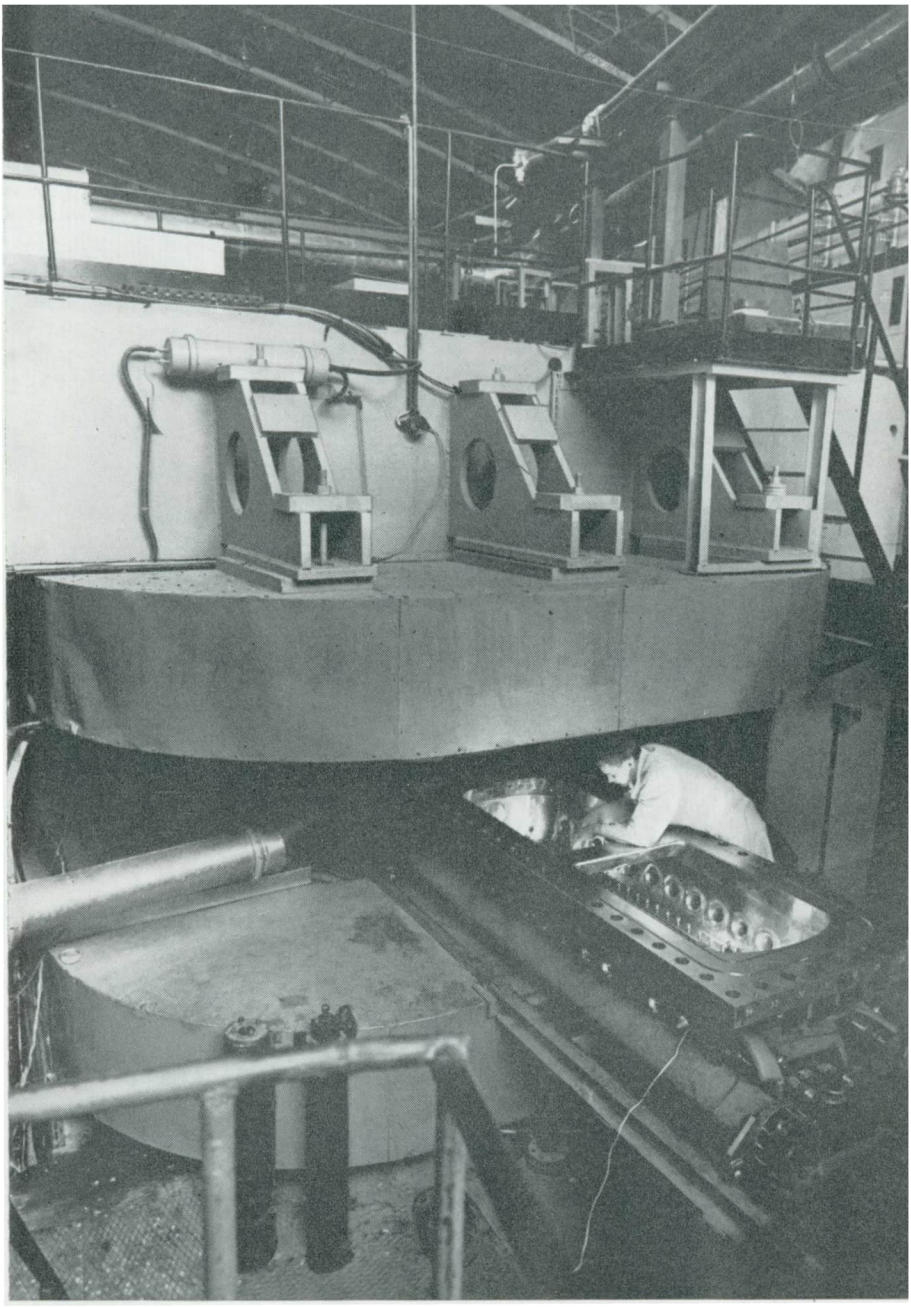
Gesamtansicht der 2-m-Propanblasenkammer
im VIK Dubna



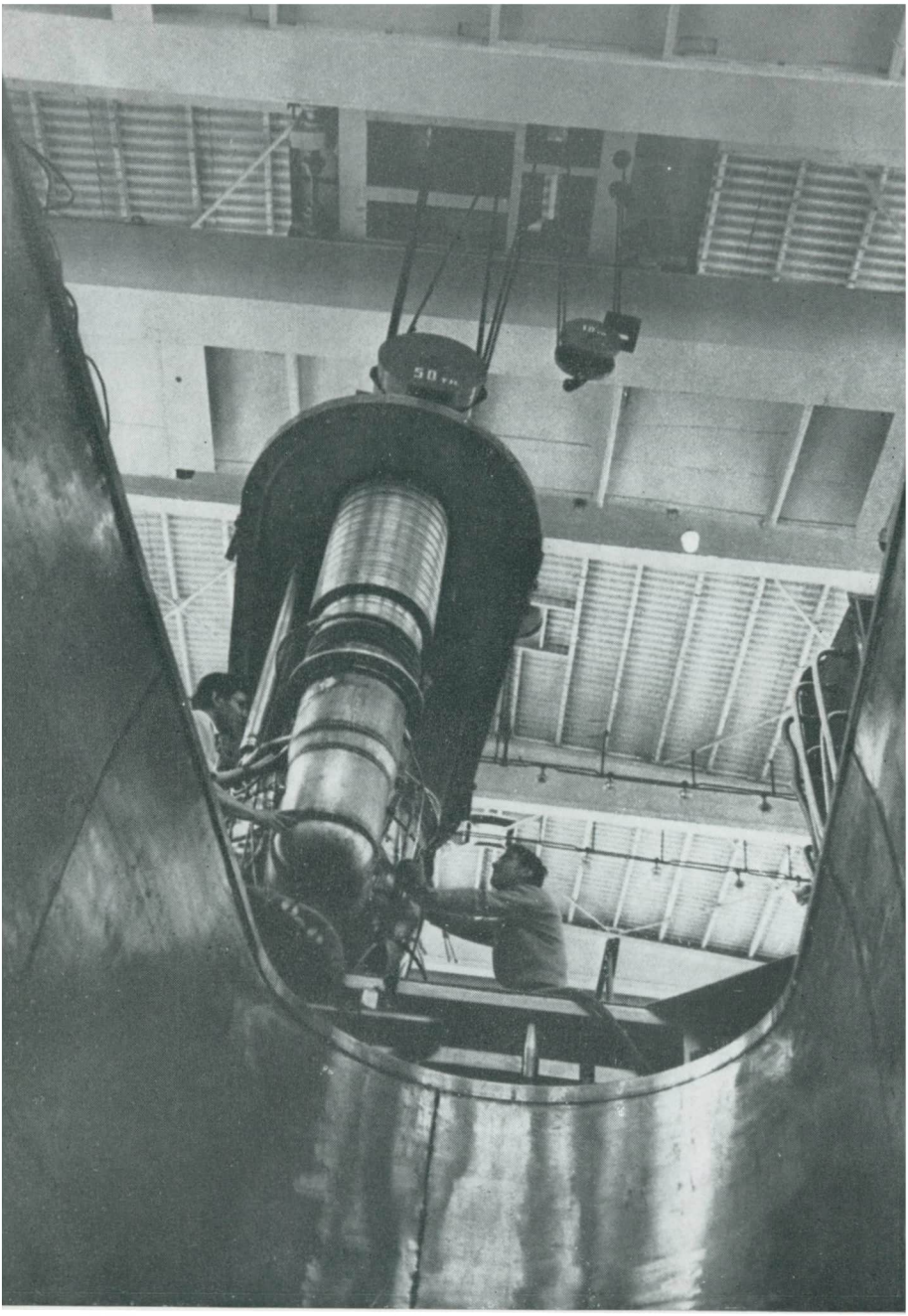
Gesamtansicht der 2-m-Wasserstoffblasenkammer
im CERN



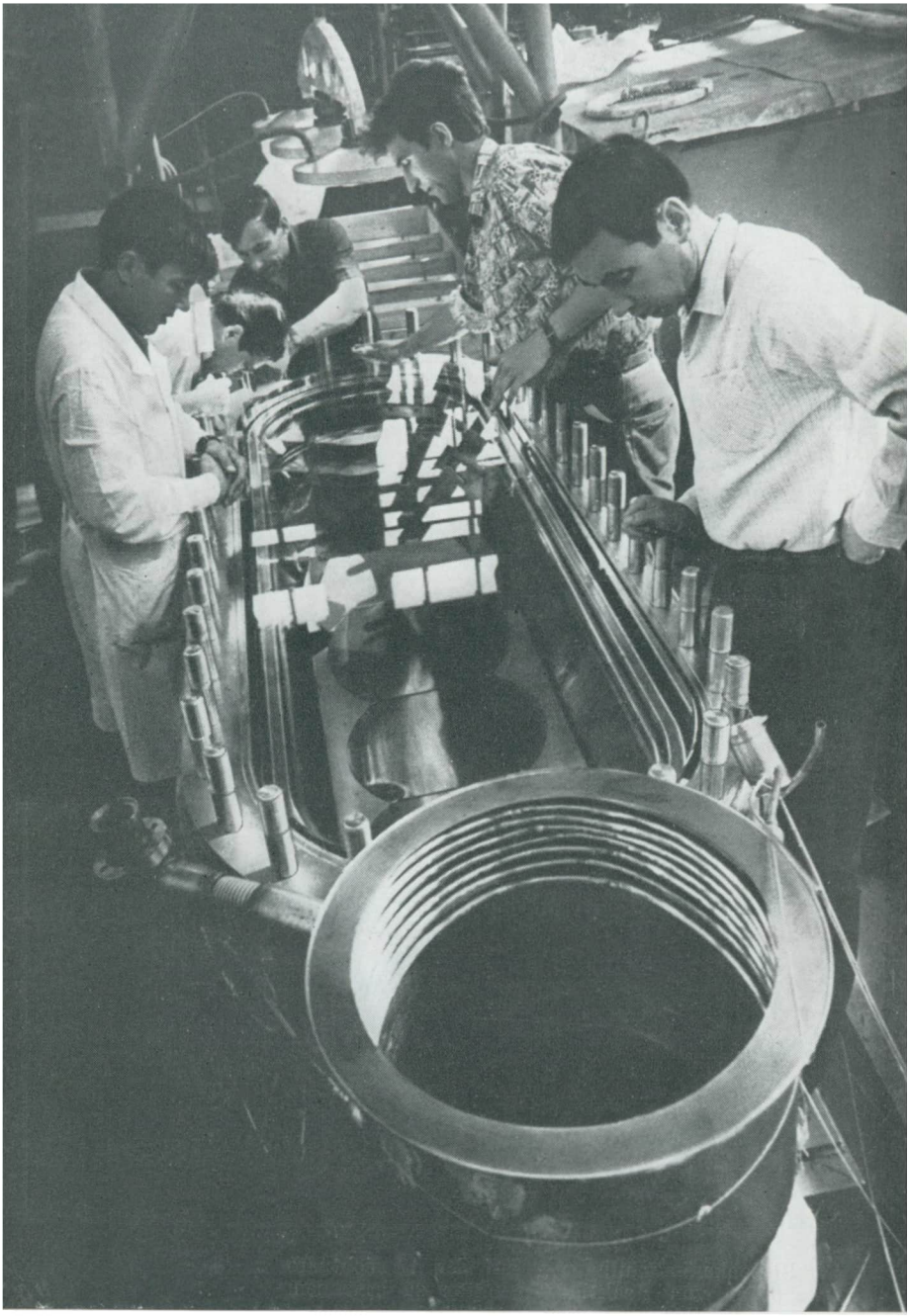
Blasenkammer „Mirabelle“ am Teilchenstrahl des Beschleunigers im Institut für Physik hoher Energien in Serpuchow



