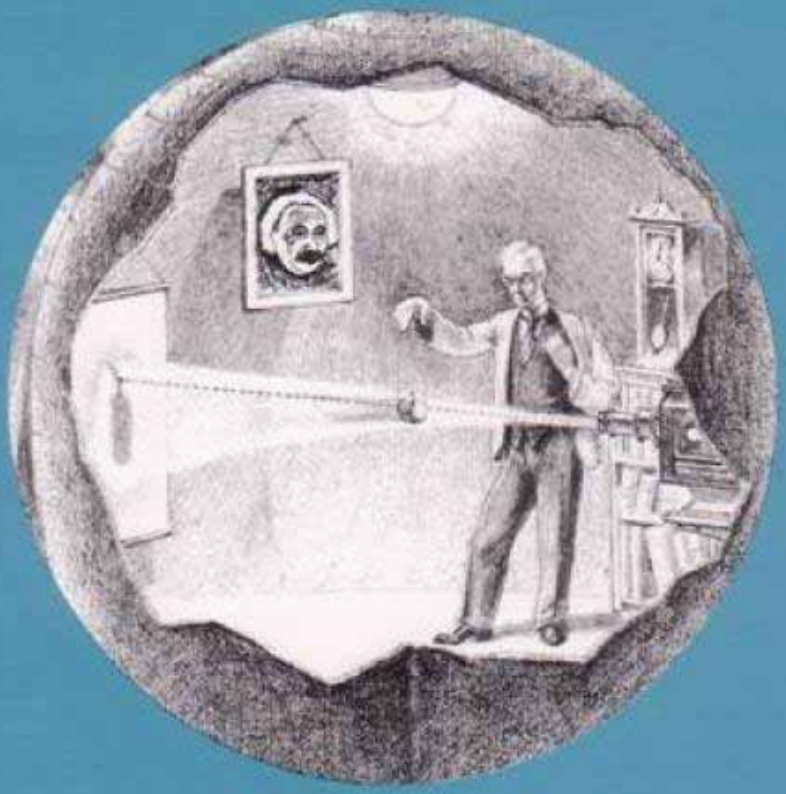
George Gamov



Mr. Tompkins' seltsame Reisen durch Kosmos und Mikrokosmos

vieweg

George Gamov

Mr. Tompkins'
seltsame Reisen durch
Kosmos und Mikrokosmos

George Gammon

Mr.Tompkins'
seltsame Reisen durch
Kosmos und Mikrokosmos

Mit Anmerkungen
"Was der Professor noch nicht wusste"
von Roman U. SexI

Scanned by **Morpheus**

Facetten der Physik

Physik hat viele Facetten: historische, technische, soziale, kulturelle, philosophische und amüsante. Sie können wesentliche und bestimmende Motive für die Beschäftigung mit den Naturwissenschaften sein. Viele Lehrbücher lassen diese „Facetten der Physik" nur erahnen. Daher soll unsere Buchreihe ihnen gewidmet sein.

Prof. Dr. Roman Sexl
Herausgeber

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Gamov, George:
[Sammlung (dt.)1 M[iste]r Tompkins seltsame Reisen durch Kosmos und Mikrokosmos / George Gamov. [Übers.: Helga Stadler]. Mit Anm. "Was der Professor noch nicht wusste" / von Roman U. Sexl. - Braunschweig; Wiesbaden: Vieweg, 1980.
(Facetten der Physik)
Einheitssacht.: Mister Tompkins in paperback (dt.)
ISBN 3-528-08419-7
Dieses Buch ist die deutsche Übersetzung von George Gamov Mr. Tompkins in Paperback (Cointaining Mr. Tompkins in Wonderland and Mr. Tompkins Explores the Atom) ©Cambridge University Press 1965
Übersetzung: Mag. Helga Stadter, Wien

1. Auflage 1980
Nachdruck 1981, 1982, 1984, 1986, 1987, 1989, 1993, 1994
Alle Rechte an der deutschen Ausgabe vorbehalten
©Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden, 1980
Der Verlag Vieweg ist ein Unternehmen der Bertelsmann Fachinformation GmbH.
Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.
Satz: Vieweg, Braunschweig
Abbildungen: John Hookham and George Gamov
Druck und buchbinderische Verarbeitung: Langelüddecke, Braunschweig
Gedruckt auf säurefreiem Papier
Printed in Germany
ISBN 3-528-08419-7

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur deutschen Ausgabe (von Roman U. Sexl)

Vorwort

Einleitung

1 Örtliche Geschwindigkeitsbegrenzung

2 Der Vortrag des Professors über Relativität, der Mr. Tompkins zum Träumen brachte

3 Mr. Tompkins macht Urlaub

4 Der Vortrag des Professors über den gekrümmten Raum, die Gravitation und das Universum

5 Das pulsierende Weltall
6 Eine kosmische Oper

7 Quantenbillard

8 Im Quantendschungel

9 Der Maxwellsche Dämon

10 Das heitere Volk der Elektronen
101/2 Ein Kapitel aus dem vorangegangenen Vortrag, das Mr. Tompkin´s verschlief

Mr. Tompkins speist japanisch

Ergänzende Literatur

180Ein bunter Abend in einem Leningrader Restaurant im Jahr
192 7 George Gamov spielt den Gast, Yevgenia Kanegiesser
- die spätere Gattin von Sir R. Peierls - die Hostess. Der
Musiker ist der Nobelpreisträger Lev Landau. (Aus George

Gamov, My World Line, New York 1970)

Vorwort zur deutschen Ausgabe

Wer war George Gamov? Ein Oberst der roten Armee, der an der Entwicklung der amerikanischen Wasserstoffbombe mitarbeitete. Ein Physiker, der eine der ersten Theorien des Alpha-Zerfalls gab. Ein Wissenschaftler, der auf der Titelseite der Prawda mit einem Gedicht gefeiert wurde. Ein Forscher, der einen wesentlichen Beitrag zur Theorie des Beta-Zerfalls lieferte. Ein Russe, der versuchte, aus der Sowjetunion mit einem Paddelboot über das Schwarze Meer zu fliehen. Ein Astrophysiker, der erstmals die Vorgänge unmittelbar nach dem Urknall studierte und die kosmische Hintergrundstrahlung vorhersagte. Ein Naturforscher, der als erster postulierte, dass jeweils drei Nukleontide der Desoxyribonukleinsäure eine Aminosäure in einem Protein festlegen. Ein Erfolgsautor, dessen populäre Bücher auch heute, vierzig Jahre nach ihrer ersten Veröffentlichung noch aktuell sind.

George Gamov wurde am 4. März 1904 in Odessa geboren, wo er auch seine Jugend verbrachte und im Jahre 1922 seine Studien begann. Bereits ein Jahr später unterrichtete Gamov Physik an der Artillerieschule der roten Armee und wurde im Alter von zwanzig Jahren zum Oberst ernannt. Dies war, wie er in seiner Autobiographie "My World Line" schreibt, eine reine Gehaltsfrage, die nichts mit militärischer Erfahrung zu tun hatte. Nur ein einziges Mal durfte er den Kommandanten einer Trigonometriegruppe der Artillerie vertreten. Es galt die Koordinaten von Zielen zu vermessen, die als zweidimensionale "Potemkinsche Kirchen" aufgebaut worden waren. Irrtümlich führte Gamov auch eine der noch existierenden Dorfkirchen in der Zielliste - und nur in letzter Minute konnten die dort betenden Bauern gerettet werden. Dies verkürzte seine Armeekarriere und machte noch 1949 Schwierigkeiten, als er die "Security Clearance" für die Arbeit an der Entwicklung der Wasserstoffbombe in den USA erhalten sollte.

Nach Absolvierung seiner Studien hatte Gamov Gelegenheit einige Monate in Göttingen zu arbeiten, der damaligen Hochburg der deutschen theoretischen Physik. Die Quantentheorie war damals erst zwei Jahre alt und wurde in aller Welt mit größtem Eifer und ebensolchem Erfolg auf zahlreiche Atome und Moleküle angewendet. Konnte man damit auch Atomkerne studieren? Vielleicht wurde Gamov zu dieser Frage durch das Studium

eines Artikels von Ernest Rutherford angeregt, der 1927 die Streuung von Alpha-Teilchen an Atomkernen nochmals genau untersucht hatte. Dabei zeigte sich, dass die Coulomb-Abstoßung zumindest bis zu einer Entfernung von 3,2 - 10-14M vom Kernmittelpunkt wirksam ist. Wie konnten dann Alpha-Teilchen mit relativ geringer Energie von Uran und anderen radioaktiven Elementen emittiert werden? Diese Frage führte Gamov zur Erklärung des Alpha-Zerfalls durch den Tunneleffekt, der etwa zur gleichen Zeit unabhängig auch von R. Gumey und E. Condon gefunden wurde.

Das folgende akademische Jahr verbrachte Gamov bei Nils Bohr in Kopenhagen. Er entwickelte das Tröpfchenmodell des Atomkerns und begann sich für Elementumwandlungen im Inneren von Sternen zu interessieren, ein Thema, das ihn in den

folgenden Jahrzehnten immer wieder beschäftigen sollte.

Im Sommer 1929 kehrte Gamov nach Russland zurück. Die "Prawda" feierte ihn mit einem Gedicht auf der Titelseite und andere Zeitungen berichteten "Ein Sohn der Arbeiterklasse hat die kleinste Maschinerie der Welt erklärt: den Atomkern. Ein Sowjetbürger hat dem Westen gezeigt, dass der russische Boden seine eigenen Platos und scharfsinnigen Newtons hervorbringen kann."

Bereits im Herbst verließ Gamov aber Russland wieder. Zwei arbeitsreiche Jahre in Cambridge und Kopenhagen folgten, und erst 1931 kehrte er nach Russland zurück. Dort hatte sich die Atmosphäre wesentlich gewandelt. Die Wissenschaft hatte nunmehr der offiziellen Staatsphilosophie des dialektischen Materialismus zu dienen und vor allem den Imperialismus zu bekämpfen. Idealistische Theorien, wie die Relativitätstheorie und die Quantentheorie sollten eliminiert werden, und die Sowjetenzyklopädie predigte die Rückkehr zum Ätherbegriff. Wenig später erhielt der verantwortliche Redakteur folgendes Telegramm:

"Durch Ihren Artikel über den Lichtäther inspiriert, arbeiten wir enthusiastisch am Beweis seiner materiellen Existenz. Der alte Albert ist ein idealistischer Idiot!

Wir erwarten Ihre Führung auch in der Suche nach dem Caloricum, dem Phlogiston und den elektrischen Flüssigkeiten. Gezeichnet: G. Gamov, L. Landau, A. Bronstein, Z. Genazvali, S. Grilokishnikov."

Das Telegramm war der offiziellen Stellung seiner Unterzeichner nicht förderlich, und bald beschloss Gamov, die Sowjetunion zusammen mit seiner Frau "Rho", die er 1931 geheiratet hatte, zu verlassen. Legal war dies nicht möglich. Das Studium der Grenzen schien nur einen Weg offen zu lassen: Mit dem Paddelboot die 220 km entfernte Türkei auf dem Weg über das

Schwarze Meer zu erreichen. Diese Reise wurde aber bereits nach einem Tag durch einen aufkommenden Sturm jäh beendet und die beiden Paddler waren glücklich wieder heil in die Sowjetunion zurückzukehren. Erst zwei Jahre später durfte Gamov zu einer Tagung nach Brüssel ausreisen. Er kehrte tue mehr zurück, sondern nahm eine Stelle an der George Washington Universität in Washington D.C. an. Dort arbeitete er gemeinsam mit E. Teller an einer Theorie des Beta-Zerfalls. Vor allem aber setzte er seine Studien der thermonuklearen Reaktionen und der Elementumwandlung im Inneren von Sternen fort. Gemeinsam mit E. Teller entstand eine Theorie der Energie- in roten Riesen.

Die Elementumwandlung in Sternen war zumindest ein Weg, die Ent- und Verteilung der chemischen Elemente zu verstehen. "The Origin of Chemical Elements" von R. Alpher, H. Bethe und G. Gamov erschien am

April 1948 in The Physical Review. Tatsächlich hatte Bethe keinen Anteil in diesem Artikel, Gamov hatte ihn nur hinzugefügt um das Griechische Alphabet in der Liste der Autoren

(Alpha, Beta, Gamma) zu vervollständigen.

War die Entstehung der chemischen Elemente aber tatsächlich nur im inneren der Sterne erfolgt? Gamov wandte sich bald einer anderen Theorie zu. Er postulierte, dass das Universum kurz nach dem Urknall sehr dicht und heiß gewesen sein müsse, und dass in dieser Zeit die Kernreaktionen stattgefunden hatten, die zu den heute bekannten Elementen geführt haben. Seine Theorie, die er zusammen mit R. Alpher und R. Herman ausarbeitete, ließ vermuten, dass ein Relikt der heißen Anfangsphase des Universums auch heute noch vorhanden sein sollte, nämlich die "kosmische Hintergrundstrahlung Die Temperatur dieser Strahlung schätzten die Autoren einmal auf 5 K, wenig später auf 7 K. Sie nahmen ihre Vorhersage aber selbst nicht sehr ernst, und sie wurde in der Folge vergessen. Erst mehr als zehn Jahre später beschäftigte sich R. Dicke in Princeton wieder mit der Theorie dieser Strahlung. Während er noch an den Plänen für ihre Messung arbeitete, war es Penzias und Wilson bei ihrer Suche nach Signalen von Satelliten durch Zufall geglückt, diese Strahlung nachzuweisen. Ihre Temperatur betrug 2,7 K, stimmte also relativ genau mit Gamovs ursprünglichen Vorhersagen überein, was allerdings als Zufall betrachtet werden muss. Für ihre Entdeckung erhielten Penzias und Wilson im Jahre 1978 den Nobelpreis für Physik.

Gamovs Beiträge zur Wissenschaft beschränkten sich aber nicht nur auf die Kernphysik und die Kosmologie. Im Jahre 1953 las er in "Nature" aber die Entdeckung von James Watson und Francis Crack. Sie hatten die Struktur der Desoxyribonukleinsäure ermittelt, die die genetische Informationen aller lebenden Organismen enthält. Gamovs Reaktion beschreibt F. Crick folgendermaßen:

"Die Idee des genetischen Codes wurde durch die Entschlüsselung der Struktur der DNS im Jahre 1953 wesentlich gefördert. Ihre Einfachheit beeindruckte viele Forscher, darunter auch den Kosmologen George Gamov. Eine abgekürzte Fassung von Gamovs Arbeiten erschien zuerst in einem kurzen Brief an Nature' im Jahre 1954 und dann in einer längeren Fassung in den Kongelige Danske Videnskabernes Selskab. Ich bin der stolze Besitzer eines frühen Entwurfes dieser Arbeit, die damals den Titel trug "Proteinsynthese durch DN S-Moleküle", und deren Autoren G. Gamov und C. G. H. Tompkins sind! (Gamov erzählte mir einmal, dass er diese Arbeit bei der Dänischen Akademie einreichte, dort aber Einwendungen gegen den imaginären Mr. Tompkins als Mitautor erhoben wurden, und die Arbeit deshalb schließlich mit Gamov als Alleinautor erschien.) Die Arbeit baut auf der Idee auf, dass die Proteinsynthese auf der Oberfläche der doppelsträngigen DNS stattfindet, und die Basensequenz im Inneren dieser Struktur eine Reihe von Hohlräumen bildet, die für die einzelnen Aminosäuren charakteristisch sind. ... "

In diesem bedeutenden Beitrag Gamovs zur Theorie des genetischen Codes taucht also Mr. Tompkins auf, der Held unseres Buches. Gamov hatte ihn 1937 als Figur für eine Kurzgeschichte geschaffen, die nach der Ablehnung durch einige Zeitschriften schließlich in "Discovery" erschien. Sie bildete den Anfang einer Reihe, die schließlich in "Mr.Tompkins' seltsame Reisen durch Kosmos und Mikrokosmos" ihren Niederschlag fand. In fast alle

Weltsprachen übersetzt, ist Mr. Tompkins in den vierzig Jahren seiner Existenz zu einer der populärsten Figuren der "öffentlichen Wissenschaft" geworden, die noch lange über den Tod ihres Schöpfers am 19. August 1968 hinaus die Phantasie und das Interesse zahlreicher Leser anregen wird.

Der folgenden Neuausgabe der Erlebnisse von Mr. Tompkins liegt eine Übersetzung von Mag. Helga Stadler zugrunde. Ich habe versucht, neuere Entwicklungen durch Anmerkungen "Was der Professor noch nicht wusste" zu berücksichtigen. Nur an einer Stelle wurde Gamovs Originaltext geringfügig korrigiert, um die neueren Daten bezüglich des Alters und der Ausdehnung des Kosmos zu berücksichtigen. Ich habe nicht versucht, die in den Schlusskapiteln enthaltene Skizze der Elementarteilchenphysik auf den heutigen Stand zu bringen, da diese Entwicklung gerade derzeit zu sehr in Fluss ist. Die "ergänzende Literatur" am Ende des Buches soll hier Hinweise auf neuere Resultate geben.

Wien, im November 1979 Roman Sexl

Vorwort

Im Winter 1938 schrieb ich eine kurze, in wissenschaftlicher Hinsicht ins Phantastische gehende Geschichte (keine Science-Fiction-Story), in der ich versuchte, einem Laien die wesentlichen Ideen der Theorie des gekrümmten Raumes und des expandierenden Universums darzulegen. Dies wollte ich dadurch erreichen, dass ich die wirklich existierenden relativistischen Phänomene so übertrieben darstellte, dass sie auch der Held unserer Geschichte, C. G. H.*) Tompkins, ein an moderner Naturwissenschaft interessierter Bankangestellter, nicht übersehen konnte.

Ich schickte das Manuskript an Harper's Magazine und bekam es, wie alle Anfänger auf diesem Gebiet, mit einer kurzen, ablehnenden Bemerkung zurück. Ein weiteres halbes Dutzend Magazine, bei denen ich es ebenfalls versuchte, machten es genauso. Ich legte also das Manuskript in die Schreibuschlade und vergaß die Sache. Im Sommer desselben Jahres nahm ich an der internationalen Konferenz für Theoretische Physik teil, die der Völkerbund in Warschau veranstaltete. Bei einem Glas vortrefflichen polnischen Miods plauderte ich mit meinem alten Freund Sir Charies Darwin, dem Enkel von Charles Darwin (dem Verfasser des Werks Über die Entstehung der Arten). Schließlich kamen wir auf die Popularisierung der Naturwissenschaften zu sprechen. Ich erzählte Darwin von meinem diesbezüglichen Missgeschick und er sagte: "Schau, Gamov, wenn Du wieder in den Staaten bist, grabe Dein Manuskript aus und schicke es an Dr. C. P. Snow; er ist Herausgeber des populärwissenschaftlichen Magazins Discovery, das bei Cambridge University Press erscheint."

Das tat ich denn auch, und eine Woche später erhielt ich von Snow ein Telegramm folgenden Inhalts: "Ihr Artikel erscheint in der nächsten Ausgabe. Schicken Sie bitte mehr." So erschienen in den folgenden Nummern des

*(Die Initialen von Mr. Tompkins gehen auf drei fundamentale physikalische Konstanten zurück: die Lichtgeschwindigkeit c, die Gravitationskonstante G, und das Wirkungsquantum b; man muss sie um ungeheuer große Faktoren verändern, um ihre Auswirkungen auch für den Mann von der Straße leicht bemerkbar zu machen.)

Discovery eine Reihe von Geschichten über Mr. Tompkins, die dazu beitrugen, die Relativitätstheorie und die Quantentheorie einem breiten Interessentenkreis nahezubringen. Kurze Zeit später erhielt ich von Cambridge University Press einen Brief, in dem man mir vorschlug, diese Artikel zusammen mit einigen weiteren Geschichten (zur Auffüllung der Seiten) in Buchform zu veröffentlichen. Das Buch wurde 1940 von Cambridge University Press unter dem Titel Mr. Tompkins in Wonderland herausgebracht und ist seither sechzehnmal neuaufgelegt worden. 1944 erschien dazu die Fortsetzung Mr. Tompkins Explores the Atom; hiervon gibt es bisher neun Auflagen. Außerdem wurden beide Bücher in praktisch alle europäischen Sprachen (ausgenommen Russisch) übersetzt, überdies auch ins Chinesische und das Hindustani.

Kürzlich entschloss sich Cambridge University Press, die beiden ursprünglichen Bände zu einer Taschenbuchausgabe zusammenzufassen, wobei ich den Stoff auf den neuesten Stand bringen und einige Kapitel hinzufügen sollte, die die neuesten Erkenntnisse auf dem Gebiete der Physik und verwandter Wissenschaften berücksichtigen. Ich musste also die Kapitel über Kernfusion und Kernspaltung, über das "steady state universe" und über aktuelle Probleme aus der Welt der Elementarteilchen hinzufügen. Das ergibt den Inhalt des vorliegenden Buches.

Einige Worte sind noch über die Illustrationen zu sagen. Die ursprünglichen Artikel im Discovery und das erste Buch wurden von Mr. John Hookham illustriert, der somit die Gesichtszüge von Mr. Tompkins schuf. Als ich das zweite Buch schrieb, übte Mr. Hookham seine Tätigkeit als Illustrator nicht mehr aus. Daher entschloss ich mich, das Buch selbst zu illustrieren, wobei ich Hookhams Stil treu blieb. Die neuen Illustrationen im vorliegenden Buch stammen gleichfalls von mir. Die Verse und Lieder, die dieser Band beinhaltet, sind von meiner Frau Barbara verfasst.

G. Gamov

Einleitung

Von früher Kindheit an gewöhnen wir uns immer mehr an ein Bild der Welt wie wir es durch unsere fünf Sinne wahrnehmen. In diesem Stadium unserer geistigen Entwicklung bilden sich unsere grundlegenden Vorstellungen von Raum, Zeit und Bewegung aus. Wir gewöhnen uns bald so sehr an diese Vorstellungen, dass wir fortan zu der Auffassung neigen, unser auf ihnen beruhendes Weltbild sei das einzig mögliche; jede Veränderung desselben erscheint uns paradox. Die Entwicklung exakter physikalischer Beobachtungsmethoden jedoch und die gründlichere Analyse beobachteter Zusammenhänge haben die moderne Wissenschaft zu dem Schluss geführt, dass die klassische Fundierung gänzlich versagt, wenn man sie für die Beschreibung der Erscheinungen verwendet, die normalerweise unseren Beobachtungen unzugänglich sind, und dass für eine korrekte und folgerichtige Beschreibung unserer neuen,

erweiterten Erfahrungswelt eine gewisse Änderung der grundlegenden Begriffe von Raum, Zeit und Bewegung unumgänglich notwendig ist.

Der Unterschied zwischen den allgemein herrschenden Vorstellungen and den von der modernen Physik eingeführten ist jedoch verschwindend dein, was die Erfahrungen des täglichen Lebens anlangt. Man kann sich aber auch andere Welten denken, in denen zwar dieselben Gesetze herrschen wie in unserer Welt, wo aber die physikalischen Konstanten, die die Grenzen der Anwendbarkeit unserer alten Begriffe bestimmen, andere numerische Werte haben in diesem Fall würden die neuen, nunmehr richtigen Vorstellungen von Raum, Zeit und Bewegung, zu denen die moderne Wissenschaft erst nach sehr langwieriger und sorgfältiger Forschungsarbeit gelangt ist, geistiges Allgemeingut. Man darf behaupten, dass in einer solchen Welt selbst ein einfacher Wilder mit den Grundsätzen der Relativitäts- und Quantentheorie wohlvertraut wäre und sie im Alltag und auf der Jagd anwenden würde.

Der Held der vorliegenden Geschichten wird in seinen Träumen in einige dieser Welten versetzt, wo Erscheinungen, die unseren Sinnen für gewöhnlich unzugänglich sind, so stark übertrieben auftreten, dass man sie als Geschehnisse des täglichen Lebens beobachten kann. In seinen phantastischen, aber wissenschaftlich gesehen durchaus folgerichtigen Träumen kommt ihm ein alter Physikprofessor zu Hilfe (dessen Tochter Maud er womöglich heiratet). In einfacher Sprache erklärt ihm dieser die ungewöhnlichen Vorkommnisse, die unser Held in der relativistischen Welt und den Welten der Kosmologie, des Quantums, der atomaren und nuklearen Strukturen, der Elementarteilchen usw. erlebt.

Es ist zu hoffen, dass die wundersamen Abenteuer unseres Mr. Tompkins dem interessierten Leser helfen werden, sich ein klareres Bild von dem verborgenen Wesen jener physikalischen Welt zu formen, in der wir tatsächlich leben.

Örtliche Geschwindigkeitsbegrenzung

Für Mr. Tompkins, den kleinen Angestellten einer bedeutenden Bank, war heute ein arbeitsfreier Tag. Er schlief bis spät in den Vormittag hinein und leistete sich dann ein geruhsames Frühstück. Hierauf ging er daran, sich den Tag einzuteilen. Zunächst wollte er nachmittags ein Kino besuchen. Er schlug die Morgenzeitung auf und suchte den Anzeigenteil. Doch keiner der Filme sah sehr verlockend aus. Die gängigen Hollywoodschinken mit ihren nicht enden wollenden Liebesgeschichten verabscheute er. Er suchte nach einem Film mit richtigen Abenteuern, nach etwas Außergewöhnlichem, vielleicht sogar Phantastischem. Doch es gab nichts dergleichen. Da fiel

wen Blick auf eine kleine Notiz am unteren Seitenrand. Die Universität
der Stadt kündigte eine Vortragsreihe über Probleme der modernen Physik
an. An diesem Nachmittag stand Einsteins Relativitätstheorie auf dem Pro- Das wäre doch
etwas für ihn! Er hatte oft davon gehört, dass nur ein

Schon wieder ein Hollywood-Schinken!

Dutzend Leute auf der Welt Einsteins Theorie wirklich verstünden. Vielleicht könnte er der dreizehnte sein! jedenfalls nahm er sich vor, diesen Vortrag zu besuchen; möglicherweise war es das, was ihm fehlte.

Als er den großen Hörsaal der Universität betrat, hatte die Vorlesung bereits begonnen. Der Saal war voll von zumeist jungen Studenten, die mit Eifer den Ausführungen eines großen, weißbärtigen Herrn lauschten, der seiner Zuhörerschaft die wesentlichen Ideen der Relativitätstheorie nahezubringen versuchte. Alles, was Mr. Tompkins verstand, war, dass es bei Einsteins Theorie um die Existenz einer Höchstgeschwindigkeit geht, der Geschwindigkeit des Lichts, die von keinem materiellen Körper überschritten werden kann, und dass diese Tatsache zu sehr ungewöhnlichen, ja seltsamen Folgerungen führt. Der Professor stellte jedoch fest, dass in Anbetracht der Größe der Lichtgeschwindigkeit - sie liegt bei 300 000 km/s - die relativistischen Effekte im täglichen Leben wohl kaum beobachtet werden könnten. Die Natur dieser Effekte war wirklich äußerst schwer zu verstehen; es schien Mr. Tompkins, dass alles dem gewöhnlichen Verstand widerspräche. Er versuchte sich die Kontraktion von Längenmaßen vorzustellen und das eigenartige Verhalten von Uhren - beides Effekte, die sich einstellen müssten, wenn sich Körper annähernd mit Lichtgeschwindigkeit bewegen - da sank sein Kopf langsam auf seine Schulter.

Als er seine Augen wieder öffnete, fand er sich nicht auf einer Bank des Hörsaals, sondern auf einer jener Bänke wieder, die die Stadtgemeinde aufgestellt hatte, um für die Bequemlichkeit der Bürger zu sorgen, die auf einen Bus warteten. Es war eine schöne, alte Stadt mit mittelalterlichen Collagegebäuden, die die Straße säumten. Er hatte das Gefühl zu träumen, aber zu seiner Überraschung war in seiner Umgebung nichts Absonderliches zu bemerken. Sogar ein Polizist stand an der gegenüberliegenden Straßenecke und sah so drein, wie es Polizisten gewöhnlich tun. Die Zeiger der großen Turmuhr wiesen auf fünf, und die Straßen waren nahezu leer. Ein einziger Radfahrer fuhr langsam die Straße herab. Als er Näherkahm, wurden die Augen von Mr. Tompkins groß vor Staunen. Denn das Fahrrad und der junge Mann darauf schienen in ihrer Bewegungsrichtung unglaublich flachgedrückt zu sein, so, als würde man sie durch eine Zylinderlinse betrachten. Die Turmuhr schlug fünf und der Radfahrer, offenbar in Eile, trat kräftiger in die Pedale. Mr. Tompkins konnte nicht bemerken, dass er dadurch wesentlich schneller, wohl aber, dass er infolge seiner Bemühungen merklich flacher wurde. Wie er so die Straße herabkam, sah er aus wie ein aus einem Stück Pappe geschnittenes Bild. Mr. Tompkins war sehr stolz auf sich, denn er begriff, was mit dem Radfahrer geschah: Es handelte sich einfach um die Kontraktion

bewegter Körper, von der er eben gehört hatte.

Unglaublich verkürzt

"Offenbar ist die naturgegebene Geschwindigkeitsbegrenzung hier niedriger," schloss er, "und das ist sicherlich auch der Grund dafür, dass der Wachmann an der Ecke dort so faul dreinschaut, er braucht sich ja um keine Schnellfahrer zu kümmern." Und in der Tat: Ein Taxi, das soeben mit ohrenbetäubendem Lärm die Straße entlang fuhr, kam kaum schneller voran als der Radfahrer; es kroch förmlich dahin. Mr. Tompkins entschloss sich, dem Radfahrer, der ein gutmütiger Bursche zu sein schien, nachzufahren und ihn über alles zu befragen. Er vergewisserte sich, dass der Polizist gerade nach der anderen Richtung sah, lieh sich ein am Gehsteigrand abgestelltes Fahrrad aus und jagte die Straße hinunter. Nun würde er wohl sofort verflachen, dachte er, und war darüber eigentlich recht froh, denn seine in letzter Zeit etwas zu sehr in die Breite geratene Figur hatte ihm schon Kummer gemacht. Zu seiner großen Überraschung veränderte er sich jedoch genauso wenig wie sein Fahrrad. Was sich jedoch völlig geändert hatte, war das Bild, das ihm seine Umgebung nun bot. Die Straßen waren kürzer geworden, die Auslagen der Geschäfte glichen schmalen Schlitzen, und der Polizist an der Ecke schien der dünnste Mann zu sein, den er in seinem Leben je gesehen hatte.

Die Häuserblöcke wurden immer kürzer.

"Mein Gott!", rief Mr. Tompkins aufgeregt. "jetzt verstehe ich, was dahinter steckt! Deshalb verwendet man also dieses Wort Relativität: Alles, was sich relativ zu mir bewegt, erscheint mir verkürzt; es ist dabei völlig gleichgültig, wer jeweils in die Pedale tritt." Er war ein guter Radfahrer und tat sein Bestes, den jungen Mann einzuholen. Doch merkte er, dass es gar nicht so einfach war, das Fahrrad zu beschleunigen, Obwohl er alles daransetzte, war der Geschwindigkeitszuwachs verschwindend klein. Seine Beine schmerzten bereits, dennoch schaffte er es nicht, an einer Straßenlaterne schneller vorbeizufahren als zu Beginn seiner

Fahrt. Es schien, als wären alle seine Anstrengungen, schneller zu werden, vergeblich. Nun verstand er recht gut, warum auch der Radfahrer und das Taxi nicht schneller vorangekommen waren, und er erinnerte sich an die Worte des Professors, wonach es unmöglich sei, die Grenzgeschwindigkeit des Lichts zu überschreiten. Er bemerkte, wie sich die Häuserblocks noch weiter verkürzten, und der Radfahrer vor ihm schien nun nicht mehr so weit entfernt zu sein wie vorher. Bei der zweiten Straßenkreuzung holte er ihn schließlich ein. Als sie Seite an Seite nebeneinander dahinfuhren, stellte er mit Überraschung fest, dass sein Kollege ein ganz normaler, sportlich aussehender junger Mann war. "Aha, das muss daher kommen, dass wir uns nicht relativ zueinander bewegen" schloss er und sprach den jungen Mann an.
"Entschuldigen Sie bitte, mein Herr! Finden Sie es nicht unpraktisch, in einer Stadt zu leben, in der die erlaubte Höchstgeschwindigkeit so niedrig liegt?"
"Höchstgeschwindigkeit?" erwiderte der Angesprochene erstaunt. "Hier gibt es keine Höchstgeschwindigkeit. Ich kann überall hinfahren, so schnell ich nur will - oder doch zumindest wie ich könnte, wenn ich statt dieses nichtsnutzigen Drahtesels hier ein ordentliches Motorrad hätte!"
"Aber Sie sind doch soeben noch sehr langsam an mir vorübergefahren, ich habe es genau gesehen."
"So so!" meinte der junge Mann offensichtlich beleidigt. "Sie haben' wohl nicht bemerkt, dass wir, seit Sie mich angesprochen haben, schon fünf Häuserblocks passiert haben. Ist Ihnen das nicht schnell genug?"
"Das war doch nur deshalb so, weil die Straßen kürzer wurden", wehrte sich Mr. Tompkins.
"Na und? Ist es nicht egal, ob wir schneller fahren oder ob die Straßen kürzer werden? -Ich habe bis zum Postamt zehn Blocks zu fahren; wenn ich kräftig genug in die Pedale trete, so werden diese Blocks eben kürzer und ich komme rascher an. Sehen Sie, da sind wir schon", sagte der junge Mann und stieg vom Rad.
Mr. Tompkins sah auf die Uhr des Postamts: sie zeigte halb sechs. "Na also!", rief er triumphierend. "Sie haben für diese zehn Blocks eine halbe Stunde gebraucht, denn als ich Sie zum ersten Mal sah, war es genau fünf Uhr!"

„Und haben Sie bemerkt, wie schnell diese halbe Stunde verging?", fragte sein Gefährte. Mr. Tompkins musste zugeben, dass ihm dieser Zeitraum wirklich nur wie ein paar Minuten erschienen war. Überdies entdeckte er, dass seine Uhr fünf nach fünf zeigte. "Nanu, geht die Uhr des Postamts vor?" fragte er. "Natürlich - es sei denn, Ihre Uhr geht nach, weil Sie eben zu schnell unterwegs waren. Was ist denn los mit Ihnen, kommen Sie vom Mond?" Und der junge Mann wandte sich ab und betrat das Postamt.
Mr. Tompkins merkte jetzt, wie sehr ihm der alte Professor fehlte~ er hätte ihm all die seltsamen Vorkommnisse sicherlich erklären können. Der junge Mann war offenbar ein Ortsansässiger und seit frühester Jugend an derlei Dinge gewöhnt. Mr. Tompkins sah sich also gezwungen, diese sonderbare Welt auf eigene Faust zu erkunden. Er stellte seine Uhr nach der Uhr des Postamts und wartete zehn Minuten, um sich so zu vergewissern, dass sie richtig ging. Tatsächlich stimmten die beiden Uhren überein. Nun setzte er seine Fahrt die Straße hinab fort. Beim Bahnhof beschloss er, die Zeit neuerlich zu vergleichen. Überraschenderweise ging seine Uhr schon wieder ein gutes Stück nach. "Das ist also auch ein relativistischer Effekt", schloss Mr. Tompkins; und er fasste den Entschluss, jemanden,

der intelligenter war als der junge Radfahrer, in dieser Sache zu befragen.
Die Gelegenheit ergab sich bald. Ein Herr, offensichtlich in den Vierzigern, stieg aus dem Zug und ging auf den Ausgang zu. Eine sehr alte Dame erwartete ihn und sprach ihn zu Mr.Tompkins' größtem Erstaunen mit "mein lieber Opa" an. Das war nun zuviel für Mr. Tompkins. Unter dem Vorwand, beim Tragen des Gepäcks behilflich sein zu wollen, begann er ein Gespräch.
"Entschuldigen Sie, wenn ich mich hier in Ihre Familienangelegenheiten einmische," sagte er, "aber sind Sie wirklich der Großvater dieser reizenden alten Dame? Sie müssen wissen, ich bin hier fremd, und ich habe noch nie..." "Ach, ich verstehe", antwortete der Angesprochene lächelnd. "Sie halten mich wohl für Ahasverus oder etwas ähnliches. Aber die Sache ist in Wirklichkeit sehr einfach. Meine Geschäfte bringen es mit sich, dass ich viel reise; und da ich die meiste Zeit meines Lebens im Zug verbringe, werde ich natürlich langsamer alt als meine Verwandten, die hier in der Stadt leben. Ich freue mich so sehr, noch rechtzeitig zurückgekommen zu sein und so meine liebe Enkelin noch am Leben zu finden! Aber entschuldigen Sie mich jetzt bitte, ich muss ihr ins Taxi helfen." Und er eilte davon und ließ Mr. Tompkins mit seinen Problemen abermals allein. Ein paar Sandwiches aus dem Bahnhofsbuffet belebten diesen wieder etwas und bald war er soweit zu glauben, er habe im berühmten Prinzip der Relativität einen Widerspruch entdeckt.
„Es ist doch klar," dachte er, während er genüsslich an seinem Kaffee nippte, "wäre alles relativ, dann müsste der Reisende seinen Verwandten als Greis erscheinen; umgekehrt würden auch sie ihm sehr alt vorkommen, obwohl alle Beteiligten in Wirklichkeit ziemlich jung sein könnten. Aber was ich hier sage, ist doch ausgemachter Unsinn: man kann doch nicht eine bloß relative Glatze haben! " So entschloss er sich, noch einen letzten Versuch zu unternehmen, um herauszufinden, wie die Dinge wirklich liegen, und wandte sich an einen allein im Buffet sitzenden Mann in Eisenbahneruniform.
"Würden Sie so liebenswürdig sein, mein Herr", begann er zögernd, "und die Güte haben, mir zu sagen, wer dafür verantwortlich ist, dass die Fahrgäste im Zug soviel langsamer altern, als die Menschen, die sich immer am selben Ort aufhalten?" "Ich bin dafür verantwortlich", sagte der Mann schlicht. "Sie!" rief Mr. Tompkins. "So haben Sie also den Stein der Weisen gefunden. Sie müssen in medizinischen Kreisen ein sehr berühmter Mann sein. Haben Sie an der hiesigen Universität vielleicht gar einen Lehrstuhl inne? "
"Nein", antwortete der Mann verdutzt, "ich bin nur ein einfacher Bremser bei der Eisenbahn."
"Bremser! Haben Sie Bremser gesagt?..." rief Mr. Tompkins und glaubte, seinen Ohren nicht trauen zu können. "Sie meinen, Sie ziehen einfach die Bremsen, sobald der Zug in die Station einfährt?"
"Genau das mache ich. Und jedes Mal, wenn der Zug seine Fahrt verlangsamt, altern die Fahrgäste des Zuges im Vergleich zu den übrigen Menschen langsamer. Natürlich hat", fügte er bescheiden hinzu, "auch der Lokomotivführer, der den Zug beschleunigt, seinen Anteil an dem Unternehmen."
"Aber was hat denn das damit zu tun, dass die Leute jung bleiben?" fragte Mr. Tompkins völlig perplex.
"So genau weiß ich das auch nicht," erwiderte der Bremser, "aber es ist nun einmal so. Ich fragte einmal einen Universitätsprofessor, der zufällig in meinem Zug fuhr. Doch er begann, mir einen langen, unverständlichen Vortrag, zu halten und erwähnte schließlich, wenn ich

richtig gehört habe, etwas von einer Gravitationsrotverschiebung' bei der Sonne. Haben Sie schon jemals von Rotverschiebungen oder ähnlichem gehört?"
"Nein", sagte Mr. Tompkins etwas zögernd, und der Bremser entfernte sich daraufhin kopfschüttelnd. Plötzlich spürte Mr. Tompkins eine schwere Hand auf der Schulter - und er fand sich nicht im Bahnhofsbuffet, sondern auf einer Bank des Hörsaals wieder, wo er dem Vortrag des Professors gelauscht hatte. Der Saal war nur noch schwach beleuchtet und nahezu leer. Der Portier, der ihn geweckt hatte, meinte:

„Wir schließen jetzt, mein Herr. Wenn Sie schlafen wollen, gehen Sie besser nach Hause." Verwirrt stand Mr. Tompkins auf und ging mit etwas unsicheren Schritten auf den Ausgang zu.

2 Der Vortrag des Professors über Relativität, der Mr. Tompkins zum Träumen brachte.

Meine Damen und Herrn:
Schon in einem sehr frühen Stadium der Entwicklung machte sich der Mensch bestimmte Vorstellungen von Raum und Zeit. Sie stellen den Rahmen dar, innerhalb dessen die verschiedenen Ereignisse vor sich gehen. Diese Vorstellungen sind ohne wesentliche Änderungen von Generation zu Generation weitergegeben worden und haben mit der Entwicklung der exakten Naturwissenschaft Eingang in die Grundlagen der mathematischen Beschreibung des Universums gefunden. Der große Newton selbst gab uns wohl die erste klare Formulierung dieser klassischen Vorstellung von Raum und Zeit, als er in seinen Prin cipia schrieb:

"Der absolute Raum bleibt vermöge seiner Natur und ohne Beziehung zu irgendetwas außerhalb seiner stets gleich und unbeweglich;" und "Die absolute, wabre und mathematische Zeit verfließt aus sich selbst heraus und vermöge ihrer Natur gleichförmig und ohne Beziehung auf irgendetwas außerhalb ihrer selbst."

So stark war der Glaube an die absolute Richtigkeit dieser klassischen Idee über Raum und Zeit, dass sie von Philosophen oft als "a priori" vorgegeben angenommen wurden und kein Wissenschaftler auch nur die Möglichkeit in Erwägung zog, daran zu zweifeln.

Wie dem auch sei - gerade zu Beginn unseres Jahrhunderts zeigte sich, dass eine Reihe von Ergebnissen, die man mit Hilfe der inzwischen sehr verfeinerten Methoden der Experimentalphysik erzielt hatte, zu deutlichen Widersprüchen führten, wenn sie im Rahmen der klassischen Vorstellungen von Raum und Zeit interpretiert wurden. Dies brachte einen der größten Physiker der Gegenwart, Albert Einstein, auf den revolutionären Gedanken, dass es - von den traditionellen abgesehen - kaum Gründe gebe, die klassischen Vorstellungen von Raum und Zeit für absolut richtig zu halten; sondern dass man sie ändern könne und solle, um sie mit unseren neuen und
präziseren experimentellen Ergebnissen und Erfahrungen in Übereinstimmung zu bringen. Da die klassischen Vorstellungen von Raum und Zeit aus den Erfahrungen des täglichen

Lebens hervorgegangen waren, kann es uns nicht überraschen, dass sich aus unseren heutigen, weit raffinierteren Beobachtungsmethoden, die aufgrund einer hochentwickelten Experimentiertechnik zur Verfügung stehen, ergibt, dass diese alten Vorstellungen zu grob und ungenau sind. Im täglichen Leben und in den früheren Entwicklungsstadien der Physik konnten sie sich deshalb so lange halten, weil ihre Abweichungen von den richtigen Vorstellungen hinreichend klein waren. Es braucht uns jedenfalls nicht zu wundem, dass uns die Ausweitung des modernen physikalischen Forschungsfeldes auf Gebiete geführt hat, in denen die Abweichungen derart groß sind, dass die klassischen Ideen nicht mehr genügen können.

Das wichtigste experimentelle Resultat, das zu einer fundamentalen Kritik unserer klassischen Vorstellungen führte, war die Entdeckung, dass die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum die oberste Grenze für alle möglichen physikalischen Geschwindigkeiten ist. Diese wichtige und völlig unerwartete Schlussfolgerung ergab sich in erster Linie aus den Experimenten des amerikanischen Physikers Micbelson, der gegen Ende des vorigen Jahrhunderts die Auswirkung der Erdbewegung auf die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichts zu beobachten versuchte. Zu seiner großen Überraschung und jener der gesamten wissenschaftlichen Welt stellte er fest, dass solche Auswirkungen nicht bestehen und dass die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum stets gleich groß ist, und zwar unabhängig von dem System, in dem die Messung erfolgt, und von der Bewegung der Lichtquelle selbst. Ich brauche wohl nicht besonders darauf hinzuweisen, wie ungewöhnlich ein solches Ergebnis ist, zumal es doch unseren fundamentalsten Vorstellungen von Bewegung widerspricht. Wenn sich etwas schnell durch den Raum bewegt und Sie bewegen sich darauf zu, dann wird der Körper mit einer größeren Relativgeschwindigkeit, die sich aus der Summe der Geschwindigkeiten von Objekt und Beobachter ergibt, auf Sie aufprallen. Wenn Sie dagegen davonlaufen, wird er Sie mit geringerer Geschwindigkeit von hinten treffen, da die Relativgeschwindigkeit hier gleich der Differenz der beiden Geschwindigkeiten ist.
Auch wenn Sie selbst sich bewegen, z. B. in einem Auto, und dabei einen Ton, der sich durch die Luft fortpflanzt, untersuchen, wird die Geschwindigkeit des Tones, vom Auto aus gemessen, um Ihre Fahrtgeschwindigkeit vergrößert, wenn Sie dem Ton entgegenfahren, oder entsprechend verkleinert, wenn Sie von ihm überholt werden. Wir nennen das das Additionstheorem der Geschwindigkeiten; man hat es lange für selbstverständlich gehalten. Besonders sorgfältig ausgeführte Experimente haben jedoch bewiesen, dass dieses Theorem für das Licht nicht gilt: die Geschwindigkeit des Lichts im Vakuum bleibt unabhängig davon, wie schnell sich der Beobachter bewegt - stets dieselbe, nämlich 300 000 km/s. (Wir bezeichnen sie gewöhnlich mit dem Buchstaben c). "Aber kann man denn nicht Überlichtgeschwindigkeit' erzielen, wenn man einige kleinere, physikalisch realisierbare Geschwindigkeiten addiert?" werden Sie jetzt einwenden. Stellen wir uns beispielsweise einen sehr schnellen, etwa mit Dreiviertel der Lichtgeschwindigkeit fahrenden Zug vor und einen Tramper, der auf den Dächern der Waggons gleichfalls mit Dreiviertel der Lichtgeschwindigkeit dahinläuft. Entsprechend dem Additionstheorem müsste dann die Gesamtgeschwindigkeit das Eineinhalbfache der Lichtgeschwindigkeit betragen und der laufende Tramper müsste den Lichtstrahl einer Signallampe überholen können. Da die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit aber einwandfrei experimentell erwiesen ist, muss die resultierende Geschwindigkeit in unserem Fall tatsächlich kleiner sein, als wir es erwarten,

denn sie kann ja den kritischen Wert c nicht überschreiten. Somit kommen wir zu dem Schluss, dass das klassische Additionstheorem auch für den Fall geringerer Geschwindigkeiten falsch sein muss.
Die mathematische Behandlung des Problems, auf die ich hier nicht eingehen möchte, führt zu einer sehr einfachen Formel für die Berechnung der durch Überlagerung zweier Geschwindigkeiten entstehenden Gesamtgeschwindigkeit.

Wenn vl und V2 die beiden zu addierenden Geschwindigkeiten sind, so ergibt sich die resultierende Geschwindigkeit aus:

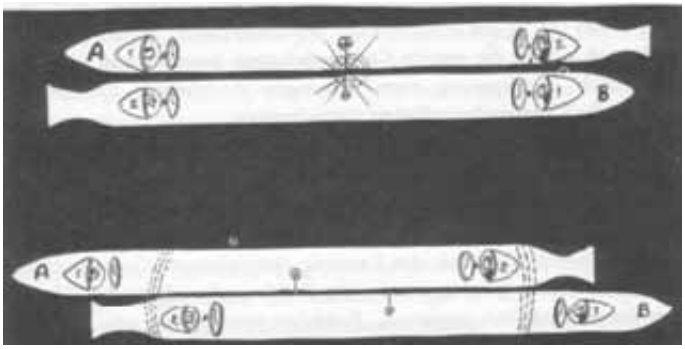
$$V = \frac{v1 \pm v2}{1 \pm \frac{v1 * v2}{c^2}}$$

Aus dieser Formel ersieht man, dass man, wenn die beiden ursprünglichen Geschwindigkeiten im Verhältnis zur Lichtgeschwindigkeit klein sind, den zweiten Ausdruck im Nenner der Formel im Vergleich zu 1 vernachlässigen kann und dass Formel dann in das klassische Additionstheorem für Geschwindigkeiten übergeht. Sind jedoch vl und v2 nicht klein, wird das Resultat stets etwas kleiner als die arithmetische Summe sein. In unserem Beispiel eines den fahrenden Zug entlanglaufenden Trampers ist vl=$\frac{3c}{4}$ und v2=$\frac{3c}{4}$; daher beträgt die resultierende Gesamtgeschwindigkeit V gemäß der obiger Formel $\frac{24c}{25}$, also einen Wert, der noch immer unter jenem der Lichtgeschwindigkeit liegt.
Ist im besonderen eine der ursprünglichen Geschwindigkeiten c, ergibt die Formel für die resultierende Geschwindigkeit wieder den Wert c, wie groß auch immer die zweite Geschwindigkeit gewesen sein mag. Man kann also durch Überlagerung einer beliebigen Anzahl von Geschwindigkeiten niemals die Lichtgeschwindigkeit überschreiten.
Es wird Sie vielleicht auch interessieren zu erfahren, dass die obige Formel experimentell bestätigt wurde und die Resultierende zweier Geschwindigkeiten tatsächlich immer etwas kleiner als deren arithmetische Summe ist.
Nachdem wir somit die Existenz einer obersten Grenzgeschwindigkeit anerkannt haben, können wir mit der Kritik an den klassischen Vorstellungen von Raum und Zeit beginnen. Zunächst wenden wir uns dem Begriff der Gleichzeitigkeit zu, der auf jenen Vorstellungen basiert.

Wenn man sagt. "Die Bergwerksexplosion in der Nähe von Kapstadt ereignete sich genau im selben Augenblick, als Ihnen in Ihrem Londoner Appartement Speck mit Ei serviert wurde", so glaubt man zu wissen, was das heißt. Ich werde Ihnen jedoch beweisen, dass Sie es nicht wissen und dass diese Aussage genaugenommen keinen Sinn hat. Welcher Methode würden Sie sich bedienen, um festzustellen, ob zwei Ereignisse an zwei verschiedenen Orten wirklich gleichzeitig stattfinden? Sie werden wahrscheinlich sagen, dass doch die Uhren an beiden Orten die gleiche Zeit anzeigen; dann erhebt sich allerdings die Frage, wie man die beiden an verschiedenen Orten befindlichen Uhren so stellen soll, dass sie gleichzeitig dieselbe Zeit anzeigen - womit wir wieder bei unserer ursprünglichen Frage angelangt sind.

Dass die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum von der Bewegung der Lichtquelle und der Bewegung des Systems, in dem die Messung erfolgt, unabhängig ist, ist eine der am exaktesten nachgewiesenen experimentellen Tatsachen. Die folgende Methode, Entfernungen zu messen und Uhren an verschiedenen Beobachtungspunkten genau in Übereinstimmung zu bringen, muss daher als die zweckmäßigste und - wie Sie bei eingehenderem Nachdenken hierüber zugeben werden - vernünftigste angesehen werden.

Vom Punkt A wird ein Lichtsignal ausgesendet und, sowie es im Punkt B registriert ist, nach A zurückgesendet. Die Entfernung zwischen A und B ist dann definiert durch die halbe, in Punkt A abgelesene Zeit zwischen Aussendung und Rückkehr des Lichtsignals, multipliziert mit der konstanten Lichtgeschwindigkeit.
Die beiden Uhren in den Punkten A und B gelten als richtig eingestellt, wenn die im Punkt B befindliche Uhr im Augenblick des Eintreffens des Lichtsignals das Mittel der beiden Zeitangaben anzeigt, die im Punkt A zwischen Aussendung und Rückkehr des Signals abgelesen wurden. Zwei lange Raketen bewegen sich in entgegengesetzte Richtungen.