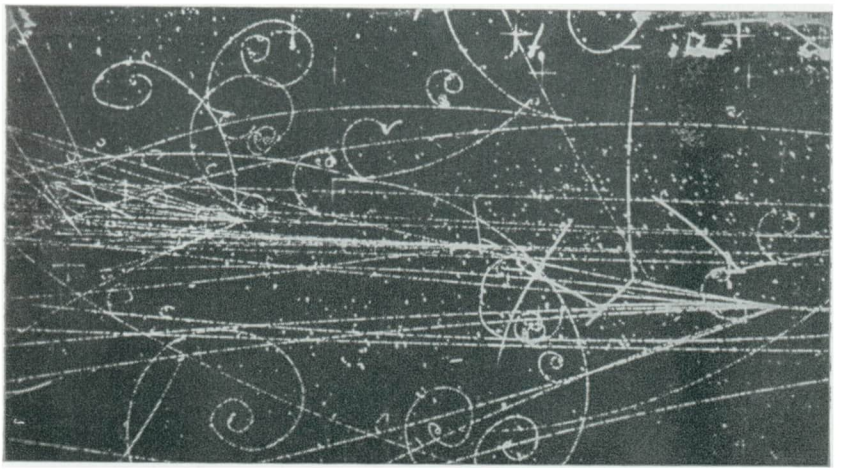
Magnet und Kammer der 2-m-Propanblasenkammer des VIK Dubna am 76-GeV-Beschleuniger in Serpuchow



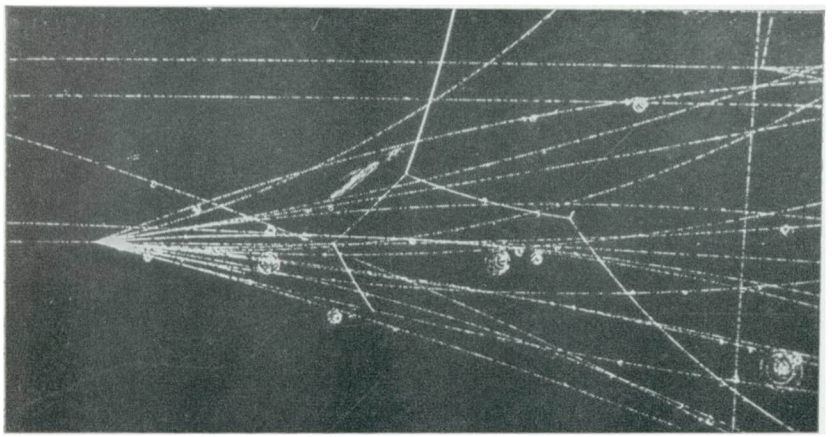
Montage der 2-m-Wasserstoffblasenkammer im VIK Dubna



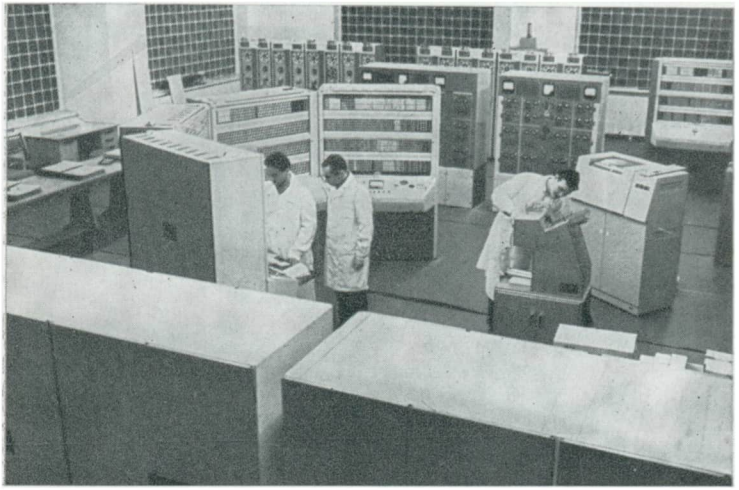
Reaktionsraum (oben) der 2-m-Wasserstoffblasenkammer im VIK Dubna



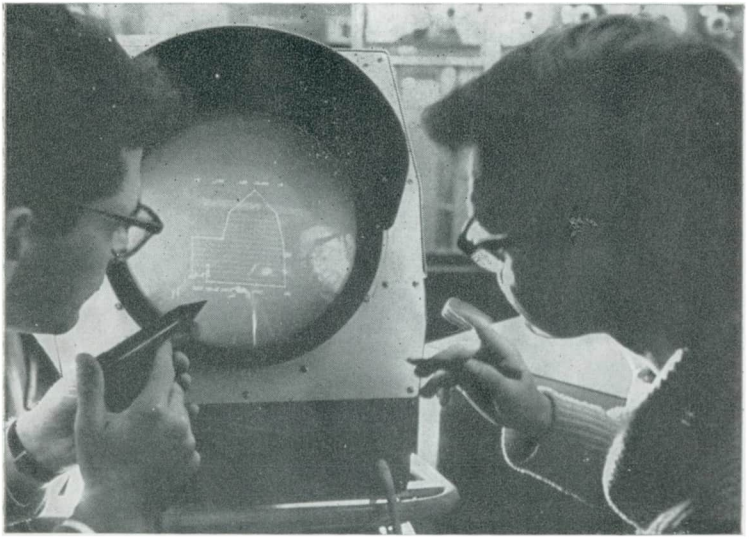
Blasenkammeraufnahme mit vielen Wechselwirkungsereignissen (VIK Dubna)



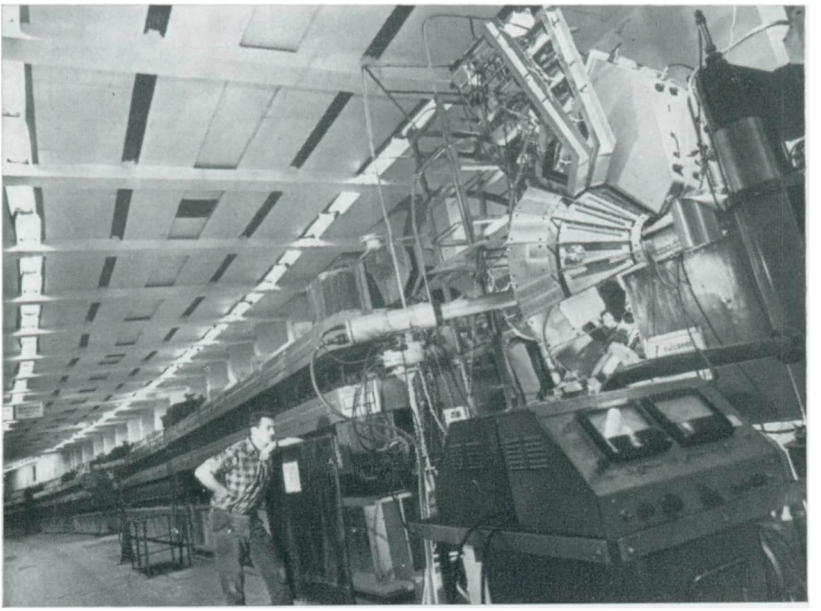
Blasenkammeraufnahme, auf der 18 sichtbare Spuren von Reaktionsprodukten zu erkennen sind (CERN)



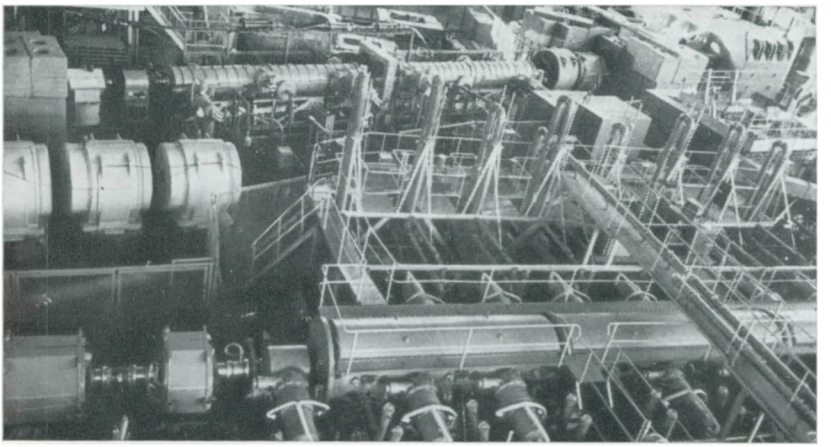
Elektronische Rechenmaschine BESM-6 im VIK Dubna



... und Lichtstiftgerät zur Auswertung von Blasenkammeraufnahmen



Auf der Suche Diracscher Monopole mit Hilfe von Tscherenkow-Zählern am Beschleuniger in Serpuchow



Antiprotonenkanäle nach dem 10-GeV-Synchrophasotron im VIK Dubna zum Transport und zur Separierung der Antiprotonen von negativen Pionen und Kaonen, die am Beschleuniger anfallen

sich die Elektronenstruktur der Wassermoleküle gewandelt. So wurde der Nachweis dafür erbracht, daß das Wasser mit dem darin gelösten Stoff eine chemische Reaktion eingeht.

Was ist eine Säure? Die direkte Antwort auf diese Frage fällt selbst Fachleuten schwer. In einem 1969 erschienenen Lehrbuch „Theoretische anorganische Chemie" steht: „So existiert nach 300jähriger Arbeit mit Säuren noch immer keine einheitliche Auffassung zur Definition des Begriffes ‚Säure' sowie zur Tneorie inrer Eigenschaften."

Liegt die Schwierigkeit vielleicht darin, daß es bis heute keine klare Definition der wichtigsten Eigenschaft aller Säuren, nämlich ihrer Stärke, gibt? Überlegungen darüber, daß die Stärke einer Säure offenbar mit der Struktur ihrer Moleküle zusammenhängt, sind für Chemiker nichts Neues. Allerdings hatten sie kein geeignetes Mittel zur Messung der Elektronendichte an den verschiedenen Stellen eines Moleküls zur Verfügung. So kam man nicht weiter, bis die Physiker zu Hilfe eilten.

Verschiedene Säuren wurden nacheinander mit der „π-Mesonensonde" behandelt. Aus der Änderung des π-Mesoneneinfangs im Wasserstoff, der in diesen Säuren enthalten war, fand man die Verteilung der Elektronendichte in den Molekülen. Als man die Säuren dann nach den erhaltenen Ergebnissen in eine Reihe stellte, zeigte sich, daß sie genau nach abnehmender Stärke geordnet waren. Der Mesonen-„Stärkemesser" hatte nicht „gemogelt".

Das Mesonenverfahren zur Stoffuntersuchung ist ein großer Erfolg der Wissenschaftler aus den sozialistischen Ländern. Die Mesochemie befindet sich gegenwärtig in stürmischer Entwicklung. Längst ist sie aus den Mauern des Laboratoriums für Kernprobleme herausgetreten. Heute ist Dubna ein allgemein anerkanntes Zentrum der mesochemischen Forschung. Wissenschaftler aus vielen Ländern kommen hierher, um ein Praktikum in diesem neuen Wissenschaftsgebiet zu absolvieren.

Die Grundlagenforschung in der Physik der Elementarteilchen hat am „Stamm" der Wissenschaft einen neuen kräftigen Trieb gebildet. Bald schon werden an seinen Zweigen kostbare Früchte wachsen.

Wahrscheinlich werden sehr bald komplexe Wissenschaftskombinate errichtet sein. An einem Hochleistungsprotonenbeschleuniger werden sich Institute für Physik

und Biologie sowie ein Institut zur Erzeugung von Sekundärbrennstoff anschließen, desgleichen Industrieinstitute, Krankenhäuser und andere Einrichtungen, nicht zuletzt ein Atomkraftwerk, dessen Brennstoff vom Beschleuniger geliefert wird und das seinerseits diesen ganzen Komplex mit fast kostenloser Energie versorgt.

Ein Weltall im Kleinen

Ein Laboratorium für alle

Über uns dehnt sich die bodenlose Tiefe des ständig veränderlichen Himmels. Einmal ist er durch Wolken und Nebel verhüllt, ein andermal zeigt er alle Farbübergänge vom Hell- bis Dunkelblau.

Mit der Atmosphäre steht dem Menschen ein regelrechtes natürliches Laboratorium zur Verfügung. Eingesehen hat er dies allerdings erst vor verhältnismäßig kurzer Zeit, zu Beginn unseres Jahrhunderts, obwohl der Begriff „Atmosphäre" selbst sehr viel früher entstanden ist. Heute weiß der Physiker, daß der luftleere interstellare Raum, so als handele es sich dabei um die Vakuumkammer eines Beschleunigers, fast mit Lichtgeschwindigkeit von Protonen durcheilt wird, aus denen die kosmische Primärstrahlung zu 95% besteht. Diese Protonen dringen auch in die Erdatmosphäre ein. Dabei geschieht das gleiche wie z. B. im Beschleuniger von Serpuchow, wenn ein Protonenbündel auf ein Target aufprallt. Allerdings ist dieses Ereignis unter natürlichen Bedingungen sehr viel eindrucksvoller. Die Protonen der kosmischen Strahlung prallen mit riesiger Energie auf die Atmosphäre und zerfallen in eine Vielzahl einzelner „Splitter", in jene Elementarteilchen, die dann auf die Erdoberfläche „herabregnen". So ist unser blauer Himmel nichts anderes als das Target des kosmischen „Protonenbeschleunigers". Dieser „Beschleuniger" hält nicht nur hinsichtlich seiner Energie, sondern auch in bezug auf die Zahl der Elementarteilchen, die die Wissenschaftler hier gefunden haben, den absoluten Rekord.

Die Elektronen, Protonen, Neutronen und Photonen wurden noch vor der Entwicklung der ersten Beschleuniger und auch ohne Beteiligung der kosmischen Strahlung entdeckt. Die Physik der Elementarteilchen im eigentlichen

Sinn entstand jedoch erst, als man in der Wilsonschen Nebelkammer die ersten „Produkte“ des kosmischen Beschleunigers, Positronen, μ-Mesonen, π-Mesonen, K-Mesonen, Hyperonen, fand. 1956 schließlich gelang es, mit Hilfe eines Kernreaktors das Neutrino nachzuweisen.

Die Wissenschaftler kamen bei ihren Überlegungen über die Eigenschaften der schwachen Wechselwirkung zu dem Schluß, daß zwischen einem Neutrino geringer und einem Neutrino hoher Energie beträchtliche Unterschiede bestehen. Alle übrigen Elementarteilchen nehmen an Durchdringungskraft zu, je energiereicher sie sind. Beim Neutrino dagegen mußte es gerade umgekehrt sein! Zur experimentellen Überprüfung dieses Schlusses benötigte man ein Neutrino hinreichend hoher Energie. Aber woher sollte man es nehmen?

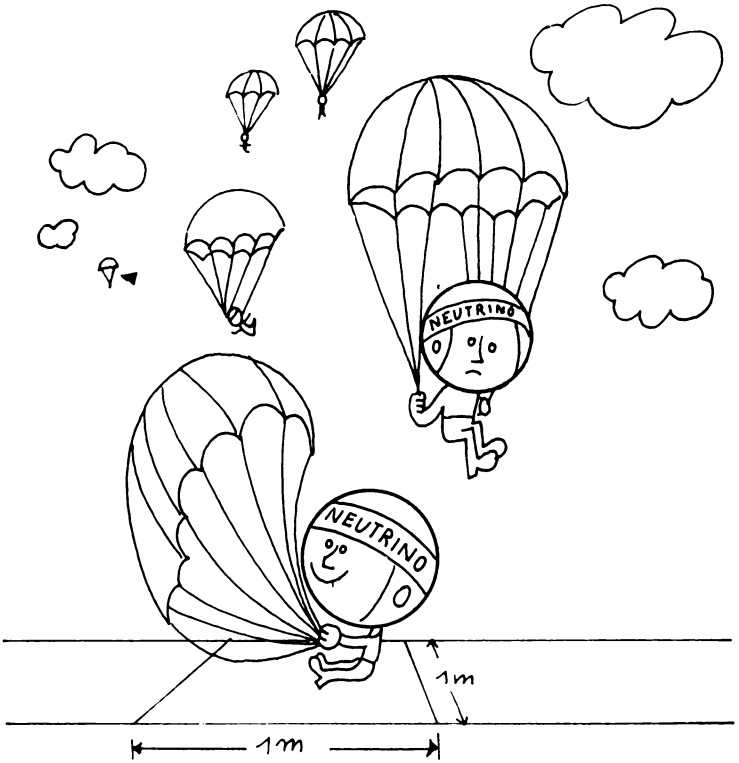
Hier erinnerte man sich wieder der kosmischen Strahlung. Akademiemitglied M. Markow sprach den Gedanken aus, daß man zur Untersuchung der schwachen Wechselwirkung Neutrinos verwenden könnte, die in der Erdatmosphäre entstehen. Auf jeden Quadratmeter der Erdoberfläche fallen pro Sekunde 30 atmosphärische Neutrinos mit einer Energie von über 10 GeV. Das sind einerseits sehr hohe Werte, andererseits kann man mit diesen Neutrinos keine konkreten Experimente ausführen. Erinnern Sie sich noch, wie der Nachweis des Neutrinos gelungen war? Durch einen kleinen Behälter mit szintillierender Flüssigkeit wurde ein aus dem Reaktor kommender Neutrinostrom kolossaler Intensität geschickt. Leider kann man die kosmischen „Beschleuniger“ nicht veranlassen, „ein paar Teilchen mehr“ zu liefern. Um atmosphärische Neutrinos mit Sicherheit nachweisen zu können, wäre ein gigantischer Behälter erforderlich.

Deshalb entschlossen sich die Wissenschaftler, den gesamten Erdball in ihre Versuche einzubeziehen: Alle Materie des Erdballs sollte die Rolle eines großen Targets in einem schwachen Strom einfallender Neutrinos spielen.

Für die Neutrinos ist unsere Erde durchsichtig. Trotzdem bleibt ein Millionstel des Neutrinostromes in dem riesigen Target „Erde“ stecken. Im Augenblick der Reaktion eines Neutrinos mit dem Material der Erde entsteht eine leichte geladene Partikel, das μ-Meson, das mit einem gewöhnlichen Zähler nachgewiesen werden kann. Über diesen Nachweis indessen kann man etwas über die Wechselwir-

kung von Neutrinos hoher Energie mit der Targetmaterie erfahren.

Doch auch hier trat wieder eine Schwierigkeit auf: Genau die gleichen μ-Mesonen liefert auch der kosmische „Beschleuniger". Von den μ-Mesonen, die durch Neutrinos erzeugt werden, sind sie nicht zu unterscheiden. Es gibt nur einen einzigen Ausweg. Man muß sich zuverlässig gegen



die ungebetenen Gäste — die kosmischen μ-Mesonen — absichern, indem man ihnen ein undurchdringliches Hindernis in Gestalt einer 3 km dicken Schicht unserer Erdrinde in den Weg stellt.

1966 wurde eine grandiose Anlage aus 36 jeweils 5 m langen Zählern, die 16 t einer Spezialflüssigkeit enthielten, in einer Tiefe von über 3 km unter der Erde montiert, und

zwar in einem Schacht der Goldgruben in der Nähe von Johannesburg in Südafrika. 150 höchstempfindliche Photovervielfacher durchmusterten unaufhörlich die unter dem Einfluß von Elementarteilchen szintillierende Flüssigkeit und registrierten im Verlauf eines Jahres 10 atmosphärische Neutrinos. Ebensolche Neutrinos entdeckte in Indien auch eine andere Gruppe von Wissenschaftlern in einer Tiefe von 2300 m. So bestätigten die Ergebnisse dieser Experimente sowie spätere Versuche an Beschleunigern die Vermutungen der Wissenschaftler.

In den letzten Jahren ist die kosmische Strahlung erneut in den Vordergrund des Interesses gerückt. Für die Entwicklung einer Theorie der Elementarteilchen ist nicht so sehr die bis in letzte Einzelheiten gehende Erforschung der Eigenschaften bereits bekannter Partikeln von Bedeutung (was sich an Beschleunigern bequemer ausführen läßt) als vielmehr die Suche neuer Teilchen wie der Quarks, der intermediären Bosonen, der Dirac-Monopole sowie die Prüfung fundamentaler Theoreme. Hier aber wird alles durch die Energie entschieden.

Das „kostenlose" Kosmotron bildet heute die einzige Quelle von Partikeln mit Energien, die sich vorläufig auf künstlichem Wege nicht erzielen lassen. Einige Wissenschaftler (z. B. Dyson) sind sogar der Auffassung, daß die Zukunft der Hochenergiephysik nicht im Bau von Beschleunigern für immer höhere Energien liegt, sondern in der Schaffung gigantischer Registrieranlagen für die kosmische Strahlung.

Auf dem größten sowjetischen Erdsatelliten vom Typ „Proton" befand sich eine Spezialapparatur sowie Targets zur Untersuchung der Wechselwirkung von Protonen ultrahoher Energien aus der kosmischen Primärstrahlung mit Materie. Der Satellit trug die Targets und die Geräte über die Atmosphäre hinaus und brachte die Apparatur in einen Strom beschleunigter kosmischer Protonen. Beiläufig sei bemerkt, daß sich in den Satelliten der „Kosmos"serie auch Detektoren zur Registrierung von Antiteilchen und Antikernen in der kosmischen Primärstrahlung befinden.

Wir wissen bereits, daß die μ-Mesonen erheblich schwerer als die Elektronen sind. Möglicherweise liegt in diesem Umstand eines der bestgehütetsten „Geheimnisse" der Mikrowelt verborgen. Unterscheiden sich die μ-Mesonen von den Elektronen eigentlich noch in irgendeiner

anderen Eigenschaft außer in der Masse? Wenn das nicht der Fall sein sollte, was ist dann die Ursache ihrer „Gewichtigkeit"?

Die Theoretiker versuchen, diese Frage mit der Annahme zu beantworten, daß bestimmte Wechselwirkungen existieren, die für die eine oder andere Partikel spezifisch sind. Aufgabe der Experimentatoren ist es nun, Differenzen im Verhalten der Myonen und Elektronen zu entdecken. An den Beschleunigern konnte keinerlei Unterschied festgestellt werden. Vielleicht macht er sich nur bei außerordentlich hohen Energien bemerkbar?

Wissenschaftliche Hochgebirgsstationen in aller Welt studieren mit größter Aufmerksamkeit die Erzeugung von μ-Mesonen durch kosmische Protonen riesiger Energie. Zur gleichen Zeit messen Wissenschaftler in tief unter die Erdoberfläche reichenden Schichten die Winkelverteilung der in der Atmosphäre entstehenden Mesonen.

In letzter Zeit hat man bei derartigen Experimenten Resultate erhalten, die sich von den theoretischen Berechnungen oftmals erheblich unterscheiden. Sie wurden verständlicherweise zum Gegenstand lebhafter Diskussionen.

Ein „Löffel" für die Sonne

Eines Tages tauchten in einem alten, längst aufgegebenen Schacht im Staat South Dakota (USA) plötzlich wieder Leute auf. Sie sahen nicht aus wie Bergleute, und nicht das Problem der Wiederinbetriebnahme aufgegebener Bergwerke oder die Erkundung von Bodenschätzen hatte sie hierher geführt. 1968 montierte R. Davis mit seinen Mitarbeitern in einer Tiefe von 1,5 km das erste „Teleskop", um Informationen über die Sonne einzuholen.

Ein Teleskop unter der Erde? Installiert man diese Geräte nicht gewöhnlich in den Bergen, wo die Atmosphäre durchsichtiger ist? Hat man nicht sogar, um optischen Störungen zu entgehen, solche Teleskope mittels Freiballons bis an die Grenze der Erdatmosphäre oder mit Hilfe von Satelliten direkt in das Weltall hinausgetragen?

Das neue Gerät von R. Davis ist ein ganz ungewöhnliches Teleskop. Es besteht aus einem riesigen zylindrischen Behälter von 6 m Durchmesser und 15 m Länge und ist

mit Tetrachloräthylen, einer flüssigen chlorhaltigen Verbindung, gefüllt. Dieses Gerät besitzt weder Linsen noch andere typische Attribute, die wir meist mit einem optischen Teleskop assoziieren.

Photonen entstehen unter anderem im Kern unseres Zentralgestirns, dessen Volumen nur $1 \cdot 10^{-6}$ des gesamten Sonnenvolumens beträgt. Deshalb müssen diese Photonen eine gewaltige Materieschicht durchdringen, ehe sie an die Oberfläche gelangen können. Natürlich gehen sie bereits bei den ersten Wechselwirkungen unter und erzeugen sekundäre Photonen mit geringerer Energie. Millionen Jahre später gelangen die fernen Nachkommen der ursprünglichen Teilchen an die Sonnenoberfläche, die längst nicht mehr von ihrem Ursprung „wissen".