Zwei lange Raketen bewegen sich in entgegengesetzte Richtungen

Benutzt man diese Methode zwischen verschiedenen, auf einem festen Körper errichteten Beobachtungsstationen, dann erhält man das gewünschte Bezugssystem und kann Fragen nach der Gleichzeitigkeit oder dem Zeitunterschied von Ereignissen, die an verschiedenen Orten stattfinden, lösen.
Werden aber diese Resultate auch von Beobachtern in anderen Systemen anerkannt werden? Um diese Frage zu beantworten, wollen wir annehmen, dass man auf zwei verschiedenen festen Körpern Bezugssysteme obiger Art errichtet habe; zum Beispiel auf zwei langen Raketen, die sich mit konstanter Geschwindigkeit in entgegengesetzte Richtungen bewegen. Wir wollen nun untersuchen, ob diese beiden Systeme zu übereinstimmenden Ergebnissen kommen. Nehmen wir an, an den Vorder- und Rückseiten jeder Rakete seien zwei Beobachter postiert und sie wollen zunächst einmal ihre Uhren richtig einstellen. jedes Beobachterpaar kann auf seiner Rakete die oben erwähnte Methode in entsprechender Weise anwenden, indem es von der mit Hilfe eines Messstabes gefundenen Raketenmitte aus ein Lichtsignal aussendet und die Uhren auf Null Uhr stellt, sobald das Signal am jeweiligen Ende anlangt. Auf diese Weise hat jedes Beobachterpaar das Kriterium der Gleichzeitigkeit im Sinne der oben gegebenen Definition in seinem System erfüllt und damit seine Uhren - vom eigenen Standpunkt aus gesehen - richtig gestellt.

Nun wollen die Beobachter feststellen, ob die Zeitablesungen auf den beiden Raketen übereinstimmen. Zeigen beispielsweise die Uhren zweier Beobachter verschiedener Raketen die gleiche Zeit, wenn sich die beiden

Raketen aneinander vorbeibewegen? Dies lässt sich mit Hilfe der folgenden .Methode überprüfen: In der geometrischen Mitte jeder Rakete werden zwei elektrisch geladene Leiter so angebracht, dass ein Funke zwischen ihnen überspringt, wenn sie einander passieren, wobei gleichzeitig Lichtsignale von der Mitte jeder Rakete zu deren vorderen und hinteren Ende ausgehen. Während sich die Lichtsignale nun mit endlicher
Ausbreitungsgeschwindigkeit den Beobachtern nähern, haben die Raketen ihre relative Lage zueinander verändert und die Beobachter 2 A und 2 B werden der Lichtquelle näher sein als die Beobachter 1 A und 1 B.
Offensichtlich wird der Beobachter 1 B, sobald das Lichtsignal den Beobachter 2 A erreicht, weiter rückwärts sein, so dass das Signal etwas mehr Zeit benötigt, um ihn zu erreichen. Wenn also die Uhr von 1 B so eingestellt wurde, dass sie bei Eintreffen des Signals Null Uhr zeigt, wird der Beobachter 2 A behaupten, sie gehe nach.
In der gleichen Weise wird der Beobachter 1 A zu dem Schluss kommen, dass die Uhr von 2 B, der das Signal vor ihm feststellte, vorgehe. Da ihre eigenen Uhren gemäß ihrer Definition der Gleichzeitigkeit richtig eingestellt wurden, werden die Beobachter auf Rakete A darin einig sein, dass die Uhren der beiden Beobachter der Rakete B nicht übereinstimmen. Wir sollten jedoch nicht vergessen, dass die Beobachter auf Rakete B aus genau denselben Gründen ihre eigenen Uhren als richtig eingestellt ansehen und daher behaupten werden, dass die Uhren auf der Rakete A nicht übereinstimmen.
Da beide Raketen völlig gleichwertig sind, kann diese Streitfrage zwischen den beiden Beobachtergruppen nur so geschlichtet werden, dass man sagt, beide Gruppen haben von ihrem Standpunkt aus recht, die Frage jedoch, wer nun absolut' im Recht sei, ist physikalisch sinnlos.
ich fürchte, ich habe Sie mit diesen detaillierten Ausführungen gelangweilt. Wenn Sie jedoch alles sorgfältig nachprüfen,
wird Ihnen gewiss einleuchten, dass auf der methodischen Basis unserer Raum-Zeit-Messung der Begriff absoluter Gleichzeitigkeit unhaltbar ist. Es werden also zwei an verschiedenen Orten stattfindende Ereignisse, die in einem Bezugssystem als gleichzeitig gelten, um ein bestimmtes Zeitintervall voneinander abweichen, wenn man sie vom Standpunkt eines anderen Systems betrachtet.
Diese Behauptung klingt zunächst äußerst ungewöhnlich. Ist es aber auch ungewöhnlich, wenn ich sage: Wenn Sie Ihr Abendessen im Speisewagen eines fahrenden Zuges einnehmen, dann essen Sie zwar Suppe und Nachspeise an demselben Punkt des Speisewagens, aber an weit auseinanderliegenden Punkten der Bahnstrecke? Diese Aussage über Ihr Abendessen im Zug kann auch so formuliert werden: Zwei Ereignisse, die sich zu verschiedenen
Zeiten an ein- und demselben Punkt eines Bezugssystems abspielen, sind vom Standpunkt eines anderen Bezugssystems aus betrachtet durch ein bestimmtes Raumintervall voneinander unterschieden.
Wenn wir diese "triviale" Feststellung mit der vorhergehenden "paradoxen" vergleichen, sehen wir, dass sie beide absolut symmetrisch sind und durch den Austausch der Worte "Zeit" und "Raum" problemlos ineinander umgewandelt werden können.
Hier liegt der zentrale Punkt von Einsteins Theorie- In der klassischen Physik betrachtet man die Zeit als von Raum und Bewegung unabhängig, "gleichförmig dahinfließend ohne Beziehung auf irgendetwas außerhalb ihrer selbst" (Newton); in der modernen Physik

dagegen sind Raum und Zeit eng miteinander verknüpft und stellen nur zwei verschiedene Schnitte durch ein einziges homogenes "Raum-Zeit-Kontinuum" dar, in dem alle beobachtbaren Ereignisse stattfinden. Die Aufspaltung dieses vierdimensionalen Kontinuums in den dreidimensionalen Raum und die eindimensionale Zeit ist rein willkürlich und hängt von dem System ab, von dem aus die Beobachtungen angestellt werden.
Zwei Ereignisse, die in dem einen Bezugssystem räumlich durch den Abstand 1 und zeitlich durch das Intervall t voneinander getrennt sind, werden von einem anderen System aus gesehen durch einen anderen räumlichen Abstand l' und ein anderes Zeitintervall t' unterschieden sein, so dass man also in gewisser Weise von einer Umwandlung oder Transformation von Raum in Zeit und umgekehrt sprechen kann. Es ist auch nicht schwer einzusehen, weshalb die Transformation von Zeit in Raum - denken wir an das Beispiel des Abendessens im fahrenden Zug - uns ganz alltäglich erscheint, warum uns jedoch die Transformation von Raum in Zeit, die aus der Relativität der Gleichzeitigkeit folgt, höchst ungewöhnlich vorkommt. Verwenden wir zur Entfernungsmessung zum Beispiel als Einheit "Zentimeter", dann ist die dazugehörige Zeiteinheit nicht die übliche "Sekunde", sondern eine "rationale Zeiteinheit". Diese ist gleich der Zeitspanne, die ein Lichtsignal benötigt, um die Entfernung von einem Zentimeter zurückzulegen; das sind 0,000 000 000 0 3 Sekunden.
Die Transformation von Raum- in Zeitintervalle führt also auf dem Gebiet unserer alltäglichen Erfahrung zu in der Praxis nicht beobachtbaren Resultaten - ein Umstand, der die klassische Ansicht zu stützen scheint, dass Zeit etwas absolut Unabhängiges und Unveränderliches ist.
Untersucht man jedoch Bewegungen mit sehr hohen Geschwindigkeiten, zum Beispiel die Bewegung von aus radioaktiven Stoffen emittierten Elektronen oder die Bewegung der Elektronen innerhalb eines Atoms, wo die in bestimmten Zeitintervallen zurückgelegten Strecken von derselben Größenordnung sind wie die in rationalen Einheiten ausgedrückte Zeit, dann stößt man unweigerlich auf die beiden zuvor erörterten Effekte, und die Relativitätstheorie wird überaus wichtig. Selbst im Bereich verhältnismäßig geringer Geschwindigkeiten, wie zum Beispiel der Bewegung der Planeten in unserem Sonnensystem, kann man auf Grund der außerordentlichen Genauigkeit astronomischer Messungen relativistische Effekte feststellen. Die Beobachtung solcher relativistischer Effekte verlangt allerdings, dass Abweichungen der Planetenbewegung gemessen werden, die nur einen Bruchteil einer Winkelsekunde pro Jahr betragen.
Wie ich Ihnen zu erklären versucht habe, folgt aus der Kritik der Vorstellungen von Raum und Zeit, dass Raumintervalle teilweise in Zeitintervalle umgeformt werden können und umgekehrt; das bedeutet, dass der numerische Wert einer bestimmten Entfernung oder einer Zeitperiode, von verschiedenen bewegten Systemen aus gemessen, verschieden sein wird.
Eine verhältnismäßig einfache mathematische Analyse dieses Problems, auf die ich in dieser Vortragsreihe jedoch nicht eingehen möchte, ergibt eine bestimmte Formel für die Veränderung dieser Werte. Es zeigt sich, dass ein beliebiges Objekt der Länge 1, das sich relativ zum Beobachter mit einer Geschwindigkeit v bewegt, um einen Betrag verkürzt wird, der von der Geschwindigkeit des Objekts abhängt; seine Länge wird zu

$$l' = l * \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Analog dazu wird ein beliebiger, die Zeit t beanspruchender Vorgang von einem sich dazu relativ bewegenden System aus gesehen eine längere Zeit t benötigen, die gegeben ist durch.

$$t' = \frac{t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Wir haben hier die berühmte "Längenkontraktion" und "Zeitdillatation" der Relativitätstheorie vor uns.

Wenn, wie es gewöhnlich der Fall ist, v viel kleiner ist als c, sind die Effekte sehr gering; bei genügend großen Geschwindigkeiten können die von einem bewegten System aus gemessenen Längen jedoch nach Belieben verkürzt und die Zeitintervalle beliebig verlängert werden.

Sie dürfen dabei jedoch nicht vergessen, dass beide Effekte absolut symmetrisch sind. Während sich also die Reisenden eines schnell fahrenden Zuges wundern werden, weshalb die Leute im ruhenden Zug so mager sind und sich so langsam bewegen, werden die Fahrgäste des ruhenden Zuges ein gleiches von den Passagieren des fahrenden Zuges denken.

Eine weitere wichtige Konsequenz aus der Existenz einer nicht überschreitbaren Geschwindigkeitsgrenze betrifft die Masse bewegter Körper. Den allgemeinen Grundlagen der Mechanik entsprechend ist die Masse eines Körpers durch den Widerstand gegeben, den der Körper einer beginnenden Bewegung beziehungsweise der Beschleunigung einer schon bestehenden Bewegung entgegensetzt. Je größer die Masse des Körpers ist, umso schwerer wird es sein, seine Geschwindigkeit um einen gegebenen Betrag zu erhöhen.

Die Tatsache, dass ein Körper unter keinerlei Umständen die Lichtgeschwindigkeit überschreiten kann, führt uns unmittelbar zu dem Schluss, dass sein Widerstand gegen eine weitere Beschleunigung, oder, mit anderen Worten, seine Masse, unendlich groß werden muss, wenn seine Geschwindigkeit sich der Lichtgeschwindigkeit nähert. Die mathematische Analyse führt zu einer Formel für diese Abhängigkeit, die den Formeln (2) und (3) analog ist. Stellt mo die Masse des Körpers bei sehr geringen Geschwindigkeiten dar, so ist bei der Geschwindigkeit v seine Masse m gegeben durch:

$$m = \frac{m0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

und der Widerstand gegen eine weitere Beschleunigung wird unendlich groß, wenn v sich der Lichtgeschwindigkeit c nähert. Experimentell lässt sich die relativistische Veränderung der Masse leicht an sehr schnell bewegten Teilchen beobachten. So ist zum Beispiel die Masse von aus radioaktiven Substanzen emittierten Elektronen (deren Geschwindigkeit bei 99 % der Lichtgeschwindigkeit liegt) mehrere Male größer als im Ruhezustand und die Massen der Elektronen der sogenannten kosmischen Strahlung (die sich oft mit 99,98 % der Lichtgeschwindigkeit bewegen) sind tausendmal größer. Für diese Geschwindigkeiten ist die klassische Mechanik absolut unbrauchbar; wir betreten rein relativistische Bereiche.

Was der Professor noch nicht wusste

Physikalische Effekte haben manchmal ein sonderbares Schicksal. Die "verhältnismäßig einfache mathematische Analyse", aus der die Verkürzung bewegter Körper folgt, hatte Albert Einstein im Jahre 1905 durchgeführt. Zusammen mit den anderen grundlegenden Ergebnissen seiner Theorie wurde sie allmählich Allgemeingut und ging sogar in Mr. Tompkins Träume ein. Fünfzig Jahre lang träumte die physikalische Welt mit, und erst 1959

erwachten Roger Penrose in England und James Terrell in den USA aus diesen relativistischen Träumereien.1 Mr. Tompkins würde seinen Augen nicht trauen, und doch ist es wahr: Er könnte die Verkürzung bewegter Körper niemals beobachten. Sein Traum würde ihn in eine völlig andere Welt führen, in eine Welt, in der sich Radfahrer nicht verkürzen, sondern verdrehen. Auf seiner relativistischen Fahrt wird sich unser imaginärer Radfahrer nämlich drehen und

wird Ihnen gewiss einleuchten, dass auf der methodischen Basis unserer Raum-Zeit-Messung der Begriff absoluter Gleichzeitigkeit unhaltbar ist. Es werden also zwei an verschiedenen Orten stattfindende Ereignisse, die in einem Bezugssystem als gleichzeitig gelten, um ein bestimmtes Zeitintervall voneinander abweichen, wenn man sie vom Standpunkt eines anderen Systems betrachtet.

Diese Behauptung klingt zunächst äußerst ungewöhnlich. Ist es aber auch ungewöhnlich, wenn ich sage: Wenn Sie Ihr Abendessen im Speisewagen eines fahrenden Zuges einnehmen, dann essen Sie zwar Suppe und Nachspeise an demselben Punkt des Speisewagens, aber an weit auseinanderliegenden Punkten der Bahnstrecke? Diese Aussage über Ihr Abendessen im Zug kann auch so formuliert werden: Zwei Ereignisse, die sich zu verschiedenen

Zeiten an ein- und demselben Punkt eines Bezugssystems abspielen, sind vom Standpunkt eines anderen Bezugssystems aus betrachtet durch ein bestimmtes Raumintervall voneinander unterschieden.

Wenn wir diese "triviale" Feststellung mit der vorhergehenden "paradoxen" vergleichen, sehen wir, dass sie beide absolut symmetrisch sind und durch den Austausch der Worte "Zeit" und "Raum" problemlos ineinander umgewandelt werden können.

Hier liegt der zentrale Punkt von Einsteins Theorie- In der klassischen Physik betrachtet man die Zeit als von Raum und Bewegung unabhängig, "gleichförmig dahinfließend ohne Beziehung auf irgendetwas außerhalb ihrer selbst" (Newton); in der modernen Physik dagegen sind Raum und Zeit eng miteinander verknüpft und stellen nur zwei verschiedene Schnitte durch ein einziges homogenes "Raum-Zeit-Kontinuum" dar, in dem alle beobachtbaren Ereignisse stattfinden. Die Aufspaltung dieses vierdimensionalen Kontinuums in den dreidimensionalen Raum und die eindimensionale Zeit ist rein willkürlich und hängt von dem System ab, von dem aus die Beobachtungen angestellt werden.

Zwei Ereignisse, die in dem einen Bezugssystem räumlich durch den Abstand 1 und zeitlich durch das Intervall t voneinander getrennt sind, werden von einem anderen System aus gesehen durch einen anderen räumlichen Abstand l' und ein anderes Zeitintervall t' unterschieden sein, so dass man also in gewisser Weise von einer Umwandlung oder Transformation von Raum in Zeit und umgekehrt sprechen kann. Es ist auch nicht schwer einzusehen, weshalb die Transformation von Zeit in Raum - denken wir an das Beispiel des Abendessens im fahrenden Zug - uns ganz alltäglich erscheint, warum uns jedoch die Transformation von Raum in Zeit, die aus der Relativität der Gleichzeitigkeit folgt, höchst ungewöhnlich vorkommt. Verwenden wir zur Entfernungsmessung zum Beispiel als Einheit "Zentimeter", dann ist die dazugehörige Zeiteinheit nicht die übliche "Sekunde", sondern eine "rationale Zeiteinheit". Diese ist gleich der Zeitspanne, die ein Lichtsignal benötigt, um die Entfernung von einem Zentimeter zurückzulegen; das sind 0,000 000 000 0 3 Sekunden.

Die Transformation von Raum- in Zeitintervalle führt also auf dem Gebiet unserer alltäglichen Erfahrung zu in der Praxis nicht beobachtbaren Resultaten - ein Umstand, der

die klassische Ansicht zu stützen scheint, dass Zeit etwas absolut Unabhängiges und Unveränderliches ist.
Untersucht man jedoch Bewegungen mit sehr hohen Geschwindigkeiten, zum Beispiel die Bewegung von aus radioaktiven Stoffen emittierten Elektronen oder die Bewegung der Elektronen innerhalb eines Atoms, wo die in bestimmten Zeitintervallen zurückgelegten Strecken von derselben Größenordnung sind wie die in rationalen Einheiten ausgedrückte Zeit, dann stößt man unweigerlich auf die beiden zuvor erörterten Effekte, und die Relativitätstheorie wird überaus wichtig. Selbst im Bereich verhältnismäßig geringer Geschwindigkeiten, wie zum Beispiel der Bewegung der Planeten in unserem Sonnensystem, kann man auf Grund der außerordentlichen Genauigkeit astronomischer Messungen relativistische Effekte feststellen. Die Beobachtung solcher relativistischer Effekte verlangt allerdings, dass Abweichungen der Planetenbewegung gemessen werden, die nur einen Bruchteil einer Winkelsekunde pro Jahr betragen.
Wie ich Ihnen zu erklären versucht habe, folgt aus der Kritik der Vorstellungen von Raum und Zeit, dass Raumintervalle teilweise in Zeitintervalle umgeformt werden können und umgekehrt; das bedeutet, dass der numerische Wert einer bestimmten Entfernung oder einer Zeitperiode, von verschiedenen bewegten Systemen aus gemessen, verschieden sein wird.
Eine verhältnismäßig einfache mathematische Analyse dieses Problems, auf die ich in dieser Vortragsreihe jedoch nicht eingehen möchte, ergibt eine bestimmte Formel für die Veränderung dieser Werte. Es zeigt sich, dass ein beliebiges Objekt der Länge 1, das sich relativ zum Beobachter mit einer Geschwindigkeit v bewegt, um einen Betrag verkürzt wird, der von der Geschwindigkeit des Objekts abhängt; seine Länge wird zu

$$l' = l * \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Analog dazu wird ein beliebiger, die Zeit t beanspruchender Vorgang von einem sich dazu relativ bewegenden System aus gesehen eine längere Zeit t benötigen, die gegeben ist durch.

$$t' = \frac{t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Wir haben hier die berühmte "Längenkontraktion" und "Zeitdillatation" der Relativitätstheorie vor uns.
Wenn, wie es gewöhnlich der Fall ist, v viel kleiner ist als c, sind die Effekte sehr gering; bei genügend großen Geschwindigkeiten können die von einem bewegten System aus gemessenen Längen jedoch nach Belieben verkürzt und die Zeitintervalle beliebig verlängert werden.
Sie dürfen dabei jedoch nicht vergessen, dass beide Effekte absolut symmetrisch sind. Während sich also die Reisenden eines schnell fahrenden Zuges wundern werden, weshalb die Leute im ruhenden Zug so mager sind und sich so langsam bewegen, werden die Fahrgäste des ruhenden Zuges ein gleiches von den Passagieren des fahrenden Zuges denken.
Eine weitere wichtige Konsequenz aus der Existenz einer nicht überschreitbaren Geschwindigkeitsgrenze betrifft die Masse bewegter Körper. Den allgemeinen Grundlagen der Mechanik entsprechend ist die Masse eines Körpers durch den Widerstand gegeben, den der Körper einer beginnenden Bewegung beziehungsweise der Beschleunigung einer schon bestehenden Bewegung entgegensetzt. Je größer die Masse des Körpers ist, umso schwerer

wird es sein, seine Geschwindigkeit um einen gegebenen Betrag zu erhöhen.
Die Tatsache, dass ein Körper unter keinerlei Umständen die Lichtgeschwindigkeit überschreiten kann, führt uns unmittelbar zu dem Schluss, dass sein Widerstand gegen eine weitere Beschleunigung, oder, mit anderen Worten, seine Masse, unendlich groß werden muss, wenn seine Geschwindigkeit sich der Lichtgeschwindigkeit nähert. Die mathematische Analyse führt zu einer Formel für diese Abhängigkeit, die den Formeln (2) und (3) analog ist. Stellt mo die Masse des Körpers bei sehr geringen Geschwindigkeiten dar, so ist bei der Geschwindigkeit v seine Masse m gegeben durch:

$$m = \frac{m0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

und der Widerstand gegen eine weitere Beschleunigung wird unendlich groß, wenn v sich der Lichtgeschwindigkeit c nähert. Experimentell lässt sich die relativistische Veränderung der Masse leicht an sehr schnell bewegten Teilchen beobachten. So ist zum Beispiel die Masse von aus radioaktiven Substanzen emittierten Elektronen (deren Geschwindigkeit bei 99 % der Lichtgeschwindigkeit liegt) mehrere Male größer als im Ruhezustand und die Massen der Elektronen der sogenannten kosmischen Strahlung (die sich oft mit 99,98 % der Lichtgeschwindigkeit bewegen) sind tausendmal größer. Für diese Geschwindigkeiten ist die klassische Mechanik absolut unbrauchbar; wir betreten rein relativistische Bereiche.

Was der Professor noch nicht wusste

Physikalische Effekte haben manchmal ein sonderbares Schicksal. Die "verhältnismäßig einfache mathematische Analyse", aus der die Verkürzung bewegter Körper folgt, hatte Albert Einstein im Jahre 1905 durchgeführt. Zusammen mit den anderen grundlegenden Ergebnissen seiner Theorie wurde sie allmählich Allgemeingut und ging sogar in Mr. Tompkins Träume ein. Fünfzig Jahre lang träumte die physikalische Welt mit, und erst 1959 erwachten Roger Penrose in England und James Terrell in den USA aus diesen relativistischen Träumereien.1 Mr. Tompkins würde seinen Augen nicht trauen, und doch ist es wahr: Er könnte die Verkürzung bewegter Körper niemals beobachten. Sein Traum würde ihn in eine völlig andere Welt führen, in eine Welt, in der sich Radfahrer nicht verkürzen, sondern verdrehen. Auf seiner relativistischen Fahrt wird sich unser imaginärer Radfahrer nämlich drehen und scheinbar in die Kamera hineinfahren wollen, ohne dabei aber von seinem geradlinigen Weg abzuweichen. Schließlich scheint er sich wieder eines besseren zu besinnen, dreht sich wieder seiner ursprünglichen Fahrtrichtung zu und verschwindet der Straße entlang im Unendlichen.
Wie es zu diesem sonderbaren Benehmen kommt? Der Professor hatte nicht bedacht, dass wir die Dinge nicht so sehen, wie sie jetzt sind, sondern wie sie einmal waren. Denn das Licht braucht Zeit, um uns zu erreichen, und alles was wir sehen ist Vergangenheit. Da die verschiedenen Teile des Radfahrers verschieden weit von unserer Kamera entfernt sind, so benötigt auch das Licht unterschiedliche Zeitspannen, um die Kamera zu erreichen. Eine Momentaufnahme wird uns die weiter hinten befindlichen Körperteile des Radfahrers in einem früheren

1(R. Penrose, Proc. Cambr. Phil. Soc. 55, 137 (1959)

J. Terrel, Phys. Rev. 116, 1041 (1959)
Die Unsichtbarkeit der Lorentzkontraktion wurde bereits von A. Lampa,
Zs. für Physik 72, 130 (1924) diskutiert, doch ist diese Studie weitgehend
unbeachtet geblieben.)

Zustand zeigen und die Körperteile, die nahe der Kamera sind, in einem späteren Zustand. Das hatte der Professor einfach vergessen! Das Bild der Kamera zeigt nicht den jetzigen Radfahrer, der tatsächlich verkürzt wäre. Es zeigt einen Radfahrer zu verschiedensten Zeiten und eine "verhältnismäßig einfache mathematische Analyse" beweist, dass diese "Zeitgeschichte" den Radfahrer verdreht.

Noch weniger hätte sich Mr. Tompkins träumen lassen, dass der Radfahrer auf seiner Fahrt die Farbe wechselt und vielleicht sogar unsichtbar würde. Fährt er nämlich auf eine Lichtquelle zu, so vergrößert sich für ihn infolge des Dopplereffektes die Frequenz der auftreffenden Lichtstrahlen. Bei genügend hoher Geschwindigkeit durchschlagen diese Lichtstrahlen unseren relativistischen Rennfahrer schließlich, da sie ihm als Röntgenstrahlen erscheinen. Zu seiner größten Verwunderung hätte Mr. Tompkins nunmehr das Skelett des Radfahrers gesehen. Tritt er noch kräftiger in die Pedale, so erhöht sich die Frequenz der Strahlung nochmals, durchschlägt nun auch die Knochen des Radfahrers, ohne Spuren zu hinterlassen, und unser rasender Relativist ist damit unsichtbar geworden. Zugfahren hält jung! So könnten wir Mr. Tompkins' Erkenntnisse über die Zeit beurteilen. Tatsächlich sind die Züge auch heute noch zu langsam, um diesen Effekt messbar zu machen. Aber in den großen Beschleunigeranlagen der Welt wirkt sich die "Zeitdillatation" bereits ganz deutlich aus. in einem Experiment bei CERN hat man das mit Myonen überprüft. Diese Teilchen sind üblicherweise "Eintagsfliegen". Erzeugt man sie im Labor, so zerfallen sie bereits nach zwei Millionstel Sekunden wieder. Lässt man sie aber in einer Genfer Beschleunigungsanlage fast mit Lichtgeschwindigkeit rotieren, so leben sie rund 30 mal länger. 2 Einige Millionstel Sekunden mehr oder weniger mögen ihnen vielleicht nicht sehr viel erscheinen. Hätte es aber den Beschleuniger bereits zu Cäsars Zeiten gegeben, und wäre unser mutiger Mr. Tompkins damals auf eine Kreisbahn expediert worden, so würde er heute noch darin kreisen und erst sechzig Jahre alt sein! Infolge der Massenzunahme würde er allerdings eine Masse von rund 2000 Kilogramm aufweisen.