Man kann in eine unklare Suppe starren solange man will und wird doch nie erfahren, ob sie dünn ist oder dick. Dazu muß man schon mit dem Löffel in der Suppe herumrühren. Ohne Thermometer läßt sich auch die Suppentemperatur nicht genau ermitteln. Alle Wissenschaftler, die die Sonne mittels optischer Verfahren erforschen, befinden sich in der gleichen Situation. Sie können zwar das Sonnenlicht untersuchen, das in der Hauptsache an der Sonnenoberfläche erzeugt wird, doch sie haben weder einen „Löffel" noch ein „Thermometer" zur Verfügung, um Angaben über den Kern der Sonne zu gewinnen.

Fragen aber gibt es unterdessen mehr als genug. Bis zum heutigen Tag ist nur in ganz allgemeinen Zügen bekannt, was im zentralen Teil der Sonne geschieht. Bereits 1920 hat A. Eddington die Hypothese ausgesprochen, daß die Sonne ihre Energie aus thermonuklearen Reaktionen schöpft, in deren Verlauf sich leichte Elemente in schwerere umsetzen. Wie wäre eine Bestätigung für diese Hypothese zu finden? Wie will man erfahren, welche Kernreaktionen bzw. welche thermonuklearen Reaktionen dort genau ablaufen? Welche Temperatur, welche Dichte hat das Herzstück der Sonne? Man kann nur vermuten, daß der Kern unseres Zentralgestirns eine erheblich größere Dichte als Blei besitzt und auf 15 Mill. K aufgeheizt ist.

Alle diese Fragen würden unbeantwortet bleiben, gäbe es das Neutrino nicht. Um die Sonne zu durchleuchten, war genau diese Partikel mit ihrem „widerborstigen" und „ungeselligen" Charakter notwendig, da sie gerade des-

wegen eine so ungewöhnliche Durchdringungsfähigkeit besitzt. Neutrinos entstehen im Zentrum der Sonne, wenn sich Wasserstoff unter Freisetzung einer ungeheuren Energiemenge in Helium verwandelt. Ein Teil dieser Energie dient der „Beleuchtung" und „Heizung" unseres Planetensystems.

Treffen die Vorstellungen der Wissenschaftler von der Energiequelle „Sonne" zu, dann heißt dies, daß die Erde ständig von Sonnenneutrinos „berieselt" wird. In jeder Sekunde müssen dann 100 Mrd. dieser Partikeln auf jeden Quadratzentimeter der Erdoberfläche fallen!

Doch die Hauptsache besteht nicht in dieser ungeheuer großen Anzahl. Das Wichtigste ist vielmehr, daß die im Zentrum der Sonne entstehenden Neutrinos nach allen Seiten auseinanderfliegen, ohne die gewaltige Sonnenmasse, die sie durcheilen, überhaupt zu „bemerken". Sie erreichen die Erde in ihrer „Urform" und liefern nicht nur 10% der gesamten Strahlungsenergie der Sonne, sondern auch höchst wertvolle Informationen über den Sonnenkern.

Eine verblüffende Situation: Das Sonnenlicht vermag den Wissenschaftlern keine Antwort auf ihre drängenden Fragen zu geben, und doch hängt die benötigte Information buchstäblich „in der Luft", und zwar in Form der Sonnenneutrinos. Gelänge es, Intensität und Energie der Neutrinos zu messen, dann hätten die Wissenschaftler „Löffel" und „Thermometer" zur Ermittlung von Temperatur und Dichte im Herzen der Sonne in der Hand. Ein Neutrinoteleskop zur Erforschung der Sonne war es also, das die amerikanischen Wissenschaftler tief unter der Erde aufbauten. Die 1,5 km dicke Gesteinsschicht schützte das Gerät sicher vor kosmischer Strahlung und den darin enthaltenen störenden μ-Mesonen. Sie behinderte aber die „Betrachtung" der Sonne mit Hilfe von Neutrinos in keiner Weise.

R. Davis bediente sich hier eines Verfahrens, das B. Pontecorvo 1946 zur Erkundung des damals noch nicht entdeckten Neutrinos vorgeschlagen hatte. Neutrinos, die in diesem „Teleskop" auf Chloratome treffen, verwandeln die Atomkerne des Chlors in radioaktive Argonkerne. Mittels besonderer physikalisch-chemischer Verfahren ist es möglich, selbst nur einige wenige Argonatome in der großen Flüssigkeitsmasse nachzuweisen. Alles übrige ist dann sehr einfach. Die Zahl derartiger radioaktiver Argonatome deckt sich mit der Anzahl von Neutrino-„Spuren" und kann

mit Hilfe eines gewöhnlichen Elementarteilchenzählers leicht ermittelt werden.

Vorläufig wissen wir noch nicht, wie die Geschichte ausgehen wird. Es ist auch gar keine „Geschichte", sondern eines der Probleme in der Elementarteilchenphysik und der Astrophysik von heute.

Im Sommer 1972 fand in Balatonfüred in Ungarn die Internationale Physikerkonferenz „Neutrino 72" statt. „Kein Wunder", berichtete B. Pontecorvo über diese Konferenz, „daß die Konferenzräume, ungeachtet der Hitze und aller Verlockungen der kühlen Fluten des Balatons ständig überfüllt waren. Unter den Teilnehmern befanden sich die führenden Fachleute für Neutrinophysik aus den größten Laboratorien der Welt. Einige Konferenzvorträge lösten so etwas wie eine Sensation aus, die meiner Ansicht nach allerdings verfrüht war."

In erster Linie handelt es sich dabei um die Mitteilung von Prof. Davis über seine negativen Ergebnisse der Versuche zum Nachweis von Sonnenneutrinos. Einige Wissenschaftler waren danach bereit, unsere Vorstellungen von der thermonuklearen Energiequelle der Sonne und damit auch der anderen Sterne zu verwerfen. Nach Pontecorvos Meinung sind aber derart „revolutionäre" Schlüsse verfrüht.

Nach wie vor kann man annehmen, daß die Sonne ihre Energie aus der Verschmelzung von 4 Protonen zu 1 Heliumkern erhält. Eine ganze Reihe verschiedener Kernreaktionszyklen führt im Endeffekt zu diesem Prozeß. Davis' Neutrinoteleskop vermag jedoch nur Neutrinos eines kleinen Teils derartiger Reaktionen zu registrieren. Das negative Ergebnis kann einfach bedeuten, daß auf der Sonne ein anderer Reaktionszyklus realisiert wird und daß die Temperatur um 1 bis 1,5 Mill. K tiefer liegt als ursprünglich angenommen wurde.

Wenn die Zahl der Sonnenneutrinos nur ein Drittel oder nur ein Viertel der vermuteten Anzahl betrüge, dann würde dies einen Umbruch in unseren Vorstellungen vom Mechanismus im Sonneninnern bedeuten. Heute indessen kann man annehmen, daß das Neutrino noch unbekannte Eigenschaften aufweist. Es könnte beispielsweise noch vor Erreichen des Teleskops zerfallen oder sich auf dem Weg von der Sonne zur Erde spontan in ein Antineutrino umwandeln; auf Antineutrinos aber würde das Gerät von Davis nicht reagieren.

Die Neutrinowellen

Die Sonne schenkt uns Leben, Wärme und Licht. Diesem ständig wirkenden „Wunder" bezeugten die Sonnenanbeter ihre Anerkennung, indem sie ihr den Titel der ersten Gottheit wie z. B. Ra bei den Ägyptern oder Jarilo bei den Slawen verliehen. Sonnenfinsternisse waren gefürchtet, und wenn das am Abend verlöschende Himmelslicht am Morgen die Erde wieder erstrahlen ließ, wurden ihm Dankgebete dargebracht.

Im Grunde genommen entstand erst zu Beginn unseres Jahrhunderts, nach der Entdeckung des Atomkerns, eine wissenschaftliche Erklärung dafür, woher die Sonne und alle übrigen Sterne ihre Energie nehmen. Auf der Erde hat der Mensch vorläufig noch nicht gelernt, sich diese Energiequelle nutzbar zu machen. Selbst in den besten thermonuklearen Versuchsanlagen vom Typ „Tokamak" besitzt das Wasserstoffplasma noch keine genügend hohe Temperatur und Dichte.

Schon die Astronomen des Altertums wurden auf verschiedene Änderungen an den Sternen aufmerksam. In alten Geschichtsbüchern sind Bemerkungen über ungewöhnliche Erscheinungen an Sternen erhalten geblieben, die wir heute als Novae- und Supernovaeausbrüche bezeichnen. Ganz allmählich formte sich der Gedanke von einer Evolution der Sterne.

Als sich der Wasserstoff des Weltalls zu hinreichend dichten Wolken — den Keimzellen zukünftiger Sterne — akkumuliert hatte, setzte eine Kompression unter gleichzeitiger Aufheizung der Materie ein. Der gesamte „Lebensweg" der Sterne ist durch ungeheure Drücke und Temperaturen gekennzeichnet. Im Innern der riesigen, heißen Sterne wurde die ganze Zeit über ein „Klima" aufrechterhalten, das Reaktionen von Elementarteilchen begünstigte.

Vielleicht wird es den Wissenschaftlern gelingen, mit ihrer Hilfe etwas Wichtiges über die Hauptevolutionsetappen der Sterne zu erfahren?

Die Wärmestrahlungsenergie heißer Sterne ist so groß, daß in deren Innern ständig leichte Partikelnpaare — Elektronen und Positronen — entstehen. Beim Zusammenstoß erfolgt Annihilation, und wieder entstehen Photonen der Wärmestrahlung. Es sieht aus wie ein Spiel, in dem sich

die Photonen und die Elektronen-Positronen-Paare die Energie zuwerfen wie einen Ball. Es ist ein Spiel, das unendlich lange dauern könnte. Doch sobald die Sterntemperatur einige 100 Mill. K erreicht, tritt ein Umbruch ein. Ein Teil der Elektronen-Positronen-Paare wandelt sich nicht länger in Photonen um, sondern bildet Neutrino-Antineutrino-Paare, die den Stern verlassen. Gewissermaßen unter Verletzung der Spielregeln tragen die Neutrinos so die Energie mit sich fort, die sie von den Elektronen-Positronen-Paaren erhalten haben. Diese Energie kann der Stern auf keine Weise zurückgewinnen. Sie ist für immer verloren.

Je höher die Sterntemperatur ist, um so mehr Neutrinos werden emittiert. Die Neutrinos spielen sozusagen die Rolle eines offenen Fensters in einem stark geheizten Zimmer. Wir wissen alle, daß man bei offenem Fenster immer mehr Holz oder Kohle im Ofen nachlegen muß, wenn sich das Zimmer nicht abkühlen soll. So verbraucht der Stern seinen thermonuklearen Brennstoff immer intensiver.

Die Wissenschaftler vermuten, daß der Stern in den letzten Jahrhunderten seines Daseins den Hauptenergieanteil nicht in Form von Licht, sondern in Form von Neutrinos verliert. Eines Tages werden die Energievorräte des Sterns erschöpft sein: Sein Brennstoff, der Wasserstoff, wird vollständig „ausgebrannt“ sein.

Aber der Stern kühlt sich nicht ab. Er verbraucht nun die Gravitationsenergie seiner Masse. Jetzt beginnt eine katastrophenartig rasch verlaufende Kontraktion des Sterns, der sogenannte Kollaps. Im Verlauf einiger hundertstel Sekunden schleudert der Stern eine ungeheure Neutrinomenge in den Raum hinaus. Diese Menge ist wesentlich größer als jene, die während der gesamten Lebensdauer bisher emittiert worden ist. Gelegentlich löst sich während des Kollapses ein kleiner Teil des Sternmaterials ab, der sich mit riesiger Geschwindigkeit ausdehnt. Dann beobachten die Astronomen einen Supernovaausbruch, das Aufleuchten dieser Wolke. Daneben gibt es auch Sterne, die „ruhig“ kollabieren und kein „Feuerwerk“ veranstalten.

Wenn es den Wissenschaftlern gelingen wird, Neutrinoausbrüche kollabierender Sterne zu entdecken, werden wir erfahren, was mit ihnen in jenem Augenblick geschieht, in dem sie ihre Entwicklung beenden.

Die Neutrinowelle einer Supernova — wenn sie im Zen-

trum unserer Milchstraße aufflammte — könnte in einem Zähler registriert werden, der mehrere 100 t Flüssigkeit enthält. Dabei würde es genügen, einige Zähler an verschiedenen Punkten des Erdballs anzuordnen. Aus der Reihenfolge, in der die Neutrinosignale dort registriert würden, könnte man erkennen, woher die Neutrinowelle kam.

Der Ausbruch einer Supernova in unserer Milchstraße ist eine vergleichsweise seltene Erscheinung, die ungefähr einmal in 300 Jahren auftritt. Daneben existieren jedoch noch die „leisen" Kollapse. Wenn die Vermutung von ihrer Existenz zutrifft, dann müßten fast einmal im Monat Neutronenwellen über die Erde hereinbrechen!

Was geschieht eigentlich, wenn ein gerichteter stellarer Neutrinostrom mit Lichtgeschwindigkeit auf einen kosmischen Körper trifft? Die Ruhemasse des Neutrinos ist gleich Null. Da sich diese Elementarteilchen jedoch mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, haben sie eine Trägheitsmasse und sind damit „anfällig" für die Wirkung von Gravitationsfeldern.

Ein paralleles Lichtbündel wird beim Einfall in eine optische Linse an einer bestimmten Stelle fokussiert. Genau in der gleichen Weise fokussiert das Gravitationsfeld eines am Wege liegenden kosmischen Körpers den Neutrinostrom. Der Ort, an dem das „Neutrinobild" des Sterns entsteht, hängt nur vom Radius und der Dichte des kosmischen Körpers ab.

Die Sonne könnte z. B. die Rolle einer Gravitationslinse übernehmen. Sie würde das Neutrinobild des Sterns in einem Abstand von etwa 100 Mrd. km von ihrem eigenen Mittelpunkt erzeugen, d. h. in einer 20fach größeren Entfernung als der Bahnradius des entferntesten Planeten des Sonnensystems, des Pluto.

Auch die Erde bewirkt auf ihrer Umlaufbahn um die Sonne eine ständige Fokussierung von Sonnenneutrinos. Das Neutrinobild der Sonne folgt der Erdbewegung und verlagert sich kontinuierlich im Raum; seine Entfernung vom Erdmittelpunkt beträgt einige 1000 Mrd. km. Wir brauchen dort nur einen „Film" anzubringen, um ein Bild des Sterns, gesehen mit den „Augen" der Neutrinos, zu erhalten.

Leider existiert kein Film, der für diesen kosmischen „Fotoapparat" geeignet wäre, und auch den Apparat dafür gibt es nicht. Der sowjetische Wissenschaftler I. Lapides

nimmt an, daß man unter Benutzung der Fokussierungseigenschaften massereicher kosmischer Körper ein Neutrinoteleskop zur Suche von Neutrinostrahlungsquellen „bauen" könnte. Es müßte z. B. folgendermaßen aussehen: Ein großes Raumschiff mit einem gut gegen die kosmische Strahlung abgeschirmten Neutrinodetektor an Bord wird auf eine sonnennahe Umlaufbahn gebracht, deren Radius der Neutrinobrennweite der Sonne entspricht. Im Verlauf der Bewegung dieses Raumschiffes an der Oberfläche einer Kugel mit diesem Radius werden seine Geräte die hinter der Sonne liegenden Abschnitte des Raumes abtasten. Sobald auf der verlängerten Verbindungslinie zwischen dem Raumschiff und dem Sonnenmittelpunkt ein Neutrinos emittierender Stern liegt, wird der Detektor eine sprunghafte Intensitätszunahme des Neutrinostroms registrieren.

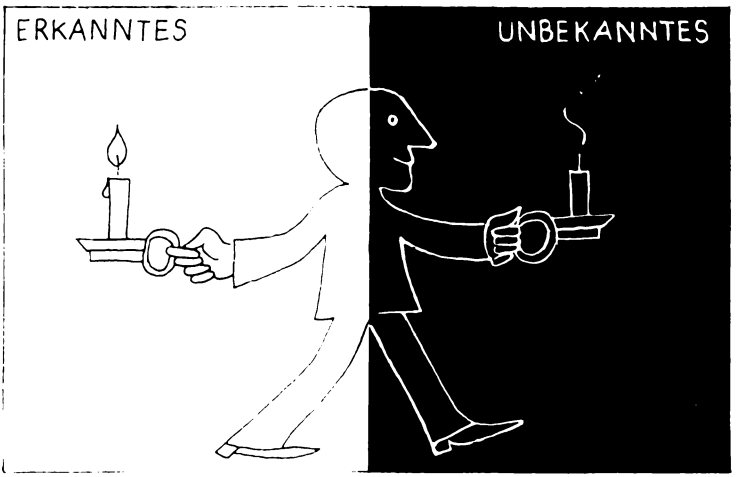
Zu diesem Zweck wäre z. B. ein durch Wasserstoffbombenexplosionen angetriebenes Raumschiff geeignet, an dessen Projektierung F. Dyson beteiligt war. Der Wissenschaftler vertritt die Auffassung, daß man ein Raumschiff mit einer Tragfähigkeit von einigen 10 000 bis 100 000 t bereits heute, d. h. beim gegenwärtigen Stand von Wissenschaft und Technik, bauen könnte. Nur ein Raumschiff dieser Art wäre imstande, einen Neutrinozähler mit dem erforderlichen Schutz an Ort und Stelle zu bringen. Allerdings sind die Kosten noch so groß, daß der Bau dieses Raumschiffes selbst den entwickeltsten Ländern vorläufig unmöglich ist.

Strahlen, so alt wie das Weltall

Wir wissen nicht, was in diesem Augenblick auf der Sonne vor sich geht. Erst 8 Minuten später werden uns die Lichtstrahlen oder die Sonnenneutrinos mitteilen, daß die Sonne normal „funktioniert".

Das letzte Signal eines irgendwo am Rande der Milchstraße kollabierenden Sterns erreicht uns nach vielen 1000 Jahren in Gestalt eines hochintensiven Ausbruchs einer Neutrinowelle oder als „Krampf" des Gravitationsfeldes. Wie lang der Weg dieser Botschafter ferner Ereignisse auch immer sei, die „Stimme" des uns bereits bekannten Weltalls werden wir vernehmen. Doch wie sah das

Weltall vor einigen Milliarden Jahren aus? Das ist die „Frage aller Fragen“ in der Kosmologie, die nach den Worten von Akademiemitglied W. Ginsburg „zu jenen wenigen Wissenschaftsrichtungen gehört (eine andere Richtung dieser Art ist die Physik der Elementarteilchen), bei der wir auf grundlegende, tiefschürfende Fragen stoßen. Hier verläuft die Grenze zwischen dem Licht des Wissens und der absoluten Dunkelheit des Unbekannten.“



1929 fand E. Hubble (1889—1953), daß die Galaxien mit konstanter Geschwindigkeit nach allen Richtungen auseinanderstreben wie die Splitter einer detonierten Bombe. Wenn wir den „Film“ in Gedanken zurückdrehen, um den Zeitpunkt zu ermitteln, an dem diese Erscheinung ihren Ausgang nahm, dann stellen wir fest, daß das Alter des Weltalls seit jenem Zeitpunkt, als es eine unendlich große Dichte besaß, bis zu seinem gegenwärtigen Zustand durchaus ehrwürdig ist und etwa 10 Mrd. Jahre beträgt. Doch wie verlief die „Geschichte“ des Weltalls?

Archäologische Funde geben uns die Möglichkeit, eine Vorstellung von den ältesten Zivilisationen auf der Erde zu gewinnen und etwas über Ereignisse zu erfahren, die vor etwa 30 000 Jahren stattfanden. Die Paläontologie liefert Berichte über die ältesten Formen des Lebens, über die Evolution der organischen Welt überhaupt und rekon-

struiert diese aus Skeletteilen, Versteinerungen und Abdrücken. Die Paläontologen vollziehen gewissermaßen eine Reise in die Zeit, die etwa 1 Mrd. Jahre zurückreicht.

Welche Funde sind überhaupt gemeint, wenn es sich nun um einen so großen zeitlichen Abstand wie 10 Mrd. Jahre handelt? Mit dieser Frage begann unter den Wissenschaftlern ein spekulativer Streit. Manchen Wissenschaftlern gefiel die Idee, die der theoretische Physiker G. Gamow in den 40er Jahren bezüglich eines „heißen" Evolutionsmodells des Weltalls aussprach. Er vermutete, daß damals, als die Dichte der Materie größer als 1 t/cm^3 war — wenn es diese Zeit überhaupt irgendwann einmal gab —, auch ihre Temperatur sehr hoch gewesen sein müsse. Andere Wissenschaftler dagegen unterstützten den Gedanken eines „kalten" Modells der Weltallentwicklung.

Dieser Streit war lange Zeit hindurch völlig fruchtlos, weil weder die eine noch die andere Seite experimentelle Tatsachen vorlegen konnte. Da fand sich plötzlich ein Beweis, der die Position der Anhänger des „heißen" Modells außerordentlich stärkte.

Vor etwa 30 Jahren untersuchten die Astrophysiker die optischen Eigenschaften des Zyanmoleküls im interstellaren galaktischen Gas. Dabei entdeckten sie im kosmischen Raum eine elektromagnetische Strahlung der Wellenlänge 0,25 cm. Diese Radiostrahlung traf richtungsunabhängig, d. h. von allen Seiten her, aus dem Weltall mit einer Intensität ein, die hunderttausendfach höher lag als die Leistung aller bekannten analogen Strahlungsquellen am Himmel. Die Astrophysiker entdeckten diese Tatsache, wunderten sich, und das war alles. Wie seltsam es auch anmuten mag, aber niemand unternahm auch nur den geringsten Versuch, die Ursache dieser Strahlung festzustellen.

1965 erarbeiteten A. Pensias und R. Wilson aus dem Laboratorium der Bell-Telephone-Company ein Satellitennachrichtensystem für die Wellenlänge von 7,3 cm. Um den normalen Betrieb dieser Apparatur zu gewährleisten, mußten alle auf der genannten Wellenlänge auftretenden Störungen gründlich untersucht werden. Nachdem alle nur denkbaren Funkstörungen eliminiert waren — wie man annahm — , registrierten die extrem empfindlichen Geräte weiterhin eine sehr intensive Strahlung, die gleichförmig von allen Seiten her eintraf.

So wurde — nun bereits zum zweiten Mal — die thermische Radiofrequenzstrahlung (auch als Reliktstrahlung oder Drei-Kelvin-Strahlung bezeichnet) als ein Zeuge längst vergangener Jahre entdeckt.

Was mögen diese Radiowellen seit jener so weit zurückliegenden Zeit alles „erlebt" haben? Auf ihrem Weg zur Erde wurden sie unzählbar oft an Materie gestreut, und so „vergaßen" sie ihren ursprünglichen Zustand immer mehr. Schließlich kühlten sie sich mit zunehmender Expansion des Weltalls auf eine Temperatur von 3 K ab.

Aber selbst Zeugen mit derartig geschwächtem „Gedächtnis" sind ein wertvoller Fund für die Wissenschaftler. Die Energie jedes Quants dieser thermischen Strahlung beträgt nur $\frac{1}{2000}$ der Energie von Quanten des sichtbaren Lichts. Dafür gibt es so viele Reliktquanten, daß auf jedes Atom im Weltall etwa 100 Mill. von ihnen entfallen. So haben die Wissenschaftler eine Möglichkeit erhalten, exakte Experimente zur Ermittlung des Expansionscharakters unseres Weltalls anzustellen.

Könnte man vielleicht in Erfahrung bringen, was noch früher geschah? Wie sah das Weltall in den ersten Minuten und Sekunden seines Daseins aus?

Die Gleichungen der Mechanik und das „Abkühlungs"-Gesetz der Reliktstrahlungsquanten erlaubten den Wissenschaftlern, eine Reise in die Tiefe der Zeit vorzunehmen, in die auch der verwegenste Held phantastischer Romane nicht vorgedrungen ist.

Vor 10 Mrd. Jahren ähnelte das Weltall in keiner Weise dem, was wir heute darunter verstehen. Damals gab es weder Sterne noch Galaxien. Nur eine superdichte, glühende Materie, bestehend aus einzelnen Elementarteilchen und vermischt mit Strahlung, existierte. Mit zunehmender Expansion des Weltalls sank die Temperatur der Strahlung allmählich, und schließlich trat der Augenblick ein, wo ihr Einfluß auf die Materie aufhörte. Im Weltall sich selbst überlassen, „überlebte" die Reliktstrahlung bis in unsere Tage.