2 Die Messungen mit Myonen finden sich bei F. M. Farley et al, Nature 217, 17 (1968).

3 Mr. Tompkins macht Urlaub

Mr. Tompkins hatte großen Spaß an seinen Abenteuern in der relativistischen Stadt, bedauerte aber, dass der Professor nicht mit ihm gewesen war. Er hätte ihm die seltsamen Vorgänge, die er beobachtet hatte, gewiss erklärt: vor allem beunruhigte ihn die Frage, wodurch der Bremser seine Passagiere vor dem Altwerden hatte ' bewahren können. So manche Nacht ging er in der Hoffnung zu Bett, er werde diese interessante Stadt wieder sehen. Aber seine Träume waren rar und meist unerquicklich. Das letzte Mal hatte ihn sein Abteilungsleiter wegen der Unschärfen, die er in die Bank Gebarung eingeführt hatte,

gefeuert. Daher meinte Mr. Tompkins, es sei besser, etwas auszuspannen und eine Woche lang irgendwohin ans Meer zu fahren. So kam es, dass er schließlich in einem Eisenbahnabteil saß und durch das Fenster die grauen Dächer der Vorstädte beobachtete, die allmählich den grünen Wiesen des freien Landes wichen. Er griff nach einer Zeitung und versuchte, sich mit den Problemen des Vietnam-Konflikts auseinander zu setzen. Doch schien ihm das alles so unwirklich und fern, wo doch die Eisen Bahnwaggons so angenehm schaukelten...

Als er die Zeitung senkte und wieder aus dem Fenster sah, hatte sich die Landschaft beträchtlich verändert. Die Telegraphenmasten waren so eng zusammengerückt, dass sie einer Hecke glichen, und die Baumkronen waren so schlank wie jene von italienischen Zypressen. Ihm gegenüber saß plötzlich sein alter Freund, der Professor, und schaute interessiert aus dem Fenster. Wahrscheinlich war er hereingekommen, als Mr. Tompkins mit seiner Zeitung beschäftigt war.

"Wir sind im Land der Relativität", sagte Mr. Tompkins, "nicht wahr?"

"Schau, schau! Sie wissen ja eine ganze Menge!" bemerkte der Professor. "Wo haben Sie Ihre Kenntnisse denn her?"

"Ich war schon einmal hier, doch hatte ich damals nicht das Vergnügen Ihrer Gesellschaft."

"Also werden wohl diesmal Sie mein Führer sein", meinte der alte Herr.

"Kaum", sagte Mr. Tompkins traurig, "ich habe zwar viel Ungewöhnliches erlebt, doch die Einheimischen, mit denen ich sprach, hatten einfach kein Verständnis für meine Schwierigkeiten."

"Begreiflicherweise", erwiderte darauf der Professor. "Sie sind in dieser Welt aufgewachsen und betrachten alle Erscheinungen um sie herum als selbstverständlich. Aber ich kann mir auch vorstellen, dass sie umgekehrt sehr erstaunt wären, wenn sie in die Welt gerieten, in der Sie daheim sind. Sie käme ihnen sicherlich recht merkwürdig vor."

"Darf ich Sie etwas fragen?" sagte Mr. Tompkins. "Das letzte Mal, als ich hier war, traf ich einen Bremser von der Eisenbahn, der in einem fort behauptete, dass die Fahrgäste deshalb langsamer altern als die Leute in der Stadt, weil der Zug stehen bleibt und wieder anfährt. Lässt sich das auch mit moderner Wissenschaft vereinbaren oder ist hier Zauberei im Spiel?"

"Es gibt niemals einen Grund dafür, etwas als Zauberei zu bezeichnen", erklärte der Professor. "Diese Dinge leiten sich direkt aus physikalischen Gesetzen ab. Einstein hat in seinen Untersuchungen über die neuen - oder vielmehr neu entdeckten, denn sie sind so alt wie die Welt - Vorstellungen von Raum und Zeit nachgewiesen, dass sich alle physikalischen Vorgänge verlangsamen, wenn das System, in dem sie stattfinden, seine Geschwindigkeit ändert. In unserer Welt sind die Effekte so klein, dass man sie kaum beobachten kann, aber hier springen sie einem dank der niedrigen Lichtgeschwindigkeit sofort in die Augen. Nehmen wir zum Beispiel an, Sie wollen ein Ei kochen und bewegen den Topf, statt ihn ruhig auf dem Ofen stehen zu lassen, hin und her, was eine ständige Änderung seiner Geschwindigkeit bedeutet, so wird es nicht fünf, sondern vielleicht sechs Minuten dauern, bis das Ei gar ist. Auch im menschlichen Körper selbst verlangsamen sich alle Vorgänge, wenn man (zum Beispiel) in einem Schaukelstuhl sitzt oder in einem Zug, der seine Geschwindigkeit ändert; unter solchen Bedingungen leben wir langsamer. Da sich jedoch alle Vorgänge im selben Ausmaß verlangsamen, ziehen es die Physiker vor zu sagen, dass in einem nicht gleichförmig bewegten System die Zeit langsamer vergebt."

"Aber können denn die Wissenschaftler derartige Phänomene in unserer Welt wirklich

beobachten?"
ja, aber es erfordert beträchtliche Geschicklichkeit. Es ist technisch gesehen sehr schwierig, die nötige Beschleunigung zu erzielen. Doch sind die Bedingungen, die in einem ungleichförmig bewegten Bezugssystem gegeben sind, analog - oder sollte ich sagen identisch? - mit dem Effekt, der sich aus der Wirkung einer sehr großen Schwerkraft ergibt. Es wird Ihnen vielleicht aufgefallen sein, dass Sie in einem Aufzug, der rasch aufwärts beschleunigt wird, den Eindruck haben, schwerer zu werden; umgekehrt glauben Sie, leichter zu werden, wenn der Aufzug abwärts zu fahren beginnt; - am deutlichsten spürt man dies, wenn das Seil reißt. Die Erklärung hierfür ist, dass das Schwerefeld, das durch die Beschleunigung entsteht, in einem Fall zum Schwerefeld der Erde hinzukommt, im anderen ihm entgegenwirkt. Nun ist das Gravitationspotential auf der Sonne um vieles größer als auf der Erdoberfläche; daher müssten dort alle Vorgänge etwas langsamer ablaufen. Astronomen können dies in der Tat beobachten."
"Aber sie können doch nicht zur Sonne fahren, um das nachzuprüfen."
"Das haben sie auch gar nicht nötig. Sie betrachten das Licht, das von der Sonne zu uns kommt. Es entsteht durch Schwingungen der Atome in der Sonnenatmosphäre. Wenn nun dort alle Prozesse langsamer ablaufen, dann müssen auch die Atome langsamer schwingen. Den Unterschied kann man feststellen, indem man das Licht einer irdischen Lichtquelle mit dem der Sonne vergleicht. Übrigens - wissen Sie, wie die kleine Station heißt, durch die wir soeben fahren?" unterbrach sich der Professor. Der Zug rollte den Perron eines kleinen, ländlichen Bahnhofs entlang. Der Bahnsteig war völlig menschenleer, sofern man vom Bahnhofsvorstand und einem jungen Träger absah, der zeitungslesend auf einem Gepäckswagen saß. Plötzlich riss der Stationsvorstand seine Arme in die Höhe und stürzte kopfüber nach vorn. Mr. Tompkins hatte keinen Schuss fallen hören - vermutlich war der Knall im Lärm des fahrenden Zuges untergegangen -, aber die Blutlache, die sich um den Körper des Mannes bildete, ließ keinen Zweifel aufkommen. Der Professor zog sofort die Notbremse; mit einem Ruck blieb der Zug stehen. Während sie aus dem Waggon stiegen, lief der junge Träger auf den am Boden liegenden Körper zu; gleichzeitig näherte sich ein Gendarm.
"Herzschuss", konstatierte der Gendarm, nachdem er den Toten untersucht hatte. Dann legte er die Hand auf die Schulter des Trägers und sagte: "Ich verhafte Sie wegen Mordes am Stationsvorstand. "
"Ich hab' ihn nicht getötet", rief der unglückliche Träger. "Ich las gerade Zeitung, da hörte ich den Schuss. Diese Herren hier aus dem Zug müssen alles gesehen haben und können bezeugen, dass ich unschuldig bin."
"So ist es", sagte Mr. Tompkins, "ich habe mit eigenen Augen gesehen, dass dieser Mann hier Zeitung las, als der Stationsvorstand erschossen wurde. Das kann ich unter Eid aussagen."
"Sie haben sich jedoch in einem fahrenden Zug befunden", entgegnete der Gendarm in autoritärem Ton. "Was Sie da gesehen haben, hat daher überhaupt kein Gewicht. Vom Bahnsteig aus gesehen, kann der Mann im strittigen Moment durchaus geschossen haben. Wissen Sie denn nicht, dass Gleichzeitigkeit vom System abhängt, von dem aus Sie Vorgänge beobachten? Kommen Sie mit", wandte er sich an den Träger.
"Verzeihen Sie, Inspektor unterbrach hier der Professor, "aber Sie sind hier absolut im Unrecht. Ich glaube nicht, dass man Ihre Ignoranz bei Ihrer vorgesetzten Behörde besonders

schätzen wird. Es ist natürlich richtig, dass der Begriff der Gleichzeitigkeit in Ihrem Lande hier etwas sehr Relatives ist. Es ist außerdem richtig, dass zwei an verschiedenen Orten vor sich gehende Ereignisse gleichzeitig sein können oder auch nicht - je nach der Bewegung des Beobachters. Aber nicht einmal in Ihrem Land kann ein Mensch die Wirkung vor der Ursache sehen. Oder haben Sie jemals ein Telegramm erhalten, bevor es noch aufgegeben wurde? Und sind Sie schon jemals betrunken gewesen, bevor Sie auch nur die Flasche öffneten? Wenn ich Sie richtig verstanden habe, vermuten Sie, dass die Abgabe des Schusses infolge der Bewegung des Zugs von uns erst viel später gesehen wurde als dessen Wirkung, ja sogar, dass wir, obwohl wir sogleich ausstiegen, zwar den Stationsvorstand zusammenbrechen, aber nicht den Schießvorgang selbst gesehen hätten. Ich weiß, man hat Ihnen bei der Polizei beigebracht, nur das zu akzeptieren, was in den Vorschriften steht. Aber sehen Sie sich diese Vorschriften doch einmal genauer an; wahrscheinlich werden Sie in ihnen etwas zu diesem Punkt finden. "

Das Auftreten des Professors machte einigen Eindruck auf den Gendarmen. Er zog ein Büchlein mit Vorschriften aus der Tasche und begann, es langsam zu studieren. Bald breitete sich ein verlegenes Lächeln über sein dickes, rotes Gesicht.

"Da", sagte er, "Kapitel 37, Paragraph 12, Absatz e- Als einwandfreies Alibi soll jeder autoritative Beweis gelten, von welchem bewegten System aus er auch immer geführt sein mag, der nachweist, dass der Verdächtige im Augenblick des Verbrechens oder innerhalb einer Zeitspanne ± cd (wobei c die natürliche Geschwindigkeitsgrenze und d den Abstand vom Ort des Verbrechens bezeichnen) an einer anderen, vom Tatort verschiedenen Stelle gesehen worden ist.

"Sie sind frei, mein Lieber", sagte er zum Träger, und dann zum Professor gewandt: "Ich bin Ihnen sehr zu Dank verpflichtet, denn Sie haben mich vor großen Unannehmlichkeiten mit der Direktion bewahrt. Ich bin erst seit kurzem bei der Polizei und mit unseren zahlreichen Vorschriften noch nicht ganz vertraut. Meiden muss ich den Mordfall jedenfalls", und er ging zur Telefonzelle. Eine Minute später rief er über den Bahnsteig herüber: "Alles in Ordnung! Der tatsächliche Mörder wurde erwischt, als er gerade aus dem Bahnhof laufen wollte. Und vielen Dank nochmals!"

"Möglich, dass ich sehr dumm bin", sagte Mr. Tompkins, als der Zug sich wieder in Bewegung setzte, "aber was soll das ganze Getue um Gleichzeitigkeit? Gibt es die wirklich nicht in diesem Land?"

"Doch, doch", lautete die Antwort, "aber nur bis zu einem gewissen Grad; sonst hätte ich dem Gepäcksträger nicht helfen können. Die Existenz einer natürlichen Grenzgeschwindigkeit für die Bewegung eines Körpers oder die Ausbreitung eines Signals lässt den Begriff der Gleichzeitigkeit, wie wir ihn gewöhnlich verstehen, seinen Sinn verlieren. Vielleicht können Sie es mit Hilfe der folgenden Überlegung leichter verstehen: Nehmen wir an, Sie haben einen in einer fernen Stadt lebenden Freund, mit dem Sie brieflich in Verbindung sind, so dass also der Postzug Ihr schnellstes Kommunikationsmittel bildet. Nehmen wir weiter an, Ihnen stößt einmal an einem Sonntag irgendetwas zu und Sie erfahren, dass die gleiche Sache auch Ihrem Freund passieren wird. Es ist klar, dass Sie es ihn nicht mehr vor Mittwoch wissen lassen können. Wüsste andererseits er im voraus von der Sache, die Ihnen zustoßen wird, dann wäre der letzte Tag, an dem er Sie davon verständigen könnte, der vorhergehende Donnerstag. Ihr Freund war also ganze sechs Tage lang, nämlich von Donnerstag bis zum darauffolgenden Mittwoch, weder in der Lage, Ihr

sonntägliches Schicksal zu beeinflussen, noch es in Erfahrung zu bringen. Vom Standpunkt der Kausalität aus betrachtet, war er sechs Tage lang sozusagen von Ihnen exkommuniziert."
"Und wie wär's mit einem Telegramm?" warf Mr. Tompkins ein.
"Ich bin davon ausgegangen, dass die Geschwindigkeit des Postzugs die höchstmögliche ist, was den tatsächlichen Verhältnissen in diesem Lande in etwa entspricht. Bei uns zu Hause ist die Lichtgeschwindigkeit die Maximalgeschwindigkeit; deshalb kann man ein Signal nicht rascher als mittels Radio weitergeben. "
"Aber", beharrte Mr. Tompkins, "selbst wenn die Geschwindigkeit des Postzugs nicht zu übertreffen ist: was hat das mit Gleichzeitigkeit zu tun? Mein Freund und ich würden doch wohl trotzdem unser Mittagessen am Sonntag zur gleichen Zeit einnehmen?"
"Nein, eine solche Behauptung würde dann keinen Sinn mehr haben. Ein Beobachter würde Ihnen zustimmen, aber andere, die ihre Beobachtungen von verschiedenen Zügen aus anstellen, würden darauf bestehen, dass Sie Ihr Mittagessen am Sonntag verspeisen, während Ihr Freund gerade freitags frühstückt oder Dienstag zu Abend isst. Aber keinesfalls könnte irgend jemand Sie und Ihren Freund Mahlzeiten gleichzeitig einnehmen sehen, die mehr als drei Tage auseinanderliegen. "
"Mein Gott, wie soll denn das zu verstehen sein?" rief Mr. Tompkins verwundert.

"Sehr einfach, wie Sie meinen Vorträgen hätten entnehmen können. Die obere Grenzgeschwindigkeit muss dieselbe bleiben, gleichgültig von welchem bewegten System aus man sie beobachtet. Wenn man das akzeptiert, muss man daraus folgern, dass ..."
Doch traf gerade jetzt der Zug in dem Bahnhof ein, in dem Mr. Tompkins auszusteigen hatte; ihre Unterhaltung wurde damit jäh unterbrochen.
Als Mr. Tompkins am Morgen nach seiner Ankunft im Seebad zum Frühstück in die weite Glasveranda des Hotels trat, erwartete ihn eine große Überraschung. An einem Tisch in der gegenüberliegenden Ecke saßen der alte Professor und ein hübsches Mädchen, das dem alten Mann irgendetwas Heiteres zu erzählen schien. Dabei blickte sie hin und wieder verstohlen in die Richtung des Tisches, an dem Mr. Tompkins Platz genommen hatte.
"Ich muss wohl sehr dumm ausgesehen haben, als ich im Zug schlief", dachte Mr. Tompkins, dessen Unzufriedenheit mit sich selbst wuchs." Der Professor erinnert sich sicherlich noch immer an die dummen Fragen, die ich ihm übers Jüngerwerden stellte. Allerdings gibt mir das Gelegenheit, ihn näher kennen zu lernen und die Fragen vorzubringen, die ich noch immer nicht verstehe." Nicht einmal sich selbst wagte er einzugestehen, dass es nicht allein die Konversation mit dem Professor war, die ihn beschäftigte.
"Ach ja, ich glaube mich zu erinnern, Sie in meinen Vorträgen gesehen zu haben", sagte der Professor, als sie zusammen den Speisesaal verließen. "Das ist meine Tochter Maud. Sie studiert Malerei."

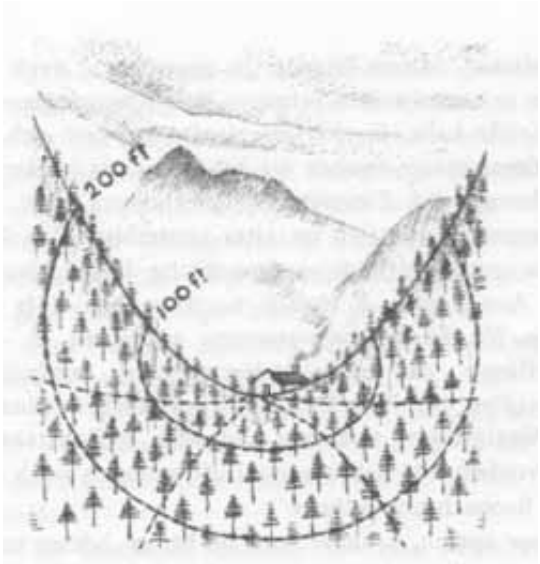
"Ich freue mich sehr, Ihre Bekanntschaft machen zu dürfen, Miss Maud", sagte Mr. Tompkins, und es kam ihm vor, dass dies der schönste Name sei, der ihm je zu Ohren gekommen war. "Ich denke, die Umgebung hier wird Ihnen herrliche Motive für Ihre Skizzen liefern."
"Sie wird sie Ihnen gewiss einmal zeigen", meinte der Professor, "aber, was ich Sie fragen wollte: Haben Sie etwas von meinen Vorträgen profitiert?"
ja natürlich, und zwar gar nicht wenig. Übrigens konnte ich diese relativistischen

Kontraktionen materieller Körper und das absonderliche Verhalten der Uhren sogar am eigenen Leib erfahren, als ich eine Stadt besuchte, wo die Lichtgeschwindigkeit nur zwanzig Kilometer pro Stunde betrug. "
"Dann ist es aber schade", meinte der Professor, "dass Sie meinen darauffolgenden Vortrag versäumten, der die Krümmung des Raums und dessen Beziehung zu den Newtonschen Gravitationskräften behandelte. Doch an der Küste hier werden wir sicherlich Zeit genug finden, das nachzuholen. Verstehen Sie beispielsweise den Unterschied zwischen positiver und negativer Raumkrümmung?"
"Daddy", sagte Miss Maud schmollend, "wenn Du wieder über Physik zu reden beginnst, muss ich gehen und etwas arbeiten."
"Gut, Mädchen, dann lauf nur", erwiderte der Professor und ließ sich in einen Lehnstuhl fallen. "Wie ich sehe, junger Mann, haben Sie sich also nicht gerade viel mit Mathematik beschäftigt; ich glaube aber, ich werde Ihnen die Sache trotzdem ohne weiteres erklären können, und zwar, der Einfachheit halber, am Beispiel einer Oberfläche. Stellen Sie sich vor, Mr. Shell - Sie wissen ja, das ist der Mann, dem die vielen Tankstellen gehören nehme sich vor, einmal nachzusehen, ob seine Tankstellen über ein bestimmtes Land, sagen wir Amerika, gleichmäßig verteilt sind. Zu diesem Zweck beauftragt er sein Büro, die Tankstellen vom Mittelpunkt des Landes ausgehend (in Amerika gilt Kansas City, so weit ich weiß, als Herz' des Landes) im Umkreis von hundert, zweihundert, dreihundert und so weiter Meilen zu zählen. Er erinnert sich von seiner Schulzeit her, dass die Fläche eines Kreises proportional dem Quadrat des Radius ist; daher erwartet er, dass die Anzahl der so ermittelten Tankstellen bei gleichmäßiger Verteilung wie die Zahlenfolge 1; 4; 9; 16 usw. ansteigt. So wird er denn auch, wenn das Ergebnis der Zählung vorliegt, sehr überrascht sein, feststellen zu müssen, dass die tatsächliche Anzahl viel langsamer zunimmt, sagen wir wie 1; 3,8; 8,5; 15,0 usw. Was für ein kompletter Unsinn', würde er ausrufen; meine amerikanischen Manager sind ja total unfähig! Was soll bloß diese großartige Idee, die Tankstellen rund um Kansas City zu konzentrieren?!' - Aber hat er mit seiner Schlussfolgerung tatsächlich recht?"
"Hat er?" wiederholte Mr. Tompkins, der gerade an etwas ganz anderes dachte.

Die Verteilung der Tankstellein in den Vereinigten Staaten

"Nein, er hat nicht recht." sagte der Professor mit Nachdruck. "Denn er hat vergessen, dass die Oberfläche der Erde nicht eben, sondern kugelförmig ist; und auf einer Kugel wächst die Fläche innerhalb eines gegebenen Radius langsamer mit dem Radius als auf einer Ebene. Begreifen Sie das denn nicht? Nun, denken Sie an einen Globus und überlegen Sie einmal. Wenn Sie beispielsweise am Nordpol stehen, dann ist der Kreis, dessen Radius einem halben Meridian entspricht, der Äquator; die von ihm eingeschlossene Fläche ist die nördliche

Halbkugel. Verdoppeln Sie jetzt den Radius, wird die gesamte Erdoberfläche umschlossen. Die so gewonnene Fläche hat sich allerdings nur verdoppelt, nicht, wie dies auf einer Ebene der Fall wäre, vervierfacht. Verstehen Sie jetzt?"
"Doch, sicher", antwortete Mr. Tompkins und bemühte sich um Aufmerksamkeit. "Ist das nun eine positive oder eine negative Krümmung?"
"Man spricht hier von einer positiven Krümmung; und, wie Sie am Beispiel des Globus sehen, entspricht ihr eine endliche Fläche bestimmten Inhalts. Ein Beispiel für eine Oberfläche mit negativer Krümmung ist ein Sattel. "
"Ein Sattel?" wiederholte Mr. Tompkins.
ja, ein Sattel, oder, auf die Erdoberfläche bezogen, ein Sattel zwischen zwei Berggipfeln. Stellen wir uns einen Botaniker vor, der in einer Berghütte auf einem solchen Sattelpass lebt und sich für die Dichte des Tannenbestands rund um seine Hütte interessiert. Wenn er die Anzahl der Tannen innerhalb eines Umkreises von hundert, zweihundert und so weiter Fuß zählt, dann wird er herausfinden, dass die Anzahl der Tannen schneller wächst als das Quadrat des Abstands. Denn auf einer Sattelfläche ist die Fläche innerhalb eines Linien Radius größer als auf einer Ebene. Solche Oberflächen nennt man negativ gekrümmt. Würde man versuchen, eine Sattelfläche auf eine Ebene aufzuziehen, dann bekäme sie Falten. Wenn Sie das gleiche mit einer Kugeloberfläche versuchen, werden Sie wahrscheinlich zerreißen, falls sie nicht elastisch ist.“
"Ich verstehe", sagte Mr. Tompkins. "Sie wollen damit sagen, dass eine Sattelfläche, obgleich gekrümmt, unendlich ist."
"Genau das", bestätigte der Professor, "eine Sattelfläche erstreckt sich endlos nach allen Richtungen und endigt niemals in sich selbst. Im Falle meines Beispiels vom Bergsattel verliert die Oberfläche natürlich ihre negative Krümmung, sobald man das Gebirge verlässt und auf die positiv gekrümmte Erdoberfläche übergeht. Aber selbstverständlich kann man sich eine Oberfläche denken, die ihre negative Krümmung überall beibehält."