Damit nicht genug. In der sogenannten Leptonenära, als das Alter des Weltalls erst Sekundenbruchteile zählte, spielten leichte Partikeln, die Leptonen (Myonen, Elektronen, Neutrinos und Antineutrinos), die Hauptrolle. Die Reaktionen dieser Partikeln untereinander hörten dann allerdings rasch auf, und die Neutrinos wurden frei.

Was könnten uns diese „lebenden“ Zeugen alles aus der Zeit berichten, als das Weltall noch ganz jung war! Die Reliktneutrinos könnten den Wissenschaftlern helfen, das Bild der gerade erst entstandenen Welt zu rekonstruieren. Da diese „Zeugen“ nur schwache Wechselwirkung mit Materie zeigen, haben sie ein geradezu phänomenales „Gedächtnis“. Könnte man sie erfassen, dann wäre eine endgültige Beantwortung der Frage nach den Bedingungen möglich, die während der ersten Sekunden und Minuten in der Existenz des Weltalls herrschten.

„Die Suche nach den Reliktneutrinos, wie kompliziert sie auch immer wäre“, schreibt Akademiemitglied J. Seldowitsch, „ist für die Klärung des Problems der allerfrühesten Stadien der kosmologischen Expansion von außerordentlicher Bedeutung. Eine Messung der Reliktneutrinos wäre in der Tat das ‚Experiment des Jahrhunderts‘.“

Gibt es Antiwelten?

Wann entstand dieses Wort? Sicher ist nur, daß der Dichter Andrej Wosnessenski nicht der erste Mensch war, der es gebrauchte. Wer war es dann, der „A“ gesagt hat? Beachten Sie den logischen Ursprung dieses Wortes: Antiteilchen — Antimaterie — Antiwelt.

Zweifellos haben die Physiker „A“ gesagt, als sie die Antiteilchen, zuerst das Positron, dann das Antiproton und später noch andere, entdeckten. In Nowosibirsk erhielten die Wissenschaftler zum ersten Mal einen „Brocken“ Antimaterie, ein Positronenbündel, das einige Stunden existierte. „Dies war bereits etwas Realeres und Fühlbares — nicht nur für die Physiker, sondern für jeden Menschen. Bitte sehr, sehen Sie selbst, hier ist die Welt der Antiteilchen!“ sagte der Direktor des Nowosibirsker Instituts für Kernphysik, Akademiemitglied G. Budker.

Doch Antiteilchen sind noch keine Antimaterie. Materie besteht gewöhnlich aus Atomen und diese wiederum aus Atomkernen und Elektronen. Alle Komponenten der Antimaterie, also Antiprotonen, Antineutronen und Positronen, wurden experimentell entdeckt. Offen blieb nur die Frage: Würden die Kernkräfte imstande sein, die Antipartikeln zu Antikernen „zusammenzuleimen“?

Die Theoretiker hatten diesbezüglich nicht die geringsten Zweifel. Ihre Gleichungen bekundeten eindeutig, daß neben Antiteilchen auch Antikerne, bestehend aus Antiprotonen und Antineutronen, existieren müßten. Es gab nichts, was gegen eine Vorstellung von einer Antiwelt sprach, in der alle chemischen Elemente Antielemente waren und sich in ein „Antiperiodensystem" einfügten. Auch in bezug auf die Vielfalt chemischer Verbindungen dürfte diese Welt keinesfalls hinter unserer zurückstehen.

Am 30-GeV-Beschleuniger in Brookhaven gelang den Experimentalphysikern die Realisierung des Traums der Theoretiker. Die Geräte registrierten die Entstehung von Antideuteriumkernen, d. h. Antikernen des schweren Wasserstoffisotops. Ein Antiproton und ein Antineutron hatten sich zu einem Antikern vereinigt!

Das folgende Element im Periodensystem ist das Helium. Vielleicht konnten die Antiteilchen keine schwereren Kerne als Deuterium erzeugen? Zur Klärung dieses Problems wurde ein Beschleuniger mit 70 GeV benötigt.

Eine große Wissenschaftlergruppe unter Leitung des Korrespondierenden Mitglieds der Akademie der Wissenschaften der UdSSR, J. Prokoschkin, begann am Beschleuniger von Serpuchow eine Versuchsreihe zum Nachweis von Antiheliumkernen. Durch Analyse von über 200 Mrd. Partikeln identifizierten die Experimentatoren darunter 5 Antiheliumkerne.

Die Kompliziertheit dieses Problems stellte der Direktor des Instituts für Hochenergiephysik, Akademiemitglied A. Logunow, sehr anschaulich dar: „Wenn wir die Gesamtzahl aller Partikeln, die die Anlage passierten, im Verhältnis zur Anzahl registrierter Antiheliumkerne graphisch darstellen wollten und in dieser graphischen Darstellung die Zahl der Antiheliumkerne durch einen Abschnitt von 1 mm Länge andeuteten, dann müßte die Zahl der übrigen Partikeln durch einen Abschnitt gekennzeichnet sein, der ebenso lang ist wie der Erdäquator."

Die Entdeckung der Antiheliumkerne bestätigt die Theorie von der Existenz der Antimaterie. Das Vorhandensein von Antimaterie könnte für das Verständnis der Evolution des Weltalls und aller darin ablaufenden Prozesse von größter Bedeutung sein.

Beim Zusammenstoß von Teilchen und Antiteilchen annihilieren diese, d. h. sie „explodieren" unter Freiset-

zung einer ungeheuren Energiemenge. Wegen dieser Reaktion können Antimaterie und Materie nicht gleichmäßig existieren. Darum haben die Astrophysiker auch die Hypothese von der Existenz von „Antiwelten" zur Erklärung der im All entdeckten hochintensiven Strahlungsquellen benutzt.

Elementarteilchen und Strahlung sind die gemeinsamen „Vorfahren" aller Sterne und Galaxien. Will man kosmologische Probleme auf der Grundlage unserer Kenntnis von den Elementarteilchen lösen, die die Wissenschaftler mit Hilfe von Beschleunigern gewonnen haben, dann muß man hier in erster Linie an das Gesetz von der Erhaltung der Baryonenzahl denken. Es besagt ja, daß sich Protonen und Neutronen stets paarweise mit ihren Antiteilchen bilden. Mit anderen Worten heißt das: Materie entsteht immer an den gleichen Punkten im Raum und in den gleichen Mengen wie Antimaterie.

Darum ist die Annahme verständlich, daß das „Urplasma" aus der gleichen Zahl von Teilchen und Antiteilchen bestand.

Heute sind die Wissenschaftler davon überzeugt, daß unser Sonnensystem nur aus Materie besteht; denn wären Materie und Antimaterie im Bereich unserer Milchstraße miteinander vermischt, dann müßten entsprechende Geräte auf der Erde ständig eine intensive Annihilationsstrahlung registrieren. Diese Strahlung existiert jedoch nicht.

Gibt es trotzdem Antimaterie im Weltall? Die Antworten, die man heute zu hören bekommt, sind einander diametral entgegengesetzt. „Es gibt keine Antimaterie; darüber können nur versponnene Lyriker nachdenken", sagen die einen. Sie sind der Auffassung, daß das Weltall bereits in den ersten Augenblicken seines Daseins asymmetrisch war und mehr Materie als Antimaterie enthielt.

„Es kann im Weltall ebensoviel Antimaterie wie Materie geben", behaupten andere, „denn dafür, daß es keine Antimaterie gibt, fehlt jeder Beweis."

Versuchen wir eine andere Frage zu beantworten: Angenommen, es gäbe Antimaterie im Weltall, wo befände sie sich dann? Warum macht sie sich nicht bemerkbar?

Die schwedischen Wissenschaftler H. Alfvén und O. Klein sind der Auffassung, daß sich Materie und Antimaterie bereits während der frühen Entwicklungsstadien des Welt-

alls unter dem Einfluß des elektromagnetischen Feldes voneinander getrennt haben. So kann vielleicht jeder zweite Stern oder jede zweite Galaxis aus Antimaterie bestehen.

„Irgendwie fällt es leichter daran zu glauben", schreibt das Ehrenmitglied der Akademie der Wissenschaften der UdSSR Prof. H. Alfvén in seinem Buch „Welten und Antiwelten", „daß eine — recht ferne — Galaxis aus Antimaterie besteht. Die gefährliche Nachbarschaft eines Antisterns ist zu unangenehm. Die Analyse führt uns jedoch zum gegenteiligen Schluß: Eine Begründung für die Aufteilung der Materie in galaktischen Maßstäben fällt weitaus schwerer als unter der Annahme kleiner Gebiete innerhalb jeder Galaxis."

Die Entdeckung der thermischen Reliktstrahlung bewies die Richtigkeit des „heißen" Entwicklungsmodells des Weltalls. Dabei blieb aber die Frage nach der Antimaterie nach wie vor sehr schwierig. Vor einigen Jahren schlug der französische Wissenschaftler R. Omne eine originelle Hypothese für die Trennung von Materie und Antimaterie vor, die gerade in das „heiße" Modell hineinpaßt. Das im Labor mit Hilfe von Beschleunigern gründlich untersuchte Verhalten von Protonen und Antiprotonen lieferte ihm die Idee eines Trennungsmechanismus, der an die Flüssigkeitströpfchenbildung in übersättigtem Dampf erinnert. Mehr noch, wären die Eigenschaften dieser Partikeln anders, dann ließe sich ihre Trennung nicht erklären.

Innerhalb einer Zeitspanne von weniger als 10^{-5} s entsteht aus dem ursprünglich homogenen Plasma so etwas wie eine „Emulsion" aus einzelnen Raumabschnitten, die jeweils mit Partikeln bzw. mit Antipartikeln angefüllt sind. Gleichartige Abschnitte vereinigen sich beim Zusammenstoß, während sich Abschnitte entgegengesetzter Baryonenladung wegen des Druckes der Annihilationsstrahlung abstoßen. So entfernen sie sich allmählich voneinander und erreichen beträchtliche „kosmische" Abstände.

Der theoretische Streit zwischen den Anhängern des ladungssymmetrischen und des asymmetrischen Weltalls dauert an. Die endgültige Lösung wird freilich nur das Experiment liefern.

Unterscheidet sich das Licht eines Sternes eigentlich vom Licht eines Antisternes? Wie könnte man Unterschiede zwischen Welt und Antiwelt nachweisen? Es ist nicht aus-

geschlossen, daß vor den Augen der Astronomen Antigalaxien ihre Spiralen und Arme in den Raum ausbreiten und am Himmel auch Antisterne flimmern. „Nach Augenmaß" ist allerdings die elektromagnetische Strahlung von Materie und Antimaterie völlig identisch und nicht unterscheidbar.

Vorläufig sind diese Fakten noch nicht experimentell überprüft worden. Akademiemitglied G. Budker sagte: „Wir wollen versuchen, im Labor nicht nur Antiteilchen schlechthin, sondern Antiatome zu erzeugen. Wir hoffen einen hinreichend kräftigen Antiwasserstoffstrahl zu erhalten, der imstande wäre, ein Blatt Papier durchzubrennen. Dadurch wäre es möglich, die Eigenschaften von Antiwasserstoff zu erforschen, insbesondere sein Spektrum. Heute streiten die Astrophysiker noch darüber, ob es im Weltall Antigalaxien gibt und ob Materie und Antimaterie gleichberechtigt sind. Vielleicht werden unsere Experimente zum ‚Schiedsrichter' in diesem Streit werden."

Im Prinzip ließe sich dieser Streit mit Hilfe von Neutrinos entscheiden. Ein Stern aus Antimaterie oder eine Antigalaxis müßte anstelle von Neutrinos Antineutrinoströme emittieren. Es ist durchaus wahrscheinlich, daß diese auch die Erdoberfläche erreichen. Die Neutrinoastronomie ist allerdings vorläufig noch machtlos. Selbst von den hellsten Sternen wie etwa dem Sirius gelangt nur ein Neutrino oder Antineutrino je Quadratzentimeter und Sekunde auf die Erde.