Eine Almhütte auf einem Bergsattel

"Aber was hat das alles mit dem gekrümmten dreidimensionalen Raum zu tun?"
"Für den Raum gilt dieselbe Überlegung. Nehmen wir an, Sie hätten Gegenstände gleichförmig über den Raum verteilt, das heißt so, dass benachbarte Gegenstände stets den

gleichen Abstand haben, und Sie wollten nun diese Gegenstände innerhalb verschiedener, von Ihnen aus gemessener Entfernungen zählen. Wächst nun diese Zahl mit dem Quadrat des Abstands, dann ist der Raum eben; steigt sie dagegen langsamer oder rascher an, dann besitzt der Raum eine positive oder negative Krümmung."
"Dann wird also im Falle positiver Krümmung der Raum innerhalb eines bestimmten Abstands weniger Volumen haben und bei negativer Krümmung mehr Volumen?" fragte Mr. Tompkins verwundert.
"Ganz recht, lächelte der Professor. Jetzt sehe ich, dass Sie mich richtig verstanden haben. Um das Vorzeichen der Krümmung des riesigen Universums, in dem wir leben, zu erforschen, braucht man also nur solche Zählungen verschieden entfernter Körper vorzunehmen. Die großen Sternnebel, von denen Sie ja wahrscheinlich gehört haben, sind gleichmäßig über den Raum verteilt. Man kann sie bis in eine Entfernung von mehreren tausend Millionen Lichtjahren sehen. Für Untersuchungen über die Krümmung des Weltalls stellen sie sehr geeignete Objekte dar."
"Und das Ergebnis dieser Untersuchungen ist, dass unser Weltall zugleich endlich und in sich geschlossen ist?"
„Tja", sagte der Professor, "dieses Problem ist gegenwärtig noch ungelöst. Einstein behauptete in seinen ersten Schriften über Kosmologie, dass das Universum endliche Größe habe, in sich geschlossen sei und sich im Lauf der Zeit nicht verändere. Später ergaben die Arbeiten eines russischen Mathematikers, A.A. Friedmann, dass Einsteins Basisgleichungen auch die Möglichkeit eines expandierenden oder sich im Alter kontrahierenden Universums offen lassen. Diese zunächst bloß mathematische Lösung wurde von dem amerikanischen Astronomen E. Hubble bestätigt. Mit Hilfe des 1 1/2-Meter Teleskops des Mt. -Wilson - Observatoriums entdeckte er, dass die Galaxien auseinander fliegen, dass unser Universum also expandiert. Dennoch bleibt die Frage offen, ob diese Expansion unendlich fortdauern wird, oder ob sie einen Maximalwert erreichen und dann in Kontraktion umschlagen wird. Dieses Problem lässt sich nur mit Hilfe weiterer, noch eingehenderer astronomischer Beobachtungen lösen."
Während der Professor sprach, schienen um sie herum höchst ungewöhnliche Veränderungen vor sich zu gehen. Das eine Ende der Hotelhalle begann winzig klein zu werden und alle Möbel wurden darin zusammengepresst; das andere Ende hingegen begann so gewaltig groß zu werden, dass Mr. Tompkins dachte, man könne das gesamte Universum darin unterbringen. Ein schrecklicher Gedanke schoss ihm durch den Kopf: Und wenn nun ausgerechnet jenes Raumstück der Küste, wo Miss Maud gerade malte, vom Rest des Universums losgerissen würde? Er würde sie niemals wiedersehen! Während er zur Tür stürzte, hörte er den Professor hinter sich rufen. "Vorsicht! Auch das Wirkungsquantum spielt verrückt!" Als er den Strand erreichte, erschien ihm dieser zunächst völlig überfüllt. Tausende Mädchen hasteten konfus in alle Richtungen durcheinander. "Wie soll ich um Himmels Willen in diesem Gewühl meine Maud finden?" dachte er. Da bemerkte er, dass alle diese Mädchen genau wie die Tochter des Professors aussahen, und er begriff, dass alles nur ein Spiel der Unschärferelation war. Im nächsten Moment war diese Welle eines anomal großen Wirkungsquantums vorbei und Maud stand mit vor Schreck geweiteten Augen vor ihm.
"Ach, Sie sind es!" murmelte sie erleichtert. "ich dachte eben, eine riesige Menschenmenge wolle sich auf mich stürzen. Wahrscheinlich ist das der Wirkung der starken Sonne hier

zuzuschreiben. Warten Sie bitte einen Augenblick, ich laufe kurz in das Hotel und hole meinen Sonnenhut."
"0 nein, wir dürfen einander jetzt nicht verlassen", protestierte Mr. Tompkins. "Ich habe den Eindruck, dass sich auch die Lichtgeschwindigkeit ändert. Wenn Sie vom Hotel zurückkämen, könnten Sie mich als alten Mann wiederfinden."
"Unsinn", sagte das Mädchen, aber ihre Hand glitt dabei in die von Mr. Tompkins. Auf dem Weg zum Hotel überraschte sie eine neue Unschärfewelle und Mr. Tompkins und das Mädchen verschmierten sich über den Strand hin. Gleichzeitig begann sich eine riesige Raumfalte von den nahen Hügeln her auszubreiten und verbog Felsen und Fischerhütten zu lustig aussehenden Gebilden. Die Sonnenstrahlen wurden durch ein ungeheures Schwerefeld abgelenkt und verschwanden schließlich gänzlich vom Horizont. Mr. Tompkins fand sich in völlige Finsternis getaucht.
Eine Ewigkeit schien zu vergehen, bis ihn eine ihm sehr liebgewordene Stimme wieder zu Sinnen brachte.
"Oh weh", sagte das Mädchen, "wie ich sehe, hat Sie mein Vater mit seiner physikalischen Konversation ins Reich der Träume befördert. Hätten Sie nicht Lust, mit mir schwimmen zu gehen? Das Wasser ist heute sehr angenehm. "
Mr. Tompkins schnellte wie eine Feder aus dem Lehnstuhl empor. "Dann war am Ende also alles ein Traum", dachte er, als sie zur Küste hinabstiegen. "Oder fängt der Traum etwa jetzt erst an?"

Was der Professor noch nicht wusste

Mr. Tompkins war verwirrt. Die Eisenbahn als Jungbrunnen und andere "relativistische Zaubereien" waren zuviel für ihn gewesen. Hatte der Professor doch zunächst (in Kapitel 2, Formel 3) das Zurückbleiben der Uhren auf die Geschwindigkeit v zurückgeführt. Nunmehr behauptete er, "dass in einem nicht gleichförmig bewegten System die Zeit langsamer vergeht," Mr. Tompkins fragte sich nun, ob er möglichst schnell laufen oder möglichst rasch beschleunigen sollte, um jung zu bleiben. Vielleicht konnte ein Besuch in einer Bibliothek hier helfen. In tausenden Zeitschriften und zehntausend Büchern sollte sich doch wohl die richtige Antwort finden lassen! Als Mr. Tompkins den Katalog aufschlug und unter "Uhrenparadoxon" und "Zwillingsparadoxon" nachschlug gingen ihm die Augen über: hunderte Karteikarten purzelten ihm entgegen.' Er hatte anscheinend in ein relativistisches Wespen Nest gestochen.

1 Die umfangreiche Literatur hat L. Marder, Reisen durch die Raum-Zeit, Vieweg 1979, zusammengestellt.

In zahllosen Artikeln versuchten Gegner der Relativitätstheorie hier einen grundlegenden Widerspruch nachzuweisen, und fast ebenso viele Abhandlungen von Physikern zeigten die Irrtümer in diesen Nachweisen auf. Schnelles Reisen als Quelle ewiger Jugend war doch allzu aufregend!

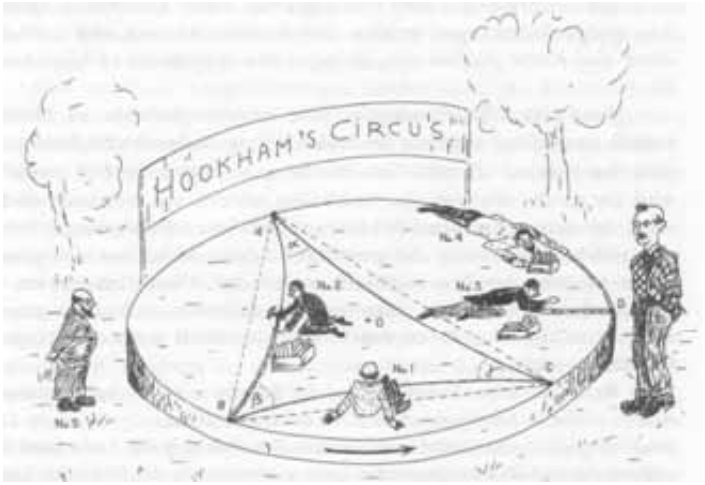
Allmählich versuchte sich Mr. Tompkins auch ohne die Hilfe des Professors ein klareres Bild zu machen. Am einleuchtendsten schien ihm eine Analogie, auf die ihn Professor Bondi führte: Wenn er beispielsweise von Hamburg nach München über Paris reiste, so würde er dazu offensichtlich länger brauchen, als auf dem direkten Weg. Die Reise ist aber nicht etwa deswegen länger, weil die Kurve in Paris (also die Beschleunigungsphase) soviel Zeit in Anspruch nehmen würde, sondern weil diese Kurve die längeren geraden Wegstücke ermöglicht. Auf diesen Stücken ergab sich der Zeitunterschied.
"So muss es sein!" rief Mr. Tompkins erregt und verärgerte damit die anderen Bibliotheksbenützer. Auch bei einer Reise durch die "RaumZeit' ermöglichen geeignete Beschleunigungsphasen längere Reisen durch den Raum mit großer Geschwindigkeit, die schließlich wieder zum Ausgangspunkt zurückführen. Auf diesen langen Strecken mit konstanter Geschwindigkeit vergeht die Zeit langsamer, die kurzen Beschleunigungsphasen sind nur deshalb notwendig, damit die hohe Geschwindigkeit erreicht wird, und der Reisende schließlich doch wieder an seinen Ausgangspunkt zurückkehren kann.

4 Der Vortrag des Professors über den gekrümmten Raum, die Gravitation und das Universum

Meine Damen und Herrn:
Heute wollen wir die Probleme des gekrümmten Raums behandeln und dessen Beziehung zum Phänomen der Gravitation. Ich bezweifle nicht, dass jeder von Ihnen sich ohne weiteres eine gekrümmte Linie oder eine gekrümmte Fläche vorstellen kann. Spricht man aber von einem gekrümmten, dreidimensionalen Raum, dann machen Sie enttäuschte Gesichter und glauben, es mit etwas ganz Ungewöhnlichem, ja fast Übernatürlichem zu tun zu haben. Was ist die Ursache für diesen allgemeinen „Horror“ vor dem gekrümmten Raum? Ist er wirklich schwieriger vorstellbar als eine gekrümmte Fläche? Bei etwas Nachdenken werden wahrscheinlich viele von Ihnen sagen, sie
fänden es deshalb schwierig, sich einen gekrümmten Raum vorzustellen, weil man diesen nicht "von außen" betrachten könne, wie etwa die gekrümmte Oberfläche eines Globus oder, um ein anderes Beispiel zu nennen, die rechteigentümlich gekrümmte Oberfläche eines Sattels. Diejenigen, die das behaupten, geben damit selbst zu, die streng mathematische Definition der Krümmung nicht zu kennen, die sich von der allgemein üblichen Bedeutung dieses Wortes tatsächlich beträchtlich unterscheidet. Wir Mathematiker nennen eine
Oberfläche gekrümmt, wenn die Eigenschaften geometrischer Figuren, die man darauf gezeichnet hat, sich von denen auf einer Ebene unterscheiden, und wir bestimmen die Krümmung durch die Abweichungen von den klassischen Regeln des Euklid. Wenn Sie auf ein ebenes Blatt Papier ein Dreieck
zeichnen, dann ist die Summe seiner Winkel, wie Sie aus der elementaren Geometrie wissen, gleich der Summe zweier rechter Winkel. Sie können dieses Blatt Papier biegen und ihm eine zylindrische, konische oder noch kompliziertere Form geben, die Winkelsumme des dargestellten Dreiecks wird dabei trotzdem stets gleich der Summe zweier rechter Winkel bleiben. Die Geometrie der Fläche ändert sich bei derartigen Deformierungen nicht und die so erhaltenen (im Sinne der üblichen Bedeutung dieses Wortes als gekrümmt geltenden) Flächen sind, vom Gesichtspunkt ihrer "inneren" Krümmung her gesehen, genauso flach wie eine Ebene. Man kann ein Blatt Papier nicht der Oberfläche einer Kugel oder eines Sattels anpassen, ohne es zu dehnen, Desgleichen verlieren die einfachen Lehrsätze des Euklid beim Versuch, ein Dreieck auf einen Globus (also ein sphärisches Dreieck) zu zeichnen, ihre

Gültigkeit. So wird ein Dreieck, das man beispielsweise aus den nördlichen Hälften zweier Meridiane und dem dazugehörigen Äquatorstück bildet, an seiner Basis zwei rechte Winkel und an der Spitze einen beliebig großen Winkel aufweisen.

Im Falle einer Sattelfläche werden Sie hingegen zu Ihrer Überraschung feststellen, dass die Winkelsumme im Dreieck stets kleiner als die Summe zweier rechter Winkel ist.
Um also die Krümmung einer Fläche zu bestimmen, ist es notwendig, die Geometrie dieser Fläche zu untersuchen. Eine bloße Betrachtung von außen kann demgegenüber leicht irreführen. Dem äußeren Anschein nach würden Sie vermutlich die Oberfläche eines Zylinders in die gleiche Kategorie einordnen wie die eines Ringes, obwohl die eine in Wirklichkeit eben und die letzte unweigerlich krumm ist. Wenn Sie sich einmal an diese neue, exakte Definition der Krümmung gewöhnt haben, werden Sie ohne Schwierigkeit verstehen, was ein Physiker mit der Frage meint, ob der Raum, in dem wir leben, gekrümmt sei oder nicht. Das Problem dabei besteht bloß darin herauszufinden, ob die im physikalischen Raum konstruierten geometrischen Figuren auch wirklich den Gesetzen der Euklidischen Geometrie unterliegen oder nicht.
Da wir jedoch über den gegebenen physikalischen Raum sprechen, müssen wir zuallererst eine physikalische Definition der in der Geometrie verwendeten Begriffe geben. Im besonderen müssen wir festlegen, was wir unter dem Begriff der Geraden verstehen, woraus unsere Figuren konstruiert werden sollen.
Ich nehme an, Sie alle kennen die allgemein übliche Definition der Geraden als der kürzesten Verbindung zwischen zwei Punkten. Man erhält eine Gerade, indem man zwischen zwei Punkten eine Schnur spannt, oder - auf eine gleichwertige, aber etwas mühsamere Art - indem man versucht, zwischen zwei gegebenen Punkten jene Linie zu finden, längs welcher man die kleinste Anzahl von Messstäben einer bestimmten Länge auflegen kann.



Experimente auf einer rotierenden Scheibe führen zu überrachjungen

Um Ihnen zu zeigen, dass das Ergebnis der soeben beschriebenen Methode des Bestimmens einer geraden Linie von den physikalischen Bedingungen abhängt, wollen wir uns eine große, runde Scheibe vorstellen, die sich gleichförmig um ihre Achse dreht. Ein Experimentator (2) versucht nun, die kürzeste Verbindung zwischen zwei Punkten auf der Peripherie dieser Scheibe zu finden. Er hat eine Kiste mit vielen Messstäben bei sich, von denen jeder 10 cm lang ist, und versucht sie nun zwischen den beiden Punkten so aneinander

zufügen, dass er mit einer möglichst geringen Zahl auskommt. Wenn sich die Scheibe nicht drehte, würde er die Messstäbe die Linie entlang legen, die in unserer Zeichnung strichliiert ist. infolge der Drehung der Scheibe erfahren aber die Messstäbe, wie ich in meinem vorhergehenden Vortrag ausgeführt habe, eine relativistische Kontraktion. Diejenigen unter Ihnen, die näher an der Peripherie der Scheibe liegen (und daher eine größere Lineargeschwindigkeit besitzen), werden stärker verkürzt als jene, die näher dem Mittelpunkt liegen. Um demnach mit dem jeweiligen Messstab eine möglichst große Distanz abdecken zu können, muss man so nahe wie möglich an den Mittelpunkt herankommen. Da jedoch die beiden Enden der Linie auf der Peripherie liegen, ist es andererseits nachteilig, die Stäbe des Mittelteils der Linie zu sehr an das Zentrum heranzurücken. Das beste Resultat wird man daher mit einem Kompromiss zwischen den beiden Bedingungen erzielen. Der kürzeste Abstand wird schließlich durch eine Kurve gegeben sein, die gegen den Mittelpunkt zu leicht konvex ist.

Wenn unser Experimentator, statt einzelne Messstäbe zu benützen, einfach eine Schnur zwischen den beiden in Frage stehenden Punkten spannt, wird das Resultat offensichtlich dasselbe sein, denn jeder Teil der Schnur wird die gleiche relativistische Verkürzung erleiden wie die einzelnen Messstäbe. Ich möchte hier besonders betonen, dass diese bei Rotation der Scheibe auftretende Deformation der gespannten Schnur nichts mit den gewöhnlichen Effekten der Zentrifugalkraft zu tun hat. Diese Deformation wird sich nämlich nicht ändern, auch wenn die Schnur noch so stark gespannt wird - ganz abgesehen davon, dass die Zentrifugalkraft in die entgegengesetzte Richtung wirkt.

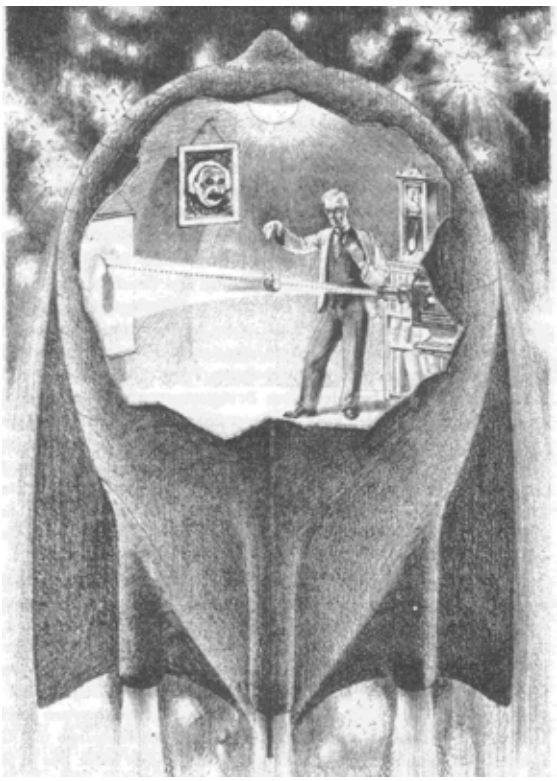
Wenn nun unser Beobachter auf der Scheibe seine Ergebnisse überprüft, indem er die in der beschriebenen Art erhaltene "Gerade" mit einem Lichtstrahl vergleicht, dann wird sich herausstellen, dass sich das Licht tatsächlich entlang der von ihm konstruierten Linie ausbreitet. In der Nähe der Scheibe befindlichen Beobachtern wird der Lichtstrahl natürlich keineswegs gekrümmt erscheinen; sie werden die Beobachtungen des bewegten Beobachters vielmehr als Oberlagerung der Rotation der Scheibe und der geradlinigen Ausbreitung des Lichts interpretieren und Ihnen erklären, dass auch ein Kratzer auf einer sich drehenden Schallplatte zweifellos gekrümmt sein wird, wenn man ihn dadurch macht, dass man mit der Hand in einer geraden Linie darüber fährt.

Vom Standpunkt des Beobachters auf der rotierenden Scheibe jedoch ist die Bezeichnung "Gerade" für die erhaltene Kurve durchaus richtig: In seinem Bezugssystem ist sie die kürzeste Verbindung und stimmt tatsächlich mit dem Weg eines Lichtstrahls überein. Nehmen wir an, er wählt drei Punkte auf der Peripherie und verbindet sie durch gerade Linien, so dass ein Dreieck entsteht. In diesem Fall wird die Winkelsumme kleiner als die Summe zweier rechter Winkel sein. Daraus wird er mit Recht folgern, dass der Raum um ihn gekrümmt ist.

Ein anderes Beispiel: Nehmen wir an, zwei andere Beobachter auf der Scheibe (3 und 4) wollen durch Messung von Umfang und Durchmesser der Scheibe die Zahl 7r abschätzen. Der Messstab von (3) wird dabei von der Rotation nicht betroffen, denn die Bewegung des Messstabs erfolgt immer senkrecht zu seiner Länge. Dagegen wird der Messstab von (4) ständig verkürzt und Beobachter (4) wird für die Länge des Umfangs einen größeren Wert als auf einer nicht rotierenden Scheibe erhalten. Dividiert man das Messergebnis von (4) durch dasjenige von (3), wird man also einen größeren Wert für ir erhalten als den, der üblicherweise in den Lehrbüchern angegeben ist. Auch das ist eine Folge der

Raumkrümmung.
Aber nicht nur Längenmessungen werden durch die Rotation beeinflusst. Eine an der Peripherie der Scheibe angebrachte Uhr wird eine größere Geschwindigkeit haben und daher im Sinne der Überlegungen des vorhergehenden Vortrags langsamer gehen als eine Uhr, die im Mittelpunkt der Scheibe aufgestellt ist.
Wenn zwei Beobachter (4 und 5) ihre Uhren im Mittelpunkt der Scheibe auf dieselbe Zeit einstellen und (5) daraufhin für eine gewisse Zeit seine Uhr zur Peripherie der Scheibe bringt, dann wird er bei seiner Rückkehr zum Zentrum feststellen, dass seine Uhr nachgeht, vergleicht man sie mit der ständig im Zentrum verbliebenen Uhr. Er wird daraus schließen, dass alle physikalischen Vorgänge an verschiedenen Orten der Scheibe verschieden schnell ablaufen.
Unsere Experimentatoren - so wollen wir annehmen - halten nun ein und denken ein wenig über die Ursache der ungewöhnlichen Ergebnisse nach, die sie bei ihren geometrischen Messungen erhalten haben. Nehmen wir weiter an, ihre rotierende Scheibe wäre ein geschlossener Raum ohne Fenster, so dass die darin befindlichen Beobachter ihre relativ zur Umgebung erfolgende Bewegung nicht sehen könnten. Wären sie dann imstande, alle Beobachtungen allein aus den physikalischen Gegebenheiten auf ihrer Scheibe zu erklären, ohne dabei die Drehung der Scheibe relativ zu dem "festen" Boden, auf dem sie sich befindet, miteinbeziehen zu müssen?
Sie werden sich fragen, welche Unterschiede zwischen den physikalischen Bedingungen auf ihrer Scheibe und auf dem "festen" Boden für die beobachteten geometrischen Veränderungen denn eigentlich verantwortlich sind. Dabei werden sie sofort das Vorhandensein einer neuartigen Kraft bemerken, die alle Körper vom Mittelpunkt der Scheibe gegen die Peripherie hin zu ziehen versucht. Verständlicherweise werden sie alle Beobachtungen der Wirkung dieser Kraft zuschreiben. So werden sie zum Beispiel sagen, dass von den beiden Uhren diejenige langsamer gehen wird, die in der Wirkungslinie der neuen Kraft vom Zentrum weiter entfernt ist. Aber hat man es hier wirklich mit einer neuen Kraft zu tun, mit einer Kraft, die man auf dem "festen" Boden nicht beobachten kann? Haben wir nicht immer schon gewusst, dass alle Körper von der sogenannten Schwerkraft zum Mittelpunkt der Erde hingezogen werden? Zwar wirkt die Anziehung in dem einen Fall in Richtung auf die Peripherie der Scheibe, im anderen in Richtung auf den Erdmittelpunkt, aber dies bedeutet nur einen Unterschied in der Verteilung der Kraft. Es ist jedenfalls nicht schwierig, an Hand eines anderen Beispiels einzusehen, dass diese "neuen", durch ungleichförmige Bewegungen des Bezugssystems hervorgerufenen Kräfte der Schwerkraft in unserem Hörsaal hier genau gleichen.
Denken wir uns ein für den interstellaren Verkehr bestimmtes Raumschiff, das irgendwo frei im Raum schwebt, und zwar so weit von jeglichem Stern entfernt, dass in seinem Inneren keine Schwerkraft wirkt. Alle in einem solchen Raumschiff befindlichen Objekte samt dem darin reisenden Experimentator werden dann schwerelos sein und wie Michel Ardent und seine Kameraden auf ihrer Reise zum Mond in Jules Vernes berühmter Geschichte frei im Raum schweben.
Nun werden die Triebwerke eingeschaltet, unser Raumschiff beginnt sich zu bewegen und wird immer schneller. Was wird sich in seinem Inneren tun? Es ist leicht einzusehen, dass alle Gegenstände im Inneren des Schiffes für die Dauer seiner Beschleunigung die Tendenz haben werden, sich gegen den Boden hin zu bewegen, oder dass - will man dieselbe

Erscheinung mit anderen Worten beschreiben - der Boden sich auf diese Objekte zugbewegen wird. Hält zum Beispiel unser Experimentator einen Apfel in der Hand und lässt ihn los, dann wird der Apfel sich mit einer in bezug auf die umliegenden Sterne konstanten Geschwindigkeit weiterbewegen - und zwar mit derselben Geschwindigkeit, die das Raumschiff in dem Moment hatte, als der Experimentator den Apfel losließ. Aber unser Raumschiff bewegt sich ja beschleunigt; infolgedessen wird der Boden der Kapsel, der sich immer schneller und schneller bewegt, den Apfel schließlich einholen und auf ihn auftreffen. Von diesem Augenblick an bleibt der Apfel mit dem Boden in ständiger Berührung, weil er durch die andauernde Beschleunigung gegen ihn gepresst wird.
Für den im Inneren befindlichen Experimentator wird es hingegen so aussehen, als "fiele" der Apfel mit einer bestimmten Beschleunigung zu Boden und übte nach dem Auftreffen infolge seines Gewichts auf diesen einen gewissen Druck aus. Lässt er mehrere Gegenstände los, wird er ferner bemerken, dass sie, sieht er von der Luftreibung ab, alle mit derselben Beschleunigung fallen. Dabei wird er sich erinnern, dass diese Beobachtung mit dem von Galileo Galilei entdeckten Gesetz des freien Falls genau übereinstimmt. Er wird tatsächlich nicht den geringsten Unterschied zwischen den Erscheinungen in seiner beschleunigten Kapsel und den gewöhnlichen Erscheinungen der Gravitation feststellen können. Er kann eine Pendeluhr verwenden, Bücher auf ein Regal stellen, ohne befürchten zu müssen, dass sie wegfliegen, und an die Wand ein Porträt Albert Einsteins hängen, der als erster auf die Gleichwertigkeit von beschleunigten Systemen und Gravitationsfeldern hinwies und daraus die sogenannte Allgemeine Relativitätstheorie entwickelte.



Der Boden wird in Kürze auf den Apfel auftreffe.

Ebenso wie im erstgenannten Beispiel der rotierenden Scheibe können wir auch hier Phänomene feststellen, die Galilei und Newton bei ihren Studien der Schwerkraft nicht bekannt waren. So wird ein die Kapsel durchlaufender Lichtstrahl gekrümmt und einen an der gegenüberliegenden Wand hängenden Schirm je nach Beschleunigung des Raumschiffs an verschiedenen Stellen beleuchten. Von einem außenstehenden Beobachter wird dies

natürlich als Folge einer Überlagerung der gleichförmig geradlinigen Bewegung des Lichts und der beschleunigten Bewegung der Kapsel aufgefasst werden. Auch die Geometrie gerät aus den Fugen: Die Winkelsumme eines aus drei Lichtstrahlen gebildeten Dreiecks wird die Summe zweier rechter Winkel übersteigen und das Verhältnis von Umfang und Druckmesser eines Kreises wird größer als iT sein. Wir haben hier zwei der einfachsten Beispiele beschleunigter Systeme betrachtet, doch die oben beschriebene Äquivalenz gilt für jede beliebige Bewegung eines starren oder deformierbaren Bezugssystems.
Wir kommen nun zu der wichtigsten Frage. Soeben haben wir festgestellt, dass in einem beschleunigten Bezugssystem eine Anzahl von Phänomenen beobachtet werden kann, die im gewöhnlichen Schwerefeld unbekannt sind. Existieren diese neuen Phänomene, wie die Krümmung eines Lichtstrahls oder der langsamere Gang einer Uhr, auch in den Gravitationsfeldern, die von schweren Massen hervorgerufen werden? Mit anderen Worten- Sind die Effekte, die einerseits durch Beschleunigung, andererseits durch Schwerkraft hervorgerufen werden, nicht bloß einander sehr ähnlich, sondern sogar miteinander identisch?