Aussichtsreicher wäre der Nachweisversuch von Antimaterie im Weltall durch die Erforschung der kosmischen Strahlung, die außerhalb unseres Sonnensystems entsteht. Es ist zu vermuten, daß einzelne Antiteilchen beim Zusammenstoß kosmischer Partikeln großer Energie mit dem interstellaren Gas entstehen können. Doch die Wahrscheinlichkeit für die Ausbildung komplizierter Antikerne ist praktisch gleich Null. Sollten Antikerne einmal entdeckt werden, dann stünde damit auch die Existenz ferner Antiwelten fest, von denen sie zu uns geflogen kommen.

Vorläufig aber wurden in der kosmischen Strahlung weder Antiprotonen noch Antikerne entdeckt. Die Genauigkeit der Versuche wird ständig erhöht, und so kommt eines Tages möglicherweise der Zeitpunkt heran, an dem die Wissenschaftler imstande sein werden, die in der kosmi-

schen Strahlung enthaltene Information über Antimaterie im Weltall zu dechiffrieren.

Akademiemitglied B. Konstantinow sprach in den 60er Jahren die Hypothese aus, daß, wenn Antiwelten wirklich existieren, auch hinreichend große Körper aus Antimaterie zur Erde gelangen könnten.

Die Astronomen wissen, daß bei weitem nicht alle Kometen und Meteore elliptische Bahnen haben und gewissermaßen zum „Personal" des Sonnensystems gehören. Einige davon stammen aus sehr weit entfernten Bereichen der Milchstraße. Sie verbrennen dann entweder in der Erdatmosphäre oder verschwinden für immer in den Weiten des Alls. Gibt es unter ihnen vielleicht auch Sendboten aus Antiwelten?

Vielen ist die Geschichte über den Meteoriten an der Tunguska bekannt. Dieser Himmelskörper explodierte 1908 im Gebiet der Podkamennaja Tunguska in einer Höhe von 5 bis 10 km über der Erdoberfläche. Die Energie der Explosion war ungeheuer groß und betrug etwa 10^{17} J. Dieses Ereignis wird in vielen Versionen interpretiert — bis hin zu der Hypothese von der Explosion eines Raumschiffes mit Vertretern einer außerirdischen Zivilisation. Vielleicht bestand der Tunguska-Meteorit aus einem Brocken Antimaterie, der zufällig in die Erdatmosphäre geraten ist?

Eine Explosion ähnlich der einer Atom- oder Wasserstoffbombe in der Atmosphäre erfordert besondere Verhältnisse, die nur ein vernunftbegabtes Wesen erzeugen kann. Für eine Annihilationsexplosion hingegen bedarf es nur der Anwesenheit von Antimaterie.

Bei einer Explosion wie der des Meteoriten an der Tunguska mußte die Zahl der radioaktiven Kohlenstoffkerne zunehmen. Ein Nachweis dafür konnte nur anhand des von den Bäumen absorbierten Kohlenstoffs erfolgen, die „Zeugen" des Ereignisses an der Tunguska waren. Leider konnte bei der Untersuchung der Jahresringe alter Bäume auf Radioaktivität für das Jahr 1909 nur eine einprozentige Erhöhung des ^{14}C-Gehalts im Vergleich zum Mittelwert der letzten 40 Jahre festgestellt werden. Diese Zahl aber liegt innerhalb der Meßunsicherheit.

Somit haben die erzielten Ergebnisse die Hypothese von einem Antimeteoriten nicht bestätigt, allerdings auch nicht endgültig widerlegt. Die Frage bleibt also offen.

Seit der Mond Gegenstand unmittelbarer experimenteller Untersuchungen durch sowjetische und amerikanische Wissenschaftler geworden ist, könnte sich vielleicht ebenfalls eine Möglichkeit zur Entscheidung der Frage ergeben, ob in der Natur Materie und Antimaterie nebeneinander existieren. Unser Trabant besitzt keine Atmosphäre, und wenn an seiner Oberfläche irgendwann einmal Antimeteoriten niedergegangen sind, dann mußten sie bei ihrer Annihilation radioaktive Stellen mit deutlich höherem Gehalt an einem solchen langlebigen radioaktiven Element wie ^{26}Al zurücklassen.

Die besondere Aufmerksamkeit des sowjetischen Wissenschaftlers, Akademiemitglieds B. Konstantinow, galt schon immer den Kometen, jenen ungewöhnlichen kosmischen Körpern, die bei geringer Größe im Bereich einiger 10 km einen langen Schweif besitzen, der sich über mehrere 100 km ausdehnt. Gewöhnlich erklärt man dies damit, daß der Komet aus Eisbrocken besteht. Vielleicht aber stellen einige dieser Himmelskörper nichts anderes als Antiasteroiden dar, die aus einer Antiwelt in das Sonnensystem geraten sind?

Diese Annahme ließ ein weiteres Verfahren für die Suche nach Antimaterie entstehen. Die Kometen beschließen ihr Dasein durch Verwandlung in Meteoritenströme. Sollten jedoch Meteore aus Antimaterie mit der Erdatmosphäre zusammentreffen, dann müßte ihre Annihilation unter Erzeugung von γ-Quanten einer ganz bestimmten Energie eintreten.

Eine Gruppe von Wissenschaftlern des Physikalisch-technischen Instituts in Leningrad unter Leitung von Professor M. Bredow befaßt sich bereits seit einigen Jahren mit der experimentellen Untersuchung des Symmetrieproblems von Materie und Antimaterie in der Natur. Nach dem Funkortungsverfahren registrieren die Wissenschaftler hierbei die Eintrittszeit von Meteoren in die Atmosphäre, während sie mit Hilfe anderer Geräte gleichzeitig beobachten, ob eine Intensitätssteigerung der typischen Annihilationsstrahlung eingetreten ist.

Im Verlauf von 4 Jahren wurden alle wichtigen Meteoritenströme untersucht. Die Ergebnisse waren ermutigend. Der Meteoriteneintritt in die Atmosphäre wurde von einer Verstärkung dieser spezifischen Strahlung begleitet.

Weiterhin wurden in einem künstlichen Erdsatelliten

Geräte zur Registrierung von γ-Quanten einer genau definierten Energie — die sich bei der Begegnung von Elektronen und Positronen ergibt — installiert. Dabei stellte man fest, daß sich die Zahl der γ-Quanten abhängig von der Meteoritenaktivität ändert. Diese nach zwei verschiedenen Verfahren ermittelte Zunahme der Strahlungsintensität darf offenbar als hinreichend gesichert angesehen werden.

„Das Problem der Symmetrie des Weltalls", sagte Prof. M. Bredow, „hat gegenwärtig nicht nur im Bereich theoretischer Diskussionen, sondern auf rein experimentellem Gebiet an Schärfe gewonnen, da die Tatsachen allem Anschein nach für unsere Hypothese sprechen. Allerdings wagen wir dort nicht, ein entschiedenes ‚Ja' zu sagen, wo vorläufig noch vieles unklar ist. Schwierigkeiten gibt es jedoch noch mehr als genug. Das Problem ist überaus strittig und vielleicht gerade deshalb so außerordentlich interessant."

Kreuzwege im All

Die Welt der Sterne, die die Astronomen in der Vergangenheit durch das winzige „Fensterchen" des sichtbaren Lichts betrachteten, erschien ein für allemal etabliert und erstarrt. Das Leben des Alls wurde nur außerordentlich selten durch Ausbrüche von Supernovas gestört.

Heute haben uns die Radiofrequenz-, die Röntgen- und die Infrarotstrahlung ebenso wie die γ-Quanten ein gänzlich anderes Weltall erschlossen. Gegenwärtig betrachten die Astrophysiker einen hochinteressanten Film über das stürmische „Leben" der Metagalaxis.

Dabei laufen die Ereignisse dort selbst nach irdischen Zeitbegriffen außerordentlich rasch ab. Während der Ausbruch einer Supernova etwa 100 Tage dauert, beträgt die Strahlungsperiode des raschesten Pulsars nur 0,033 s! Sterne erhitzen sich, kühlen sich ab, gewinnen an Dichte und schleudern massenhaft viele Elementarteilchen in den Raum. Sternassoziationen entstehen, während Quasare und explodierende Sterne gigantische Energiemengen in das All senden.

Auf ihrem Weg zur Erforschung des Innern der Materie

entdeckten die Physiker die Welt der Elementarteilchen. Wie das „heiße" Modell behauptet, war das junge Weltall einem superdichten und hocherhitzten Gemisch dieser Elementarteilchen zum Verwechseln ähnlich. Könnte man nicht heute unter Benutzung dieses Modells einige Probleme der Elementarteilchenphysik lösen?

Die Theoretiker erfanden die Quarks, doch die Experimentatoren können sie nicht finden. Zur Erfüllung der Symmetriebedingung in den Maxwellschen Gleichungen ebenso wie der Gleichungen der Quantenelektrodynamik werden die Dirac-Monopole dringend benötigt, aber auch sie hat bis heute niemand zu Gesicht bekommen. Alle, die Quarks und magnetische Monopole „jagen" wollten, kehrten mit leeren Händen heim. Weder in der kosmischen Strahlung noch am Boden der Ozeane oder im Gestein der Gebirge waren sie zu finden.

Offenbar gibt es weder Quarks noch Monopole, könnte man sagen. Wenn sie aber doch existieren? Könnte man dann vielleicht wenigstens ungefähr angeben, wieviele davon in der Natur vorhanden sind?

Die sowjetischen theoretischen Physiker J. Seldowitsch, L. Okun und S. Pikelner haben versucht, das Schicksal freier Reliktquarks als real existierender Partikeln nachzuzeichnen, indem sie das „heiße" Weltallmodell zugrunde legten. Sie stellten folgende Hypothese auf: Anfangs, als die Strahlungstemperatur sehr hoch war, entstanden beliebige Teilchenpaare, darunter auch Quarks. Doch die ungeheure Materiedichte „quetschte" ihre Lebensdauer auf unbedeutende Augenblicke zusammen. Kaum entstanden, vernichteten sie sich gegenseitig, verschwanden, verwandelten sich in Strahlung.

Da sie zu den schwersten Partikeln gehörten, nahmen die Quarks vermutlich als erste die Klimaänderung im Weltall wahr. Die Temperatur des Alls sank, und es stellten sich Verhältnisse ein, wie sie in den Beschleunigern von heute vorliegen, wo die Energie zur Erzeugung von Quarks nicht mehr ausreicht. Das Weltall expandierte, die Dichte der darin enthaltenen Materie nahm ab. Quarks und Antiquarks fanden immer seltener zueinander, und die Annihilationsvorgänge hörten auf.

Jene Quarks, die sich vor dem „Ausbrennen" retten konnten, könnten bis in die Gegenwart „überlebt" haben. Ihre Anzahl muß allerdings von der Entwicklungsgeschich-

te der mit uns benachbarten Bereiche des Weltalls abhängig gewesen sein. Hat es sich um damals sehr heiße Gebiete gehandelt, dann konnten die Annihilationsprozesse eine beträchtliche Anzahl der Quarks vernichten. Dieser Umstand läßt die Antwort sehr unbestimmt ausfallen. Der Schluß jedoch, daß in der Natur nur 10^{-10} bis 10^{-13} Quarks je Nukleon existieren können, ließ die „Jäger" erleichtert aufatmen.

Was vermag nun die Evolutionstheorie des Alls über die Existenz von Dirac-Monopolen in der Natur auszusagen? Auf der Basis des „heißen" Weltallmodells haben die Wissenschaftler die mögliche Konzentration „reliktischer" magnetischer Ladungen abgeschätzt. Genau wie bei den Quarks mußte die Annihilation von Monopolen und Antimonopolen zu einem bestimmten Zeitpunkt der Evolution des Alls infolge der dafür nicht mehr ausreichenden Dichte dieser Partikeln aufgehört haben. Nur 10^{-13} Partikeln je Quadratzentimeter und Sekunde existieren heute im Weltall. Bei einer so verschwindend geringen Anzahl sind sie aber in der Natur nur sehr schwer nachzuweisen. Mit diesem Ergebnis hat die Kosmologie einen gewissen Beitrag zum „Seelenfrieden" der Experimentalphysiker geleistet, indem sie ihre negativen Ergebnisse erklärte.

Im Gegensatz dazu zeigen uns die neuesten Errungenschaften der Kosmologie das Leben des Alls in einem gänzlich anderen Licht. An die Stelle der kosmischen „Leere" tritt ein Gefühl von Enge. 400 thermische Reliktquanten kommen auf einen Kubikzentimeter!