Wie verlockend es vom heuristischen Standpunkt aus auch erscheinen mag, vollständige Identität der beiden Arten von Effekten anzunehmen, so ist es doch eindeutig, dass die endgültige Antwort auf diese Frage nur durch das direkte Experiment gegeben werden kann. Für den menschlichen Geist, der von den Gesetzen des Universums stets Einfachheit und innere Geschlossenheit verlangt, war es eine große Genugtuung, die Existenz dieser neuen Phänomene im gewöhnlichen Schwerefeld tatsächlich nachweisen zu können. Die nach der Hypothese der Äquivalenz von Beschleunigungs- und Gravitationsfeldern vorausgesagten Effekte sind natürlich sehr klein. Das ist übrigens auch der Grund, weshalb man diese Effekte erst entdeckte, nachdem Wissenschaftler eigens nach ihnen zu suchen begonnen hatten.
Wenn wir die oben beschriebenen Beispiele beschleunigter Systeme zu Grunde legen, können wir die Größenordnung der beiden wichtigsten relativistischen Gravitationsphänomene leicht abschätzen: der Veränderung des Gangs von Uhren und der Krümmung eines Lichtstrahls. Zunächst wollen wir uns dem Beispiel der rotierenden Scheibe zuwenden. Wie aus der elementaren Mechanik hervorgeht, ist die auf ein Teilchen der Masse 1 im Abstand r vom Zentrum wirkende Zentrifugalkraft durch die Formel
(1)
F= $r * w^2$
gegeben, wobei w die konstante Winkelgeschwindigkeit der Rotation unserer Scheibe ist.
Die Gesamtarbeit W, die von dieser Kraft während der Bewegung des Teilchens vom Zentrum zur Peripherie verrichtet wird, ist dann
(2)
W= $\frac{1}{2} * R^2 * w^2$ 1 R 2 co 2 >
wobei R der Radius der Scheibe ist.
Dem oben angeführten Äquivalenzprinzip zufolge müssen wir F mit der Schwerkraft auf der Scheibe gleichsetzen; W stellt dann die Differenz zwischen dem im Zentrum und an der Peripherie bestehenden Gravitationspotential dar.
Wie Sie sich aus dem vorhergehenden Vortrag erinnern werden, verlangsamt sich der Gang

einer Uhr, die mit der Geschwindigkeit v bewegt wird, um den Faktor
(3)
$$\cdot\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} = 1-\frac{1}{2}*\frac{v^2}{c^2}+\ldots .$$
Ist v um vieles kleiner als c, kann man die übrigen Glieder der Reihe vernachlässigen.
Entsprechend der Definition der Winkelgeschwindigkeit haben wir v = R co und der "Verlangsamungsfaktor" wird:
(4)
$$1-\frac{1}{2}*\left(\frac{Rw}{c}\right)^2 = 1-\frac{W}{c^2}$$

Dieser drückt die Veränderungen im Gang einer Uhr als Differenz der Gravitationspotentiale aus, die an den jeweiligen Standorten bestehen.
Bringt man eine Uhr am Sockel und eine andere an der Spitze des 300 Meter hohen Eiffelturms an, ist die Potentialdifferenz zwischen diesen beiden Punkten so klein, dass die Uhr am Sockel nur um einen Faktor 0,999 999 999 999 97 langsamer geht.
Weit größer ist der Unterschied hingegen zwischen dem Gravitationspotential auf der Erdoberfläche und dem auf der Sonnenoberfläche. die Uhren auf der Sonne gehen um einen Faktor 0,999 999 5 langsamer als jene auf der Erde. Dies konnte man mit Hilfe exakter Messungen nachweisen. Es hat natürlich niemand eine gewöhnliche Uhr zur Sonne gebracht und dort ihren Gang beobachtet. Physiker haben da weit bessere Methoden. Mit Hilfe eines Spektroskops können wir die Schwingungszeiten verschiedener Atome der Sonnenoberfläche bestimmen und sie mit jenen vergleichen, die wir beobachten, wenn wir dieselben Elemente im Laboratorium in die Flamme eines Bunsenbrenners bringen. Die Schwingungen von Atomen der Sonnenoberfläche müssten sich um den durch Formel (4) gegebenen Faktor verlangsamen; das von ihnen ausgestrahlte Licht sollte daher etwas rötlicher sein als das einer irdischen Lichtquelle. Diese "Rotverschiebung" wurde tatsächlich im Sonnenspektrum und den Spektren verschiedener anderer Sterne beobachtet. Die Messresultate stimmen mit jenen Werten überein, die sich aus unserer theoretisch abgeleiteten Formel ergeben. Der Nachweis der Rotverschiebung bewies, dass die Vorgänge auf der Sonne infolge des höheren Gravitationspotentials tatsächlich etwas langsamer verlaufen. Um ein Maß für die Krümmung eines Lichtstrahls im Gravitationsfeld zu erhalten, ist es zweckmäßig, auf das auf S. 38 erwähnte Beispiel des Raketenschiffs zurückzugreifen. Ist 1 die Länge der Kapsel, dann ist die Zeit t, die das Licht zum Durchqueren der Kapsel benötigt, gegeben durch

(5)
$$t=\frac{1}{c}$$
Während dieser Zeit legt das Schiff, das sich mit einer Beschleunigung g bewegt, die Strecke L zurück. Nach einer Formel der elementaren Mechanik ergibt sich L aus:
(6)

$$L=\frac{1}{2}*gt^2=\frac{1}{2}*g\frac{l^2}{c^2} \quad (6).$$

Der Winkel, der die Ablenkung des Lichtstrahls angibt, ist daher von der Größenordnung

(7)

$$Phi=\frac{L}{l}=\frac{1}{2}*\frac{gl}{c^2}rad$$

Er ist umso größer, je länger der Weg 1 ist, den das Licht im Gravitationsfeld zurückgelegt hat. Die Beschleunigung des Raketenschiffes muss natürlich als Beschleunigung im Gravitationsfeld gedeutet werden. Wenn ich einen Lichtstrahl quer durch diesen Hörsaal schicke, kann ich für 1 circa 100 cm setzen. Die Gravitationsbeschleunigung g auf der Erdoberfläche beträgt 981 cm/s 2 und mit c = 3 - 10 10 cm/s erhalten wir

(8)

$$Phi=\frac{100*981}{2*(3*10^{10})^2}=5*10^{-16}rad=10^{-10}Bogensekunden$$

Sie sehen also, dass die Krümmung des Lichts unter solchen Bedingungen sicherlich nicht zu beobachten ist. In der Nähe der Sonnenoberfläche beträgt der Wert für g jedoch 27 000 und auch der im Schwerefeld zurückgelegte Weg ist sehr groß. Genaue Berechnungen ergeben, dass ein Lichtstrahl in der Nähe der Sonnenoberfläche um 1,75" abgelenkt wird. Wie die Astronomen bei totaler Sonnenfinsternis beobachtet haben, ist die scheinbare Lage von Sternen in der Nähe der Sonne genau um diesen Winkel verschoben. Sie sehen also, auch hier haben die Beobachtungen eine vollkommene Identität der Auswirkungen von Beschleunigung und Gravitation gezeigt.

Nun können wir uns wieder dem Problem der Krümmung des Raums zuwenden. Sie erinnern sich: Unter Zugrundelegung der zweckmäßigsten Definition einer Geraden kamen wir zu dem Schluss, dass die in einem ungleichförmig bewegten Bezugssystem gültige Geometrie von der euklidischen abweicht und dass derartige Räume als gekrümmt anzusehen sind. Da jedes Gravitationsfeld einer bestimmten Beschleunigung des Bezugssystems äquivalent ist, bedeutet dies zugleich auch, dass jeder beliebige Raum, in dem ein Schwerefeld besteht, gekrümmt sein muss; beziehungsweise, geht man einen Schritt weiter: dass ein Gravitationsfeld nur eine physikalische Manifestation der Raumkrümmung ist. Die Krümmung des Raums muss dann an jedem Punkt durch die Verteilung der Massen bestimmt sein und in der Umgebung schwerer Körper ihren maximalen Wert erreichen. Auf das ziemlich komplizierte mathematische System, das man zur Beschreibung der Eigenschaften des gekrümmten Raums sowie deren Abhängigkeit von der Verteilung der Massen verwendet, kann ich hier nicht eingehen. Ich möchte nur noch erwähnen, dass diese Krümmung im allgemeinen nicht durch einen, sondern durch zehn verschiedene Parameter festgelegt wird, die man gewöhnlich die Komponenten des Gravitationspotentials g., nennt und die eine Verallgemeinerung des vorhin mit W bezeichneten Gravitationspotentials der klassischen Physik darstellen. Dementsprechend wird die Krümmung eines jeden Raumpunkts durch zehn verschiedene Krümmungsradien beschrieben, die gewöhnlich mit R., bezeichnet werden. Diese Krümmungsradien sind mit der Verteilung der Massen durch die grundlegende Einsteinsche Gleichung

(9)

$R_v - \frac{1}{2} g_v * R = -k * T_v$ Seite: 42

verknüpft, in der T., von den Feldstärken, Geschwindigkeiten und anderen Eigenschaften des von den schweren Massen hervorgerufenen Gravitationsfeldes abhängt.
Am Schluss des Vortrags möchte ich noch gerne auf eine der interessantesten Folgerungen aus Gleichung (9) hinweisen. Denken wir uns einen Raum gleichmäßig mit Massen erfüllt, etwa unser Weltall mit seinen. Sternen und Sternsystemen, so ergibt sich, dass, sieht man von gelegentlichen besonders starken Krümmungen in der Nähe einzelner Sterne ab, der Raum über große Entfernungen hinweg durchgebend eine Tendenz zu einer gleichförmigen Krümmung aufweisen müsste. In mathematischer Hinsicht bieten sich hier mehrere Lösungen an: einige davon entsprechen einem letztlich in sich geschlossenen Raum endlichen Volumens, andere stellen den Raum als unendlich in Analogie zu einer Sattelfläche dar, wie ich sie zu Beginn des Vortrags beschrieben habe. Die zweite wichtige Schlussfolgerung aus Gleichung (9) ist, dass derart gekrümmte Räume in einem Zustand ständiger Expansion oder Kontraktion begriffen sein müssten. Physikalisch bedeutet dies, dass die Teilchen in diesem Raum entweder voneinander wegfliegen oder umgekehrt aufeinander zufliegen müssten. Ferner lässt sich zeigen, dass bei geschlossenen Räumen endlichen Volumens Expansion und Kontraktion periodisch aufeinander folgen. In diesen Fällen spricht man von pulsierenden Welten. Dagegen befinden sich unendliche "sattelartige" Räume entweder in einem ständigen Zustand der Kontraktion oder der Expansion.
Die Frage, welche von diesen unterschiedlichen Möglichkeiten auf den Raum zutrifft, in dem wir leben, wird nicht von den Physikern, sondern von den Astronomen zu beantworten sein; ich möchte ihr hier nicht nachgehen. Ich möchte bloß erwähnen, dass die astronomische Forschung bisher klar gezeigt hat, dass unser Weltall expandiert. Ob diese Expansion nicht eines Tages in eine Kontraktion umschlagen könnte und ob das Weltall endlich oder unendlich ist, ist allerdings noch nicht endgültig entschieden.

Was der Professor noch nicht wusste

Leider gibt es noch immer keine Uhr auf der Spitze des Eiffelturms, die so genau wäre, dass man den Gangunterschied zwischen Spitze und Sockel nachweisen könnte. Mit Uhren in einem Flugzeug ist dies aber bereits gelungen. Einige Experimente, die in den letzten Jahren ausgeführt wurden, zeigten, dass Uhren in Flugzeugen tatsächlich etwas schneller gehen als auf Erden. Als ich darüber einmal bei einem Vortrag berichtete, erhob sich ein Herr, stellte sich als ehemaliger Botschafter vor und protestierte: Er sei schon sehr oft geflogen, doch habe er noch nie bemerkt, dass seine Uhr im Flugzeug schneller gehe als auf Erden! Es stellte sich aber bald heraus, dass unser Botschafter gewöhnlich keine Atomuhr mit sich führte. Nur diese Uhren, die auch einen Gangunterschied von nur einer Sekunde in einer Million Jahren anzuzeigen vermögen, sind genau genug, um den relativistischen Effekt aus dem Reiche der Träumerei in die Wirklichkeit zu führen. Und diese Wirklichkeit stimmt auf etwa 1 Promille genau mit den Vorhersagen der Relativitätstheorie überein.'

1Diese Genauigkeit wurde bei Raketenexperimenten von R. Vessot und M. Levine, GRG, 10, 181 (1979) erreicht. Das erste Experiment mit Flugzeugen führten J. Hafele und Fl. Keating, Science 177, 166 (1972) durch.

5 Das pulsierende Weltall

Mr. Tompkins hatte das erste Abendessen im Strandhotel in Gesellschaft des Professors und dessen Tochter eingenommen; der Professor hatte über Kosmologie gesprochen, seine Tochter von Kunst geplaudert. Als er letztlich wieder auf sein Zimmer zurückgekehrt war, fiel er erschöpft auf das Bett und zog sich die Decke über die Ohren. Botticelli und Bondi, Salvador Dali und Fred Hoyle, Lemaitre und La Fontaine - alle diese Namen gingen ihm wirr durch den Kopf, bevor er endlich in tiefen Schlaf versank.

Irgendwann um Mitternacht erwachte er mit dem seltsamen Gefühl, statt auf einer komfortablen, gut gefederten Matratze auf etwas Hartem zu liegen. Er öffnete seine Augen und fand sich auf etwas hingestreckt, das er auf den ersten Blick für einen mächtigen Felsen an der Küste hielt. Bald erfasste er, dass es sich wirklich um einen sehr großen Felsblock mit einem Durchmesser von etwa 10 Metern handelte, der ohne jegliche sichtbare Stütze frei im Raum schwebte. Der Fels war mit grünem Moos bedeckt und an einigen Stellen wuchs aus Sprüngen im Gestein niedriges Buschwerk hervor. Der Raum um den Felsblock war von einem unbestimmten Licht erfüllt und sehr staubig. Die Luft enthielt sogar mehr Staub, als er je zuvor gesehen hatte - die Filme eingerechnet, die von Sandstürmen im Mittelwesten handelten. Er band sein Taschentuch vor die Nase und fühlte sich hierauf beträchtlich erleichtert. Doch es gab noch weit gefährlichere Dinge in seiner Umgebung als Staub. Des öfteren schwirrten Steine von der Größe seines Kopfes oder gar noch größere unweit von ihm durch den Raum und schlugen gelegentlich mit einem seltsam dumpfen Geräusch auf seinen Felsen auf. Er bemerkte auch einen oder zwei Felsblöcke, die etwa so groß wie sein eigener waren und in einiger Entfernung durch den Raum schwebten. Während der ganzen Zeit, da er seine Umgebung musterte, klammerte er sich in der ständigen Angst, herabzufallen und von dem staubigen Abgrund verschlungen zu werden, krampfhaft an einige vorspringende Felskanten an. Doch bald wurde er kühner und unternahm einen Versuch, an den Rand des Felsens zu kriechen, um herauszufinden, ob da wirklich nichts darunter sei, das ihn stützte. Als er so dahinkroch, bemerkte er zu seiner großen Überraschung, dass er nicht abstürzte, obwohl er bereits mehr als ein Viertel des Umfanges seines Felsblocks umkrochen hatte, sondern dass ihn sein Gewicht ständig gegen die Oberfläche des Steins drückte. Hinter einer kleinen Erhebung von lockeren Steinen hervorspähend, konnte er genau den Platz unterhalb der Stelle sehen, wo er ursprünglich erwacht war, entdeckte aber nichts, was den Felsen im Raum stützte. Zu seinem größten Erstaunen enthüllte das fahle Licht jedoch die hochgewachsene Gestalt seines Freundes, des alten Professors, der augenscheinlich kopfüber dastand und in ein Büchlein Notizen machte. Allmählich begann Mr. Tompkins zu begreifen. Er erinnerte sich, dass er in seiner Schulzeit gelernt hatte, die Erde sei ein großer, runder Felsen, der sich frei im Raum um die Sonne bewege. Er entsann sich auch des Bildes zweier Antipoden, die auf einander gegenüberliegenden Stellen der Erde standen. Sein Felsen war demnach nichts anderes als ein sehr kleiner Himmelskörper, der alles an sich zog, und er und der alte Professor waren die einzigen Bewohner dieses kleinen Planeten. Dieser Gedanke tröstete ihn ein wenig.

Wenigstens bestand keine Gefahr abzustürzen!
"Guten Morgen", sagte Mr. Tompkins, um die Aufmerksamkeit des alten Professors von dessen Berechnungen abzulenken. Der Professor hob den Blick von seinem Notizbuch: "

Hier gibt es keinen Morgen", sagte er, "dieses Universum besitzt weder Sonne noch irgendwelche andere leuchtende Sterne. Zum Glück weisen die Körper hier gewisse chemische Prozesse an ihrer Oberfläche auf; andernfalls wäre es mir nicht möglich, die Expansion dieses Raums zu beobachten." Damit wandte er sich wieder seinem Notizbuch zu.
Mr. Tompkins fühlte sich recht unglücklich. Dass man auf die einzige lebende Person in diesem ganzen Universum stößt und sie so ungesellig vorfindet! Unerwartetenweise kam ihm da einer der kleinen Meteoriten zu Hilfe; mit einem klatschenden Geräusch schlug der Stein gegen das Büchlein in der Hand des Professors, schleuderte es von ihrem winzigen Planeten fort und sauste selbst mit großer Geschwindigkeit wieder durch den Raum davon.
"Sie werden es wohl nie wiedersehen", meinte Mr. Tompkins, während das Buch durch den Raum segelte und kleiner und kleiner wurde.
Jm Gegenteil", erwiderte der Professor. "Sie müssen wissen, dass der Kaum, in dem wir uns jetzt befinden nicht unendlich ist. Gewiss, in der Schule hat man Sie gelehrt, dass der Raum unendlich ist und dass sich zwei parallele Geraden niemals schneiden. Das stimmt jedoch weder für den Raum, in dem der Rest der Menschheit lebt, noch für diesen unseren Raum hier. Der erstgenannte ist natürlich in der Tat unvorstellbar groß; die Wissenschaftler schätzen seine gegenwärtige Ausdehnung auf ungefähr 10000000000000000000000000 Kilometer, was für normale Begriffe so gut wie unendlich ist. Hätte ich mein Buch dort verloren, so würde es unvorstellbar lang dauern, ehe es wieder zu mir zurückkehrte. Hier hingegen ist die Situation ganz anders. Kurz bevor mir das Notizbuch aus den Händen gerissen wurde, hatte ich mir ausgerechnet, dass dieser Raum nur einen Durchmesser von etwa zehn Kilometern hat, obgleich er im Begriff ist, sich mit großer Geschwindigkeit auszudehnen. Ich erwarte das Buch in längstens einer halben Stunde zurück."
Hier gibt es keinen Morgen.

"Aber", gab Mr. Tompkins zu bedenken, "wollen Sie damit behaupten, das Buch werde sich wie der Bumerang eines australischen Eingeborenen verhalten und in einer gekrümmten

Flugbahn zu Ihren Füßen hier niedersausen?"
"Keine Spur", antwortete der Professor. "Wenn Sie wissen wollen, was sich hier wirklich tut, dann versetzen Sie sich einmal in die Lage eines antiken Griechen, der ja noch nicht wusste, dass die Erde eine Kugel ist. Nehmen wir an, dieser Grieche habe jemanden beauftragt, immer geradeaus nach Norden zu gehen. Malen Sie sich seine Verblüffung aus, wenn sein Kurier plötzlich aus dem Süden zu ihm zurückkehrte! Unser antiker Grieche hatte noch keine Vorstellung von Reisen rund um die Welt (rund um den Erdball, möchte ich sagen); er wäre also überzeugt gewesen, dass sein Kurier die Richtung verfehlt und in einem großen Bogen zu ihm zurückgefunden habe. In Wahrheit ging aber sein Bote die ganze Zeit über die geradeste Linie entlang, die man auf der Erdoberfläche ziehen kann. Dabei lief er jedoch rund um die Erde und kam schließlich aus der entgegengesetzten Richtung zurück. Das gleiche wird mit meinem Buch geschehen, es sei denn, es wird auf seinem Weg von irgendwelchen Steinen getroffen und so von seiner geraden Bahn abgelenkt. Hier, nehmen Sie dieses Fernglas und schauen Sie, ob Sie es noch sehen können."
Mr. Tompkins setzte das Fernglas an seine Augen und es gelang ihm trotz des Staubes, der das Bild ein wenig verschwommen machte, das Notizbuch des Professors zu entdecken, das in weiter Ferne durch den Raum segelte. Was ihm dabei besonders auffiel, war die rosa Farbe, die das Buch und alle sonstigen Gegenstände in dieser Entfernung zeigten.
"Da!" rief er nach einer Weile. "Ihr Buch kommt zurück. ich sehe es immer größer werden."
"Nein~~, sagte der Professor, "es entfernt sich noch immer von uns. Die Tatsache, dass Sie es größer werden sehen, so, als ob es zurückkäme, hat ihre Ursache in der eigenartig fokussierenden Wirkung, die der geschlossene, kugelförmige Raum auf die Lichtstrahlen ausübt. Erinnern wir uns doch an unseren antiken Griechen. Wenn es gelänge - sagen wir infolge atmosphärischer Brechung - die Lichtstrahlen für die Dauer der Reise auf der gekrümmten Oberfläche der Erde festzuhalten, dann wäre er imstande, seinen Kurier unter Zuhilfenahme eines starken Fernglases die ganze Zeit über zu beobachten. Bei der Betrachtung eines Globus kann man feststellen, dass die geradesten Linien auf seiner Oberfläche, die Meridiane, zunächst von einem Pol an auseinanderlaufen, nach Passieren des Äquators sich aber wieder gegen den entgegengesetzten Pol hin einander nähern. Wenn die Lichtstrahlen den Meridianen folgten, dann würden Sie als ein am Pol befindlicher Beobachter einen Menschen, der sich von ihnen entfernt, nur solange kleiner werden sehen, bis er den Äquator überschreitet. Danach würden Sie ihn wieder größer werden sehen und den Eindruck haben, dass er, wenn auch im Rückwärtsgang, zu Ihnen zurückkehre. Sobald er den gegenüberliegenden Pol erreicht hat, würden Sie ihn so sehen, als stünde er neben Ihnen. Sie könnten ihn jedoch ebenso wenig berühren wie das Bild in einem Kugelspiegel. Am Beispiel dieses zweidimensionalen Analogons können Sie sich ausmalen, wie sich Lichtstrahlen im seltsam gekrümmten dreidimensionalen Raum verhalten. Da! Ich glaube, das Bild des Buches ist jetzt ganz nahe." Und wirklich: Als Mr. Tompkins das Fernglas sinken ließ, konnte er das Buch in einer Entfernung von nur wenigen Metern vor sich sehen. Wie merkwürdig es jedoch aussah! Die Konturen waren nicht klar, sondern ziemlich verwaschen; die Formeln, die der Professor auf dessen Seiten notiert hatte, ließen sich kaum mehr erkennen; kurz, das Ganze sah aus wie eine verwackelte und schlecht entwickelte Photographie. Jetzt erkennen Sie", sagte der Professor, "dass wir nur das Bild des Buches vor uns haben, noch dazu stark verzerrt, weil das Licht quer durch das halbe Weltall zu uns kommt. Wenn Sie ganz sicher gehen wollen, so beachten Sie, dass man durch die Seiten des

Buches hindurch die Steine dahinter sehen kann." Mr. Tompkins versuchte, das Buch anzufassen, aber seine Hand durchdrang das Bild, ohne irgendeinen Widerstand zu verspüren. "Das Buch selbst", fuhr der Professor fort, "befindet sich nun in unmittelbarer Nähe des gegenüberliegenden Pols des Universums; was Sie hier sehen, sind bloß zwei Bilder davon. Das zweite Bild ist direkt hinter Ihnen. Sobald sich beide Bilder decken, ist das wirkliche Buch genau am gegenüberliegenden Pol." Mr. Tompkins hörte das nicht; er war zu sehr mit seinen eigenen Gedanken beschäftigt. Er versuchte sich nämlich ins Gedächtnis zurückzurufen, wie denn eigentlich in der elementaren Optik die Abbildung von Gegenständen mittels konkaver Spiegel und Linsen erklärt werde. Als er wieder zu sich kam, waren die beiden Bilder eben wieder dabei, in entgegengesetzte Richtungen zu entschwinden. "Was ist es eigentlich, das den Raum krümmt und all diese kuriosen Effekte nach sich zieht?" fragte er den Professor. "Die Anwesenheit schwerer Masse", lautete die Antwort. "Als Newton das Gravitationsgesetz entdeckte, glaubte er, dass die Schwerkraft eine ganz gewöhnliche Kraft sei - von derselben Art wie jene Kräfte, die zum Beispiel ein zwischen zwei Körpern gespanntes Seil verursacht. Dabei bleibt jedoch noch immer mysteriös, warum unabhängig von Gewicht und Größe alle Körper unter der Wirkung der Schwerkraft dieselbe Beschleunigung erfahren und sich in der gleichen Weise bewegen, sofern man Luftwiderstand und dergleichen auszuschalten vermag. Es war Einstein, der als erster nachwies, dass mit schwerer Masse unmittelbar eine Krümmung des umgebenden Raums verknüpft ist, und dass die Bahnen aller im Gravitationsfeld bewegter Körper nur deshalb gekrümmt sind, weil der Raum selbst gekrümmt ist. Dies zu verstehen dürfte jedoch ohne entsprechende Kenntnis der Mathematik für Sie zu schwierig sein." "Weiß Gott!" sagte Mr. Tompkins. "Und wenn es keine Materie gäbe? Hätten wir dann die Geometrie, die man mich in der Schule lehrte, und würden sich dann parallele Geraden niemals schneiden?" "Sie würden einander nicht schneiden," antwortete der Professor, "allerdings gäbe es dann auch kein materielles Wesen, um dies zu überprüfen."

"Nun - vielleicht hat Euklid gar nicht wirklich existiert und deshalb die Geometrie eines absolut leeren Raums entworfen?"

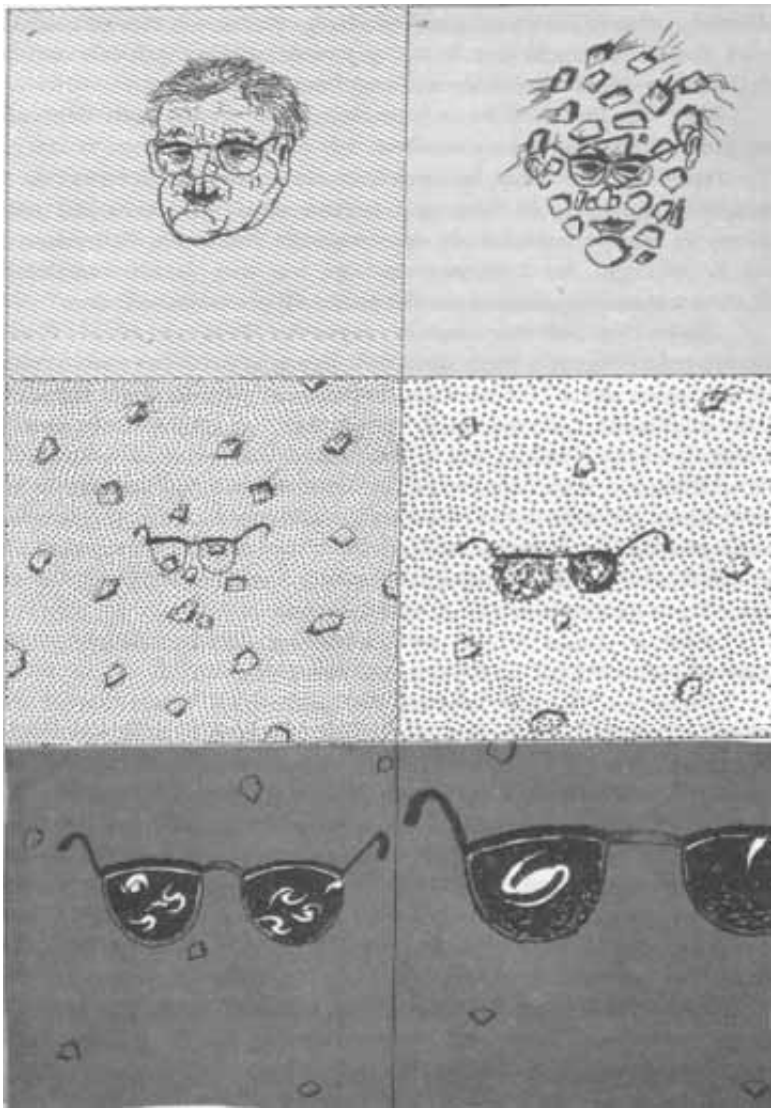
Aber der Professor hatte augenscheinlich wenig Lust, sich auf diese metaphysische Diskussion einzulassen. Das Bild des Buches hatte sich in der Zwischenzeit erneut in die ursprüngliche Richtung entfernt und begann nun ein zweites Mal zurückzukehren. Es war jetzt stärker als zuvor verzerrt und kaum wiederzuerkennen. Den Erklärungen des Professors zufolge war dies darauf zurückzuführen, dass die Lichtstrahlen diesmal um das ganze All gereist waren. "Wenn Sie sich umwenden", sagte der Professor zu Mr. Tompkins, "dann werden Sie mein Buch nach Beendigung seiner Reise rund um die Welt hier eintreffen sehen." Er streckte die Hand aus, fing das Buch auf und schob es in die Tasche. "Wissen Sie," fuhr er fort, "in diesem Universum gibt es so viel Staub und Steine, dass es fast unmöglich ist, * rund um die Welt zu sehen. Übrigens, diese schemenhaften Schatten um uns herum, die Sie viel leicht schon bemerkt haben, sind wahrscheinlich Bilder von uns selbst und von Gegenständen, die uns umgeben. Doch sind sie durch Staub und Unregel
mäßigweiten in der Raumkrümmung so stark verzerrt, dass ich Ihnen nicht einmal sagen
könnte, was hier im einzelnen was ist."

"Gibt es diesen Effekt auch in dem großen Universum, in dem wir früher einmal gelebt haben?" fragte Mr. Tompkins.

"Natürlich," lautete die Antwort, "aber jenes Universum ist so groß, dass das Licht

Milliarden von Jahren dazu braucht, es zu umkreisen. Sie hätten ohne Spiegel sehen können, wie man Ihnen das Haar am Hinterkopf schneidet - allerdings erst Milliarden Jahre nach ihrem Besuch beim Friseur. Im übrigen hätte der interstellare Staub das Bild höchstwahrscheinlich völlig verdunkelt. Ein englischer Astronom äußerte in diesem Zusammenhang einmal, mehr im Scherz, die Vermutung, dass einige der heute am Himmel sichtbaren Sterne nur Bilder von Sternen seien, die vor langer Zeit existierten.
Von der Anstrengung, all diese Erklärungen zu verstehen, ermüdet, blickte Mr. Tompkins um sich und bemerkte voller Überraschung, dass sich das Aussehen des Himmels beträchtlich verändert hatte. Vor allem schien weniger Staub ringsum zu sein. Daher nahm er das Taschentuch, das noch immer vor Mund und Nase gebunden war, ab. Die kleinen Steine flogen jetzt viel seltener vorbei und, wenn sie auf ihrem Felsen aufschlugen, taten sie dies mit viel geringerer Wucht. Sogar die großen Felsblöcke, die er gleich zu Beginn bemerkt hatte, waren nun viel weiter entfernt und kaum noch zu erkennen.

THE PULSATING UNIVERSE



Das Universum expandierte und kühlte dabei unbegrenzt ab (nach einer Zeichnung im Tbe Sydney Daily Telegraph vom 16. Januar 1960).

"Das Leben hier wird zweifellos bequemer", dachte Mr. Tompkins. "Ich habe mich immer

davor gefürchtet, dass einer dieser fliegenden Steine mich treffen könnte." Er wandte sich an den Professor. "Können Sie mir erklären, warum sich unsere Umgebung so verändert hat?"
"Ohne weiteres. Unser kleines Universum dehnt sich enorm schnell aus. Seit wir hier sind, hat es seinen Durchmesser von zehn auf ungefähr zweihundert Kilometer vergrößert. Schon als ich hier ankam, habe ich diese Expansion aufgrund der Rötung entfernter Körper festgestellt."
"Ich sehe auch, dass sich in großer Entfernung alles rötlich verfärbt", sagte Mr. Tompkins. "Aber warum bedeutet das Expansion?"
"Ist Ihnen schon aufgefallen," sagte der Professor, "dass das Pfeifen einer herannahenden Lokomotive beträchtlich höher klingt als das eines sich entfernenden Zuges? Man nennt das den Doppler-Effekt: die Abhängigkeit der Tonhöhe von der Geschwindigkeit der Tonquelle. Wenn sich das Weltall ausdehnt, entfernen sich alle in ihm befindlichen Körper vom Beobachter; ihre Geschwindigkeit ist dabei proportional zur jeweiligen Entfernung vom Beobachter. Deshalb wird das von solchen Körpern ausgestrahlte Licht röter, was in der Akustik einem Sinken der Tonhöhe gleichkommt. Je weiter der Gegenstand entfernt ist, um so schneller bewegt er sich und desto röter erscheint er uns. In unserem guten alten Universum, das sich gleichfalls ausdehnt, gestattet diese Rötung oder Rotverschiebung, wie wir sie nennen, den Astronomen, die Distanz zu weit entfernten Sternennebeln abzuschätzen. So zeigt zum Beispiel einer der nächsten Nebel, der Andromedanebel, eine Rotverschiebung von 0,05 %. Das entspricht einer Entfernung, für deren Überwindung das Licht zwei Millionen Jahre benötigt. Die Sternennebel, die wir gegenwärtig mit den besten Teleskopen gerade noch erfassen können, zeigen eine Rotverschiebung von 15 %, was einer Entfernung von mehreren hundert Millionen Lichtjahren entspricht. Eine andere Klasse von Objekten, die Quasare, weist sogar Entfernungen von einigen Milliarden Lichtjahren auf. Vermutlich ist der Äquator dieses riesigen Universums ungefähr doppelt so weit wie jene Quasare entfernt, womit unseren Astronomen also ein beträchtlicher Teil des gesamten Weltalls zugänglich wäre. Der gegenwärtige Expansionsgrad beträgt rund 0,00000001 % pro Jahr; das heißt, in jeder Sekunde vergrößert sich der Radius des Universums um 3 00 000 Kilometer. Verglichen damit wächst unser kleines Universum hier viel rascher; es vergrößert seinen Durchmesser in einer Minute um etwa 1 %."
"Wird diese Expansion nie aufhören?" fragte Mr. Tompkins.
"0 ja", antwortete der Professor, "und dann beginnt die Kontraktion. Jedes Universum pulsiert zwischen einem sehr kleinen und einem sehr großen Radius. Im großen Universum dauert eine Periode ziemlich lang, nämlich zumindest achtzig Milliarden Jahre. Unser kleines Universum hat hingegen nur eine Periodendauer von beiläufig zwei Stunden. Mir scheint, wir sind gerade im Stadium der größten Expansion. Spüren Sie, wie kalt es geworden ist?"
Tatsächlich gab die thermische Strahlung ihres Universums, die nun über einen sehr großen Raum verteilt war, nur wenig Wärme an den kleinen Planeten ab; die Temperatur lag um den Gefrierpunkt.

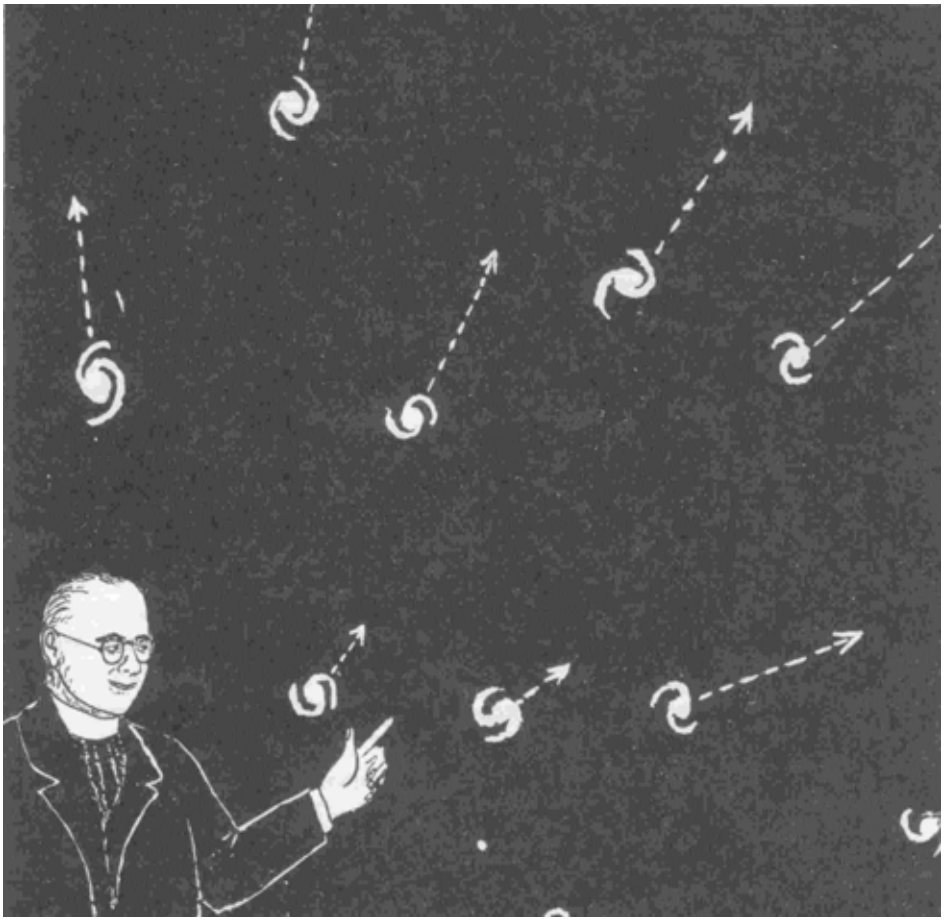
"Wir haben Glück", ergänzte der Professor, "die ursprüngliche Strahlung war stark genug, um auch im jetzigen Stand der Expansion noch etwas Wärme zu liefern. Andernfalls könnte es so kalt werden, dass sich die Luft um unseren Felsen verflüssigte und wir zu Tode frieren würden. Doch schon hat die Kontraktion eingesetzt und bald wird es wieder warm sein."

Mr. Tompkins blickte in die Höhe und bemerkte, dass alle weiter entfernten Objekte ihre Farbe von rot nach violett wechselten. Dies war nach den Worten des Professors darauf zurückzuführen, dass sich nun alle Himmelskörper auf sie zuzugbewegen begannen. Er erinnerte sich auch an das Beispiel des Professors vom hohen Pfeifton einer heranrasenden Lokomotive. Es schauderte ihn.
"Müssen wir denn nicht damit rechnen, dass all die großen Steinbrocken des Universums aufeinander zustürzen und wir zwischen ihnen zermalmt werden?" fragte er den Professor ängstlich.
"Genau das ist zu erwarten", antwortete dieser ruhig. "Bevor es soweit ist, wird die Temperatur vermutlich jedoch so hoch ansteigen, dass es uns in einzelne Atome zerreißt. So werden wir in Kleinformat das Ende unseres großen Universums erleben: Es wird alles zu einer einförmigen, heißen Gaskugel verschmelzen; neues Leben wird erst bei neuer Ausdehnung entstehen."
"Mein Gott!" murmelte Mr. Tompkins. jm großen Universum hätten wir nach Ihrer Aussage noch Milliarden Jahre bis zum Ende vor uns; hier geht mir das alles viel zu schnell! Mir ist jetzt schon heiß, und das im Pyjama!"

"Ziehen Sie ihn lieber nicht aus", sagte der Professor, "es würde nichts nützen. Legen Sie sich einfach ruhig hin und beobachten Sie solange wie möglich."
Mr. Tompkins antwortete nicht. Die heiße Luft war nicht mehr zu ertragen. Der Staub, der immer dichter wurde, hüllte ihn nun vollständig ein. Schließlich kam es ihm so vor, als wäre er in eine weiche, warme Decke gepackt. Er unternahm einen Versuch, sich zu befreien, streckte seine Hand aus - und sie war von kühler, frischer Luft umgeben. Sein erster Gedanke war: "Habe ich jetzt in dieses ungastliche Universum ein Loch gerissen?" Er wollte den Professor fragen, konnte ihn aber nirgends finden. Statt dessen erkannte er im matten Licht des beginnenden Morgens die vertrauten Umrisse seiner Schlafzimmermöbel wieder. Er lag in seinem Bett, die Wolldecke fest um sich geschlungen, und hatte es eben fertig gebracht, eine Hand aus der Umhüllung zu befreien. "Neues Leben beginnt mit Expansion", dachte er, indem ihm die Worte des alten Professors einfielen. "Gott sei Dank, wir expandieren weiterhin!" Und er stand auf und schlenderte ins Bad.

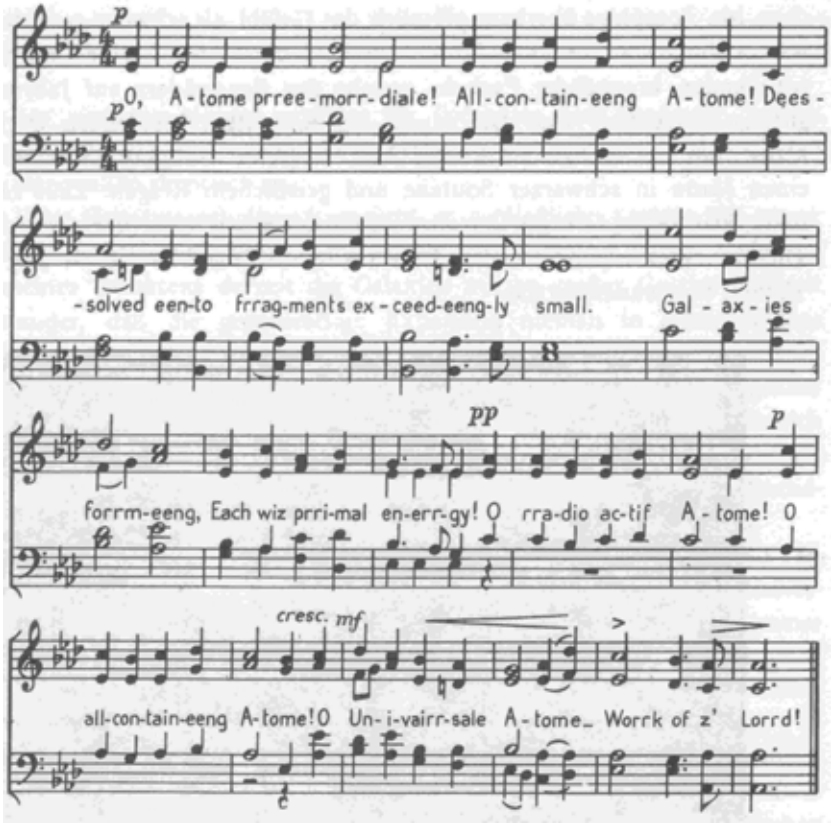
6 Eine kosmische Oper

Am nächsten Morgen erzählte Mr. Tompkins dem Professor, wovon ihm während der vergangenen Nacht geträumt hatte. Der alte Mann hörte ihm einigermaßen skeptisch zu.
"Ein Gravitationskollaps", meinte er schließlich, "würde für unser Universum natürlich ein sehr dramatisches Ende bedeuten. Doch entfernen sich meines Erachtens derzeit die Galaxien mit so großer Geschwindigkeit voneinander, dass die gegenwärtige Expansion niemals in einen Kollaps umschlagen kann. Das Universum wird sich also weiterhin endlos ausdehnen und die gegenseitige Entfernung der Galaxien im Raum wird ständig größer werden. Sobald dann der Kernbrennstoff der Sterne aller Galaxien gänzlich aufgebraucht sein wird und diese erloschen sein werden, wird das Universum - eine Anhäufung kalter, schwarzer Himmelsaggregate - bis in alle Unendlichkeit auseinander fliegen.
Es gibt jedoch auch Astronomen, die anderer Auffassung sind. Sie vertreten die sogenannte Steady - State - Kosmologie, demzufolge sich das Universum im Verlauf der Zeit nicht verändert: demnach existierte es schon immer in etwa dem Zustand, den wir gegenwärtig vor uns haben, und wird bis in alle Ewigkeit so fortbestehen. Gewiss steht diese Theorie in Übereinstimmung mit der guten alten Tradition des Britischen Weltreichs, wonach der Status quo stets aufrechtzuerhalten sei. Und dennoch kann ich mich mit dem Gedanken, dass die Steady - State- Theorie richtig sein soll, nicht so recht anfreunden. Einer der Schöpfer dieser neuen Theorie, ein Professor der theoretischen Astronomie der Universität Cambridge, schrieb übrigens zu diesem Thema eine Oper, die nächste Woche in Covent Garden Premiere hat. Wollen Sie nicht für sich und Maud Karten bestellen und sich die Oper ansehen? Es dürfte recht amüsant werden."
Einige Tage nach ihrer Rückkehr von der Küste, wo es wie immer am Kanal um diese Zeit kalt und regnerisch wurde, saßen Mr. Tompkins und Maud entspannt in den mit rotem Samt überzogenen Stühlen der Oper und warteten darauf, dass der Vorhang sich hebe. Die Ouvertüre begann precipitevolissimevolmente. Der Dirigent musste zweimal den Kragen seines Hemds wechseln, bevor sie zu Ende war. Als der Vorhang schließlich hochging, waren die Zuschauer gezwungen, ihre Hand vor die Augen zu halten, so hell war die Bühne ausgeleuchtet. Das von der Bühne kommende intensive Licht erfüllte den ganzen Raum. vom Parterre bis zum Balkon war alles ein einziges Meer von Licht. Allmählich wurde dieser alleeumfassende Glanz schwächer. Mr. Tompkins überkam plötzlich das Gefühl, als schwebe er in dem nun wieder dunkel gewordenen Raum, der bald darauf durch eine Unzahl rasch rotierender, brennender Fackeln, welche den Feuerrädern auf Jahrmärkten glichen, erleuchtet war. Die Musik des unsichtbar bleibenden Orchesters klang nun nach Orgelmusik und Mr. Tompkins erblickte in seiner Nähe einen Mann in schwarzer Soutane und geistlichem Kragen. Laut Libretto hatte man Abb Georges Lemaitre aus Belgien vor sich, der als erster die Theorie eines expandierenden Universums, die man häufig als Big - Bang' Theorie bezeichnet, vertrat.



Mr. Tompkins sah einen Mann in schwarzer Soutane.
Mr. Tompkins erinnert sich noch an die ersten Strophen von dessen

Majestically

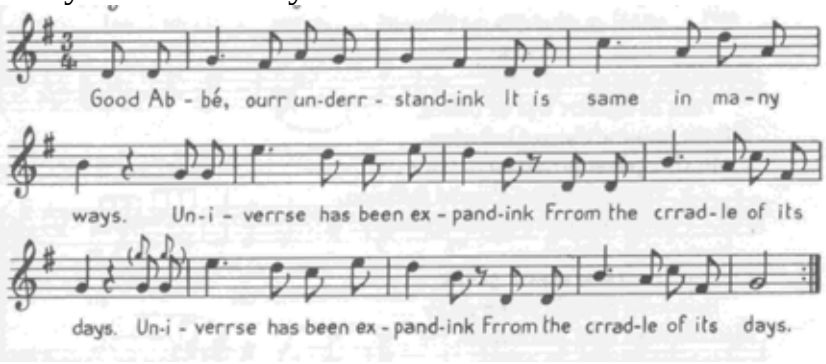


0, Atome primordial! All-containing Atome! Dissolved into fragments exceedingly small. Galaxies forming, Each wiz primal energy! 0, radioactive Atome! 0, all-containing Atome! 0, Universal Atome Work of z' Lorry!

Z'leng evolution Tells of mighty fireworks Zat ended een ashes and smouldairreeng weeps. We stand on z' centauries Feeding suns confronting us, Attempting to rremembairre Z' splendour of z' origin. 0, Undivairrsale Atome Worrk of Z' Lorre!

Als Pater Lemaitre seine Arie beendet hatte, erschien ein großgewachsener Bursche, der, wie man gleichfalls dem Libretto entnehmen konnte, ein russischer Physiker war, George Gamov nämlich, welcher sich die letzten drei Jahrzehnte lang auf Urlaub in den Vereinigten Staaten befunden hatte. Er sang:

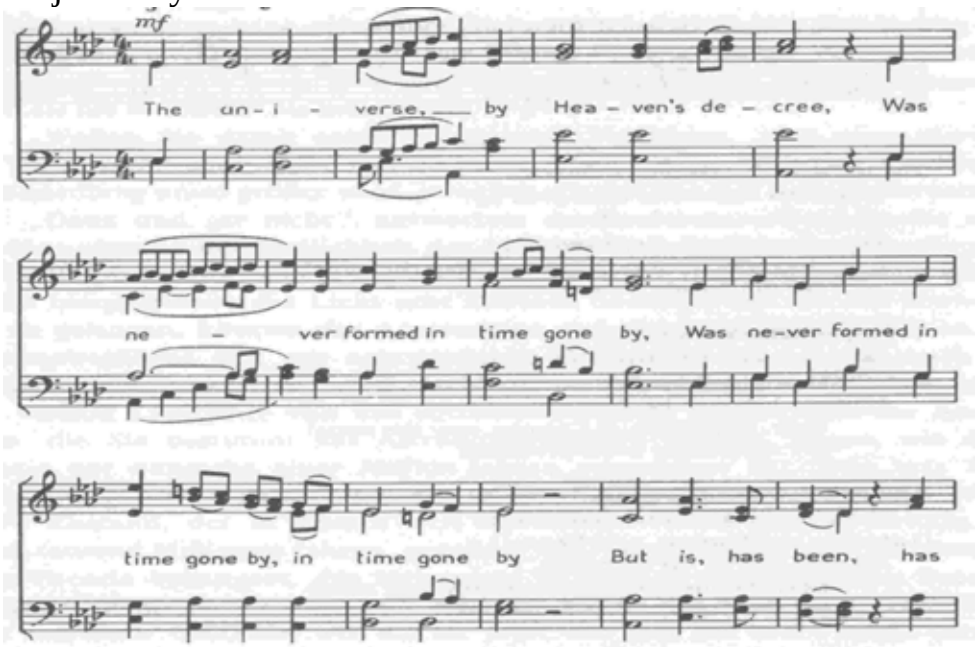
Gaily and drunkenly



Good AbU, our understanding It is same in many ways.
Universe has been expand ink From the cradle of its days. Universe has been expand ink From the cradle of its days. You have told it gains in motion,
I regret to disagree, And we differ in our notion As to how it came to be. And we differ in our notion As to how it came to be.
It was neutron fluid - never
Prrirnal Atom, as you told.
it is infinite, as ever
It Was infinite of old.
it is infinite, as ever
It was infinite of old.
On a limitless pavilion
in collapse, gas met its fate,
Years ago (sorne thousand million)
Having come to densest state.
Yearrs ago (some thousand millien)
Having come to densest state.
All the Space was then tresplendent
At that errucial point in tirne.