An den Kreuzwegen im Weltall, die wir nicht kennen, treffen von den Sternen emittierte Elementarteilchen mit Sicherheit auf die „ewigen Wanderer", nämlich die thermischen Reliktquanten und Neutrinos, die die kosmischen Weiten erfüllen. Ist vielleicht die „Reibung" zwischen den kosmischen Partikeln und den Reliktquanten der Grund dafür, daß die Höchstenergie der kosmischen Strahlung, die die Erdatmosphäre erreicht, maximal 10^{19} bis 10^{20} eV beträgt?

„Die Probleme des großen Alls sind aufs engste mit den Aufgaben der Elementarteilchentheorie verflochten", sagte der berühmte Astrophysiker Akademiemitglied W. Ambarzumjan. „Wie verhalten sich Partikeln ultrahoher Energie beim Passieren der verdünnten interstellaren Materie

und der kosmischen Magnetfelder? Existieren auch Antiteilchen in der kosmischen Strahlung, und wie groß ist ihre Anzahl? Welche Art von Elementarteilchen bildet den Hauptträger jener ungeheuren Energie, die in den Radiogalaxien konzentriert ist und allmählich in Form von Radiofrequenzstrahlung emittiert wird? Es ist verständlich, wenn viele Astrophysiker die Möglichkeit der theoretischen Klärung der Frage nach dem Ursprung der Sterne und Galaxien mit den zukünftigen Erfolgen der Elementarteilchenphysik verknüpfen."

Das kleine Weltall

Am Ende des 16. Jahrhunderts wurde zum ersten Mal das Problem aktuell, ein einheitliches Weltbild zu entwerfen. Johannes Kepler versuchte mit dem Begriff „Weltall" zwei Bereiche miteinander zu verbinden, die einander, wie man damals glaubte, nicht berühren: den Bereich des Irdischen und den Bereich des Himmlischen.

Seit jener Zeit hat sich vieles in der Welt verändert. Die Armee der Naturwissenschaftler ist längst in einzelne Unterabteilungen aufgegliedert. Während die einen Wissenschaftler immer tiefer in die Struktur der Materie eindrangen, bemühten sich andere, hinter die Geheimnisse des Weltalls zu kommen. Es hatte den Anschein, als liefen sie in entgegengesetzte Richtungen und als würde die Beziehung zwischen der Struktur des Raumes, der bereits bis auf Entfernungen von 10^{-17} m erforscht ist, und den Prozessen, die in den Grenzen des sichtbaren Alls ablaufen — in einer Entfernung bis zu 10^{26} m also — , weniger merklich.

Tatsächlich aber ist die Idee von der materiellen Einheit der Welt heute weitaus deutlicher formuliert als irgendwann einmal in der Vergangenheit. Sie vereinigt unsere Begriffe vom Ultragroßen und vom Ultrakleinen. Alle Vorstellungen vom großen Weltall stützen sich auf die gleichen Prinzipien, denen auch die Gesetze der Mikrowelt unterliegen.

„Wie bemerkenswert die neuesten astronomischen Entdeckungen auch sind, sie haben uns doch nicht über den Bereich der bekannten physikalischen Vorstellungen und

Gesetze hinausgeführt", schreibt dagegen Akademiemitglied W. Ginsburg. Die Summe aller Kenntnisse aus der Mikrowelt vermag nicht jenes unbekannte „Dunkel" zu erhellen, das uns die ersten Augenblicke der Existenz des Alls verbirgt. Die uns bekannten Naturgesetze reichen in ihrem Geltungsbereich bereits nicht mehr zu Dichten über 10^{93} g/cm^3. Doch vielleicht verbergen sich gerade in den „Anfangsbedingungen", die irgendwann einmal im Weltall herrschten, die Geheimnisse neuer, noch unbekannter Wechselwirkungen, die in der Welt der Elementarteilchen bestehen? „In diesem Fall", sagte F. Dyson, „können wir keine endgültige Klärung in der Elementarteilchenphysik erwarten, solange nicht durch Beobachtungen eine Antwort auf die großen und noch völlig offenen Fragen der Kosmologie gefunden wird."

Die schwachen Wechselwirkungen der Elementarteilchen haben die Prinzipien der Ladungs- und Raumsymmetrie hinfällig werden lassen. Sind vielleicht gerade diese Tatsachen mit der Asymmetrie der Makrowelt oder auch mit dem Fehlen von Antimaterie im All verknüpft? Wiederum verbirgt sich die Antwort allem Anschein nach in den „Anfangsbedingungen" der Existenz des Weltalls. Von hier aus nahm auch der „Zeitpfeil" seinen Weg, den man jetzt in der Mikrowelt zu entdecken versucht.

Und wie steht es mit den Problemen der Gravitation? Die Physik der Elementarteilchen sieht sich heute mit der Notwendigkeit konfrontiert, bei der Schaffung einer Theorie der Elementarteilchen die Rolle der Gravitationswechselwirkung zu berücksichtigen. In den letzten Jahren hat Akademiemitglied M. Markow mit der Erarbeitung seines Elementarteilchenmodells begonnen, bei dem die Struktur der Elementarteilchen durch die gravitative Wechselwirkung riesiger Objekte kosmischen Ausmaßes definiert wird. Zum Andenken an den sowjetischen theoretischen Physiker A. Fridman, den Entdecker neuer kosmologischer Folgerungen aus der Relativitätstheorie, hat M. Markow das von ihm entworfene Modell eines Elementarteilchens als Fridmon bezeichnet. Die Fridmonentheorie von Markow ist der erste Versuch, ein Elementarteilchenmodell mit räumlicher Ausdehnung nicht auf der Grundlage der Quantenmechanik, sondern durch kosmologische Betrachtungen zu schaffen.

„Die Theorie der Fridmonen", schreibt M. Markow,

„erlaubt die Betrachtung des Weltalls als Elementarteilchen und des Elementarteilchens als Weltall, die bei äußerer Identität denkbar verschiedenartige innere Strukturen haben können."

Man könnte annehmen, diese Zeilen stammten aus einem wissenschaftlich-phantastischen Roman und nicht aus der Feder eines weltweit bekannten Wissenschaftlers.

„Allein die Möglichkeit dieser Vereinigung entgegengesetzter Eigenschaften", schreibt Markow weiter, „Eigenschaften des ultragroßen und ultrakleinen Raumes, erscheint nicht weniger erstaunlich als die Vereinigung der Eigenschaften von Korpuskel und Welle in einem Objekt."

Markows Theorie liefert eine sehr interessante Möglichkeit für die Entwicklung unserer Anschauungen von der Struktur der Materie. Was erwartet uns unter diesem Aspekt beispielsweise in der einheitlichen Quantentheorie des Feldes, mit der sich Heisenberg beschäftigte? Er sieht den letzten Wesensinhalt aller Materie in Gestalt eines gewissen einheitlichen Feldes. „Im Ergebnis des Abschlusses meiner Theorie", schreibt Heisenberg, „wird die Physik ihre Untersuchungen bereits nicht mehr in die Tiefe, sondern in die Breite führen."

Wohin schließlich führt uns das andere Herangehen an die Struktur der Materie über die Weiterentwicklung des herkömmlichen Begriffes „... besteht aus ..."?

Die Idee, daß π-Mesonen aus Nukleonen und Antinukleonen und Nukleonen wiederum aus Quarks bestehen können, also der Gedanke, daß sich die Elementarteilchen aus anderen, wesentlich schwereren Partikeln zusammensetzen können, kann nach den Worten von Akademiemitglied M. Markow „als hervorstechendstes und bemerkenswertestes Ereignis in der gesamten 1000jährigen Geschichte der Existenz des Begriffes ‚Materie' angesehen werden".

Darf man nun die Materie in Gestalt von Quarks als Urmaterie oder Primärmaterie identifizieren? Oder sollte man vielmehr annehmen, daß die Quarks ihrerseits aus noch schwereren Teilchen bestehen? Doch in diesem Fall müßte die „elementarste" Partikel eine unendlich große Masse haben?

„Die moderne Physik", schreibt Markow, „vermittelt uns eine völlig neue Möglichkeit zur Interpretation des Begriffs ‚... besteht aus ...'. Das Weltall insgesamt könnte eine mikroskopische Partikel sein. Eine mikroskopische

Partikel ihrerseits könnte ein ganzes Weltall enthalten. Ein Elementarteilchen kann aus einer ungeheuer großen Zahl von Teilchen bestehen, allgemein gesprochen aus allen Arten von Teilchen. In dieser Konzeption existiert keine Urmaterie, und die Hierarchie der unendlich vielfältigen Materieformen läuft gewissermaßen in sich selbst zurück."

Markows Hypothese ist eine eindrucksvolle Bestätigung der Ansichten des hervorragenden sowjetischen Wissenschaftlers S. Wawilow. Er nahm an, daß — wenn die Eigenschaften eines Elementarteilchens vieles im Verhalten der Welt insgesamt erklären — wir auch berechtigt sind, zu erwarten, daß die Eigenschaften der Elementarteilchen selbst nach den allgemeingültigen Gesetzen der Dialektik durch die Eigenschaften der Welt insgesamt definiert werden.

Vielleicht „sind in den tiefsten Tiefen der Mikrowelt die gleichen Kräfte am Werk, die die Struktur des Alls bedingen?" schreibt Professor J. Smorodinski. „Die Evolution des Alls hängt insbesondere mit Kernreaktionen zusammen, seine Krümmung geht möglicherweise auf Neutrinoströme zurück. Es fällt uns schwer, die Wechselbeziehungen in der Welt der Elementarteilchen zu verstehen. Doch die Überzeugung wird immer stärker, daß es keine überflüssigen Partikeln in dieser Welt gibt, daß die Ladungsgröße des Elektrons im Endeffekt irgendwie mit der Gravitationskonstante verknüpft ist, die die Bewegungen der Welten lenkt, und daß das seltsame Verhalten der Kaonen mit dem Entstehen der Galaxien verknüpft ist.

So sind Anfang und Ende des Buches der Natur ineinander verflochten. Und nichts ist darin, was überflüssig wäre."

Bildquellenverzeichnis

Nowosti 2; Photo CERN 3; Tumanow, VIK Dubna, 16; Zentralbild 2.

Die Zeichnungen auf den Seiten 42, 82, 93, 126, 173, 197 wurden nach Vorlagen aus Lindner, Das Bild der modernen Physik, Urania-Verlag 1973, gestaltet.

Übersicht über einige Eigenschaften der Elementarteilchen

Bezeichnung	Symbol	Anti-teilchen	relative Masse	mittlere Lebensdauer in s
Photon	γ	γ	0	stabil
		Leptonen (leichte Teilchen)		
Neutrino	ν	$\bar{\nu}$	0	stabil
Elektron	e^-	e^+	1	stabil
μ-Meson	μ^-	μ^+	206,8	$2{,}2 \cdot 10^{-6}$
		Mesonen (mittelschwere Teilchen)		
π-Meson	π^0	π^0	263,9	$0{,}9 \cdot 10^{-16}$
	π^+	π^-	273,2	$2{,}5 \cdot 10^{-8}$
K-Meson	K^0	$\bar{K}^0$	974,1	50% $8{,}8 \cdot 10^{-11}$
				50% $5{,}8\ 10^{-8}$
	K^+	K^-	966,4	$1{,}2 \cdot 10^{-8}$
		Baryonen (schwere Teilchen)		
Nukleonen				
Proton	p	$\bar{p}$	1836,10	stabil
Neutron	n	$\bar{n}$	1838,62	$1{,}0 \cdot 10^{3}$
Hyperonen				
Λ-Hyperon	Λ	$\bar{\Lambda}$	2183	$2{,}6 \cdot 10^{-10}$
Σ-Hyperon	Σ^0	$\bar{\Sigma}^0$	2334	$1{,}0 \cdot 10^{-14}$
	Σ^+	$\bar{\Sigma}^+$	2328	$8{,}0 \cdot 10^{-11}$
	Σ^-	$\bar{\Sigma}^-$	2343	$1{,}6 \cdot 10^{-10}$
Ξ-Hyperon	Ξ^0	$\bar{\Xi}^0$	2573	$3{,}0 \cdot 10^{-10}$
	Ξ^-	$\bar{\Xi}^-$	2586	$1{,}7 \cdot 10^{-10}$
Ω-Hyperon	Ω^-	$\bar{\Omega}^-$	3273	$1{,}0 \cdot 10^{-10}$