Light to matterr was transcendent
Much as meter is, to rhyme.
Light to matter was transcendent
Much as meter is, to rhyme.
For teach ton of radiation
Then of matter was an ounce,
Till the impulse toward inflation
in that great primeval bounce.
Till the imputes toward inflation
In that great primeval bounce.
Light by then was slowly plink.
Hundred million years go by
Matter, over light prevailing,
Is in plentiful supply.
Matter, over light prevailing,
Is in plentiful supply.
Matter then began condensing
(Such are jeans' hypotheses).
Giant, gaseous clouds dispensing
Known as prrotogalaxies.
Giant, gaseous clouds dispensing
Known as prrotogalaxies.
Prrotogalaxies were shattered,
Flying outward through the night.
Stars were frowned from thorn, and scattered
And the Space was filled with light.
Stars were formed from thorn, and scattered
And the Space was flied with light,
Galaxies are ever spinning,
Stars will burn to final spark,
Till our universe is thinning
And is lifeless, cold and dark.
Till our universe is thinning
And is lifeless, cold and dark.
Die dritte Arie, die Mr. Tompkins im Gedächtnis behalten hat, wurde vom Autor der Oper selbst vorgetragen, der plötzlich aus dem Nichts des Raumes heraus zwischen den hell leuchtenden Sternen körperliche Gestalt annahm. Er zog eine soeben entstandene Galaxie aus der Tasche und sang:

Majestically



The universe, by Heaven's decree,
Was never formed in time gone by, But is, has been, shall ever be
For so say Bond, Gold and 1. Stay, 0 Cosmos, 0 Cosmos, stay the same! We the Steady State proclaim!
The aging galaxies disperse,
Burn out, and exit from the scene. But all the while, the universe
Is, was, shall ever be, has been. Stay, 0 Cosmos, 0 Cosmos, stay the same! We the Steady State proclaim!
And still new galaxies condense
From nothing, as they did before. (Linacre and Gammon, no offence!)
All was, will be for evermore. Stay, 0 Cosmos, 0 Cosmos, stay the same! Wie tue Steady State Protzleim!
Doch trotz dieser anfeuernden Worte begannen nach und nach alle Galaxien ringsum zu erlöschen. Schließlich fiel der samtene Vorhang und die Kandelaber des großen Zuschauerraumes erhellten sich.
" Ach, Cyril", hörte er Maud sagen. "Ich weiß, dass Du überall und jederzeit einschlafen kannst, aber ausgerechnet in Covent Garden?! Du hast die ganze Vorstellung verschlafen!"
Als Mr. Tompkins Maud nach Hause brachte, saß der Professor gerade in seinem bequemen Lehnstuhl und hielt die neueste Ausgabe der "Monthly Notices" in den Händen.
"Nun, wie war die Show?" fragte er.
"Wundervoll!" erwiderte Mr. Tompkins. "Besonders beeindruckte mich die Arie vom ewigen Universum. Es klang so beruhigend."
" Seien Sie vorsichtig mit dieser Theorie", meinte der Professor. "Sie kennen doch das Sprichwort Nicht alles, was glänzt, ist Gold'? Ich bin eben dabei, den Artikel eines anderen Herrn aus Cambridge zu lesen - von Martin Ryle nämlich. Er hat ein riesiges Radioteleskop erbaut, das Galaxien noch auf Entfernungen orten kann, die einige Male größer sind als die Reichweite des optischen 5-Meter-Teleskops auf dem Mount Paloma. Seine Beobachtungen haben ergeben, dass diese weit entfernten Galaxien viel näher beisammen liegen als die in

unserer Nachbarschaft."
"Wollen Sie damit sagen," fragte Mr. Tompkins, "dass unser Bereich des Universums eher dünn mit Galaxien besiedelt ist, während die Dichte der Besiedlung umso größer wird, je weiter wir uns von der Erde entfernen?"
"Ganz und gar nicht", antwortete der Professor. "Erinnern Sie sich, dass Sie aufgrund der Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit dort, wo Sie weit in den Raum hinausblicken, zugleich weit zurück in die Vergangenheit schauen. Da beispielsweise das Licht acht Minuten benötigt, um von der Sonne zu uns zu gelangen, können die Astronomen auf der Erde eine Fackel an der Sonnenoberfläche erst mit achtminütiger Verspätung betrachten. Auch die Photographien unseres nächsten Nachbarn im All, einer spiralförmigen, etwa eine Million Lichtjahre von uns entfernten Galaxie im Sternbild der Andromeda, die Sie bestimmt aus Astronomiebüchern kennen, zeigen, wie diese Galaxie vor nunmehr einer Million Jahren ausgesehen hat. Das, was Ryle sieht, oder, besser gesagt, mittels seines Radioteleskops hört, entspricht einem Zustand, der in diesem weit entfernten Winkel unseres Weltalls vor vielen tausend Millionen Jahren gegeben war. Wenn nun, wie die Steady State-Theorie behauptet, das Universum tatsächlich stets im selben Zustand verharrte, dann dürfte sich sein Bild im Laufe der Zeit nicht verändern. Weit entfernte Galaxien, wie wir sie jetzt von hier aus beobachten, dürften dann weder dichter noch weniger dicht verteilt erscheinen als näher gelegene Galaxien. Aus den Ryle'schen Beobachtungen, wonach entfernte Galaxien enger beieinander zu liegen scheinen, ergibt sich andererseits, dass die Galaxien vor vielen tausend Millionen Jahren überall dichter gepackt waren. Das widerspricht jedoch der Steady-State-Theorie und unterstützt die ursprüngliche Ansicht, dass die Galaxien sich voneinander entfernen und die relative Dichte ihrer Population abnimmt. Doch müssen wir selbstverständlich vorsichtig sein und weitere Bestätigungen der Ryle'schen Resultate abwarten."
"Übrigens," fuhr der Professor fort, indem er ein zusammengefaltetes Stück Papier aus der Tasche zog, "hier habe ich ein Gedicht, das einer meiner poetisch inspirierten Kollegen kürzlich zu diesem Thema geschrieben hat." Und er began zu lesen:
‚Your years of toil,'
Said Ryle to Hoyle,
‚Are wasted years, believe me. The steady state is out of date.
Unless my eyes deceive me,
My telescope Has dashed your hope;
‚Your tenets are refuted. Let me be terse, Our universe
Grows daily more dituted!'
Said Hoyle,‚You quote
Lemaitre, 1 note,
And Gammon. Well, forget thorn! That errant gang And their Big Bang
Why aid thorn and abet thorn?
You see, my friend,
It bas no end
And there was no beginning, As Bond, Gold, And 1 will hold
Until out hair is thinning!'
‚Not so!' cried Ryle
With rising bile

And straining at the tether; ‚Far galaxies Are, as one sees,
More tightly packed together!'
‚You make me boil!' Exploded Hoyle, His statement rearranging;, ‚New matter's born Each night and morn. The picture is unchanging!'
‚Come off it, Hoyle! 1 aim to foil
You yet' (The fun commences)
‚And in a while,'
Continued Ryle,
‚111 bring you to your senses!'*

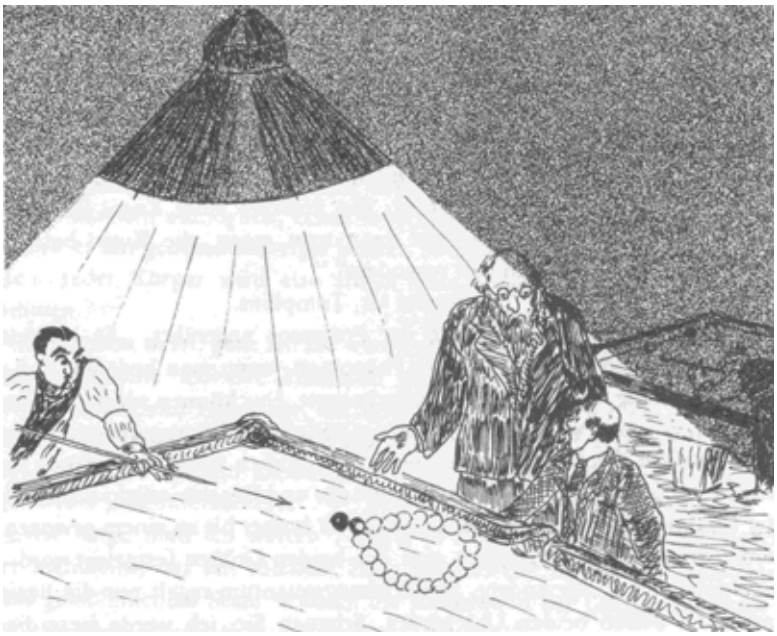
"Bestimmt wird es spannend zu verfolgen, wer in diesem Disput Recht behält", sagte Mr. Tompkins, gab Maud einen Kuss auf die Wange und wünschte beiden eine gute Nacht.

*(Vierzehn Tage vor Veröffentlichung der Erstausgabe dieses Buches erschien ein Aufsatz von F. Hoyle mit dem Titel: "Neueste Entwicklungen auf dem Gebiete der Kosmologie" (Nature, Okt. 9, 1965, S. III). Hoyle schreibt darin: "Ryle und seine Mitarbeiter haben Radioquellen entdeckt ... Alles deutet darauf hin, dass das Universum in der Vergangenheit eine größere Dichte als heute besaß." Dennoch hat sich der Autor entschlossen, die Verse der "Kosmischen Oper" nicht zu verändern, da ja Opern, kaum sind sie geschrieben, zu Klassikern werden. Und schließlich singt auch heute noch Desdemona ihre schöne Arie, bevor sie sterben muss, nachdem Othello sie erwürgt hat.)

7 Quantenbillard

Nach einem langen, mühevollen Arbeitstag in der Bank, wo man über eine Grundstücksaktion verhandelt hatte, befand sich Mr. Tompkins soeben auf dem Heimweg. Dieser Führte ihn an einem Pub vorbei. Er fasste den Entschluss einzukehren, um ein Glas Bier zu trinken. Doch dabei blieb es nicht - und bald erfasste Mr. Tompkins ein heftiges Schwindelgefühl. Im Hintergrund des Lokals gab es ein Billardzimmer, in dem mehrere Männer mit hinaufgeschobenen Hemdärmeln an einem in der Mitte des Raums befindlichen Tisch spielten. Mr. Tompkins erinnerte sich vage, hier schon einmal gewesen zu sein. Damals hatte ihn einer seiner Kollegen aus der Bank mitgenommen, um ihm Billard beizubringen. Er näherte sich dem Tisch und beobachtete das Spiel. Irgendetwas stimmte da nicht. Einer der Spieler legte eine Kugel auf den Tisch und versetzte ihr mit dem Queue einen Stoß. Zu seinem großen Erstaunen sah Mr. Tompkins, wie sich die rollende Kugel "zu verschmieren" begann. Dies war die einzige Bezeichnung, die er für das seltsame Verhalten der Kugel finden konnte. Indem sie über das grüne Spielfeld rollte, verlor sie nämlich ihre scharfen Umrisse und schien mehr und mehr zu verschwimmen. Man hatte den Eindruck, daß es nicht eine einzige Kugel war, die da über den Tisch rollte, sondern daß es mehrere waren, die sich gegenseitig teilweise durchdrangen. Mr. Tompkins hatte ähnliches schon öfter erlebt, doch hatte er heute noch keinen einzigen Tropfen Whisky zu sich genommen. Es war ihm daher völlig unklar, wie ihm ausgerechnet jetzt etwas derartiges passieren konnte. "Na schön", dachte er, "dann wollen wir einmal sehen, was geschieht, wenn dieses schleimige Etwas auf eine zweite Kugel trifft."

Der Spieler, der die Kugel gestoßen hatte, war offensichtlich Experte auf seinem Gebiet, denn sie traf, ganz wie beabsichtigt, eine zweite, die vor ihr lag. Der Zusammenprall verursachte einen lauten Ton, und beide Kugeln, die ruhende und die stoßende Kugel (Mr. Tompkins konnte dabei nicht beurteilen, welche von den beiden was war), stoben "in alle möglichen Richtungen" auseinander. ja, es war wirklich seltsam! Man hatte nun nicht bloß zwei etwas patzig aussehende Kugeln vor sich, sondern es schien ihrer unzählig viele zu geben, und alle waren äußerst unscharf und verschwommen.
Sie schossen, geht man von der Richtung des ursprünglichen Aufpralls aus, innerhalb eines Winkels von 1800 umher. Das Ganze glich einer seltsamen, sich vom Kollisionspunkt her ausbreitenden Welle.
Mr. Tompkins konnte allerdings feststellen, daß sich der Großteil der Kugeln dennoch in der ursprünglichen Stoßrichtung weiterbewegte.
"Aha, die Streuung einer s-Welle", sagte da eine vertraute Stimme hinter ihm - Mr. Tompkins erkannte den Professor.
"Sehen Sie denn", ereiferte sich Mr. Tompkins, "auch hier vielleicht irgendwelche Krümmungen? Der Tisch da scheint mir jedenfalls völlig eben zu sein."
"Ganz richtig," erwiderte der Professor, "der Raum hier ist tatsächlich ziemlich eben. Was Ihnen auffällt, ist ein quantenmechanisches Phänomen. "



Der weiße Ball rollt in alle Richtungen.
"Ach ja, die Matrix!" bemerkte Mr. Tompkins sarkastisch.
"Oder vielmehr die Unschärfe der Bewegung", sagte der Professor. "Der Besitzer dieses Raumes hat verschiedene Gegenstände zusammengetragen, die, wenn ich mich so ausdrücken darf, an‚Quantenelephantiasis' leiden. Zwar unterliegen alle Körper in der Natur den Quantengesetzen, doch ist das sogenannte Wirkungsquantum, das dieses Phänomen beherrscht, winzig klein. Drückt man seinen Wert in Ziffern aus, so stehen hinter dem Komma vierunddreißig Nullen. Für unsere Kugeln hier ist diese Konstante dagegen viel größer - nämlich ungefähr gleich eins - und so können Sie leicht mit freiem Auge Dinge beobachten, die der Naturwissenschaft erst mit Hilfe außerordentlich empfindlicher und hochentwickelter Methoden zugänglich geworden sind." Der Professor wurde an diesem

Punkt einen Augenblick lang nachdenklich.
"Ich möchte ja nichts unterstellen," setzte er fort, "doch würde ich zu gerne wissen, woher der Mann diese Kugeln hat. Genaugenommen dürfte es sie ja gar nicht geben, denn in unserer Welt hat das Wirkungsquantum für alle Körper denselben kleinen Wert."
"Vielleicht hat er sie aus einer anderen Welt importiert?" meinte Mr. Tompkins. Aber der Professor gab sich mit dieser Erklärung nicht zufrieden und blieb misstrauisch. "Sie haben ja gesehen," fuhr er fort, "daß sich die Kugeln verschmierten. Das bedeutet, daß ihre jeweilige Lage am Tisch nicht eindeutig festgelegt ist. Die Position einer Kugel läßt sich also nicht exakt angeben. Bestenfalls kann man sagen, die Kugel befinde sich "zumeist hier" und "zum Teil woanders"."
"Wie merkwürdig", murmelte Mr. Tompkins.
Jm Gegenteil", beharrte der Professor ungerührt. "Es handelt sich hier um ein durchaus alltägliches Phänomen, wenn man bedenkt, daß derartiges ja ständig bei allen Körpern vorkommt. Nur können wir Menschen diese Ungenauigkeiten wegen der geringen Größe des Wirkungsquantums und unserer groben Beobachtungsmethoden gewöhnlich nicht bemerken. Deshalb zogen wir irrtümlich den Schluß, daß Lage und Geschwindigkeit stets eindeutig bestimmt sind. In Wirklichkeit sind sie immer bis zu einem gewissen Grad unbestimmt; und: je genauer eine der beiden Größen festgelegt wird, umso verschmierter ist die andere. Das Wirkungsquantum regelt nur die Beziehung zwischen diesen beiden Unschärfen. Schauen Sie, ich werde jetzt die Lage der Kugel dadurch begrenzen, daß ich sie in diesen hölzernen Triangel lege."
Sobald die Kugel im Triangel lag, erfüllte ein elfenbeinfarbener Schimmer das ganze Dreieck.
"Da haben Sie es!" sagte der Professor. "Ich habe die Lage der Kugel auf die Grenzen dieses Dreiecks festgelegt, also bis auf wenige Zentimeter bestimmt. Das Ergebnis ist eine beachtliche Unschärfe der Geschwindigkeit, das heißt die Kugel bewegt sich in ihrer Umgrenzung blitzschnell hin und her. "
, , Können Sie nicht zum Stillstand bringen?" fragte Mr. Tompkins.
"Nein - das ist physikalisch unmöglich. Jeder Körper führt in einem abgeschlossenen Raum eine gewisse Bewegung aus. Wir Physiker nennen das die Nullpunktsschwingung. Ein Beispiel ist die Bewegung der Elektronen im Atom."

Mr. Tompkins beobachtete gerade noch, wie die Kugel in ihrem Gefängnis hin und her schoss wie ein Tiger in seinem Käfig, als sich plötzlich etwas sehr Ungewöhnliches ereignete. Die Kugel "sickerte" einfach durch die Wand des Triangels und rollte im nächsten Moment in einen entfernten Winkel des Tisches. Das sonderbare daran war, daß sie nicht etwa über die hölzerne Einfassung sprang, sondern diese einfach durchdrang, ohne sich dabei von der Tischfläche zu erheben.
"Recht geschieht Ihnen", sagte Mr. Tompkins. "Ihre Nullpunktbewegung ist Ihnen davongelaufen. Gehört das etwa auch zu den Spielregeln?"
"Warum denn nicht", erwiderte der Professor. "Tatsächlich haben wir es hier mit einer der interessantesten Erscheinungen der Quantentheorie zu tun. Es ist nämlich unmöglich, etwas innerhalb einer Umgrenzung festzuhalten, sofern es nur genügend Energie besitzt, nach Durchqueren der Wand wegzulaufen. Jeder Körper wird also früher oder später Hinducksickern' und entkommen. "

"Wenn dem so ist, gehe ich nie wieder in den Zoo!" sagte Mr. Tompkins entschlossen. Seine lebhafte Phantasie gaukelte ihm bereits schreckliche Bilder von Löwen und Tigern vor, die durch die Stäbe ihrer Käfige "hindurchsickerten". Dann wieder malte er sich aus, wie ein in der Garage sicher abgestelltes Auto ganz wie ein klassisches, mittelalterliches Gespenst durch die Garagenmauer "hindurchsickerte".
"Wie lange muß ich warten", fragte er den Professor, "bis ein Auto - aber nicht eins, das aus solchem Zeug hier besteht, sondern ein richtiges aus ganz gewöhnlichem Stahl - durch die Betonwand der Garage hindurchsickert'? So etwas würde ich zu gerne einmal erleben!"
Nach einer kurzen Kopfrechnung gab der Professor bereitwillig Auskunft: "Es werden so an die 1000 000 000 000 000 Jahre sein. "
Obwohl Mr. Tompkins von den Bankkonten her an große Zahlen gewöhnt war, vermochte er sich die vom Professor genannten Nullen nicht zu merken. jedenfalls brauchte er sich keine Sorgen zu machen, daß ihm sein Auto von zu Hause ausreißen' würde.
"Selbst wenn ich alles glaube, was Sie soeben erzählt haben, verstehe ich doch noch immer nicht, wie man diese Dinge beobachten kann - sieht man von den Kugeln hier nun einmal ab.“

Das Auto erschien wie ein Geist aus dem Mittelalter.
"Das ist ein vernünftiger Einwand", meinte der Professor. "Natürlich liegt es mir fern zu behaupten, daß man Quantenphänomene an Gegenständen unseres täglichen Lebens beobachten kann. Der springende Punkt bei diesen Überlegungen ist, daß die Auswirkungen der Quantengesetze um vieles leichter beobachtbar sind, wenn wir es mit sehr kleinen Massen, etwa mit Atomen oder Elektronen, zu tun haben. Für diese Teilchen sind die Quanteneffekte so groß, daß sich die gewöhnliche Mechanik als unzulänglich erweist. Der Zusammenstoß zweier Atome sieht genauso aus, wie der Zusammenstoß der beiden Billardkugeln, den Sie soeben beobachtet haben. Auch die Bewegung der Elektronen im Inneren eines Atoms gleicht sehr weitgehend der Nullpunktsschwingung jener Kugel im hölzernen Triangel."

"Und laufen die Atome sehr oft aus ihrer Garage hinaus?" fragte Mr. Tompkins.
"Durchaus. Sie haben gewiss schon von den radioaktiven Stoffen gehört, deren Atome spontan zerfallen und dabei sehr schnelle Teilchen
emittieren. Ein solches Atom, genauer gesagt dessen Zen * trug, der Atomkern, kann ohne weiteres mit einer Garage verglichen werden, in der die Autos,
das heißt die anderen Teilchen, aufbewahrt sind. Es kommt nun vor, daß diese Teilchen ausbrechen und die Wände des Kerns durchdringen - oft, nachdem sie es nicht einmal eine Sekunde in ihrem Gefängnis ausgehalten haben. In solchen Kernen sind Quantenphänomene etwas ganz Alltägliches! "
Die lange Unterhaltung hatte Mr. Tompkins sehr ermüdet. Zerstreut blickte er um sich. Eine riesige Standuhr in der Ecke des Raums zog seine Aufmerksamkeit an. Langsam schwang ihr altmodisches Pendel hin und her.
"Ich sehe, Sie interessieren sich für diese Uhr", sagte der Professor. "Der Mechanismus der Uhr ist allerdings recht ungewöhnlich, mag er heute auch schon überholt sein. Die Uhr zeigt, was sich die Menschen seinerzeit unter Quantenphänomenen vorstellten. Das Pendel ist so eingerichtet, daß sich seine Amplitude nur stufenweise vergrößern kann. Heutzutage dagegen bevorzugen alle Uhrmacher die Patent-Verschmier-Pendel. "
"Ich wünschte, ich würde all diese komplizierten Dinge verstehen", seufzte Mr. Tompkins.
"Ausgezeichnet", erwiderte der Professor. "Ich war gerade auf dem Weg zu meinem Vortrag über Quantentheorie, als ich sie zufällig durch das Fenster sah und einen Sprung hier herein machte. Jetzt aber muß ich gehen, wenn ich mich nicht verspäten will. Haben Sie Lust mitzukommen?"
Wie gewöhnlich war das große Auditorium voll besetzt und Mr. Tompkins war sehr froh, wenigstens auf den Stufen Platz zu finden.
Meine Damen und Herrn - begann der Professor:
In den beiden vorangegangenen Vorträgen habe ich darzulegen versucht, wie die Entdeckung einer obersten Grenze für alle physikalischen Geschwindigkeiten und die Analyse des Begriffs der Geraden zu einer vollständigen Umformung der klassischen Vorstellungen von Raum und Zeit geführt haben.
Die Entwicklung der kritischen Analyse der physikalischen Grundlagen machte hier jedoch nicht halt; vielmehr standen noch verblüffendere Erkenntnisse bevor. Ich beziehe mich hier auf jenen Teil der Physik, der unter dem Namen Quantenmechanik bekannt ist und der sich weniger mit den Eigenschaften von Raum und Zeit selbst beschäftigt als vielmehr mit den Wechselwirkungen zwischen materiellen Körpern und deren räumlicher und zeitlicher Bewegung.
In der klassischen Physik hat man es immer als selbstverständlich betrachtet, daß die Wechselwirkung zwischen zwei beliebigen Körpern soweit verringert werden kann, wie es die Versuchsbedingungen erfordern, ja daß sie nötigenfalls praktisch auf Null reduziert werden kann. Im Verlauf von Untersuchungen der bei bestimmten Prozessen entwickelten Wärme hat man zum Beispiel stets befürchtet, daß die Einführung eines Thermometers eine gewisse Wärmemenge entziehen und somit eine Störung im regulären Ablauf des beobachteten Prozesses hervorrufen würde. Der Experimentator war jedoch stets überzeugt, den Störfaktor durch die Verwendung eines kleineren Thermometers oder eines winzigen Thermoelements je nach erforderlicher Genauigkeit beliebig reduzieren zu können.
Die Überzeugung, daß jeder physikalische Prozess zumindest grundsätzlich mit jeder

gewünschten Genauigkeit beobachtet werden könne, ohne dabei selbst beeinträchtigt zu werden, war so gefestigt, daß sich niemand der Mühe unterzog, diese Voraussetzung explizit zu formulieren. Alle hierbei auftretenden Probleme schienen rein technischer Natur zu sein. Zu Beginn unseres Jahrhunderts zwangen jedoch eine Reihe empirisch gefundener Fakten die Physiker zu dem Schluß, daß die Dinge in Wirklichkeit wesentlich komplizierter liegen mussten und dass es in der Natur eine feststehende untere Grenze der Wechselwirkung gibt, die nickt unterschritten werden kann. Diese naturgegebene Beschränkung der Genauigkeit ist bei allen Vorgängen des täglichen Lebens so unbedeutend, daß wir sie vernachlässigen können, sie wird jedoch wesentlich, wenn wir uns mit Wechselwirkungen in so fragilen mechanischen Systemen wie Atomen und Molekülen beschäftigen.

Im Jahre 1900 kam der deutsche Physiker Max Planck bei der theoretischen Untersuchung der Gleichgewichtsbedingungen zwischen Materie und Strahlung zu dem überraschenden Ergebnis, dass ein solches Gleichgewicht nur dann möglich ist, wenn man annimmt, dass die Wechselwirkung zwischen Materie und Strahlung nickt, wie man immer geglaubt baute, kontinuierlich, sondern in einer Abfolge einzelner Stöße erfolgt. Bei jedem dieser elementaren Akte wird nun eine bestimmte Energiemenge von der Strahlung auf die Materie übertragen und umgekehrt. Um das gesuchte Gleichgewicht zu erhalten und gleichzeitig Übereinstimmung mit den experimentellen Fakten zu erzielen, war es notwendig, eine einfache mathematische Beziehung einzuführen, in der die bei jedem Stoß übertragene Energiemenge und die Frequenz (also die reziproke Schwingungsdauer) des Prozesses, der zur Übertragung der Energie führt, zueinander proportional gesetzt werden.

Nachdem Planck den Proportionalitätsfaktor mit "b" bezeichnet hatte, ergab sich damit zwangsläufig für die kleinste übertragbare Energiemenge oder das Quant der Ausdruck

(1)

$E = bv$

worin v die Frequenz bedeutet. Die Konstante b hat den numerischen Wert 6,67-10-34 js und wird gewöhnlich das Plancksche Wirkungsquantum (oder Quantenkonstante) genannt. Sein kleiner numerischer Wert hat zur Folge, daß Quantenphänomene im täglichen Leben gewöhnlich nicht beobachtbar sind.

Die Weiterentwicklung der Planckschen Idee verdanken wir Einstein, der den Schluß zog, daß Strahlung nickt nur in bestimmten, diskreten Mengen emittiert wird, sondern daß sie überbauet nur in dieser Form existiert, das beißt aus einer Anzahl diskreter Energiepakete bestrebt, die er Lichtquanten nannte.

Insofern sich Lichtquanten stets in Bewegung befinden, müssen sie neben ihrer Energie bv auch einen bestimmten mechanischen Impuls besitzen, der nach der relativistischen Mechanik gleich dem Quotienten aus Energie und Lichtgeschwindigkeit c sein muß. Erinnern wir uns, daß Frequenz und

Wellenlänge X des Lichtes durch die Beziehung v = c verknüpft sind, dann können wir für den Impuls p eines Lichtquants

(2)

$$p=\frac{bv}{c}=\frac{b}{\lambda}$$

schreiben.

Da die durch den Stoß eines bewegten Teilchens hervorgerufene mechanische Wirkung durch dessen Impuls gegeben ist, müssen wir folgern, daß die Wirkungen der Lichtquanten

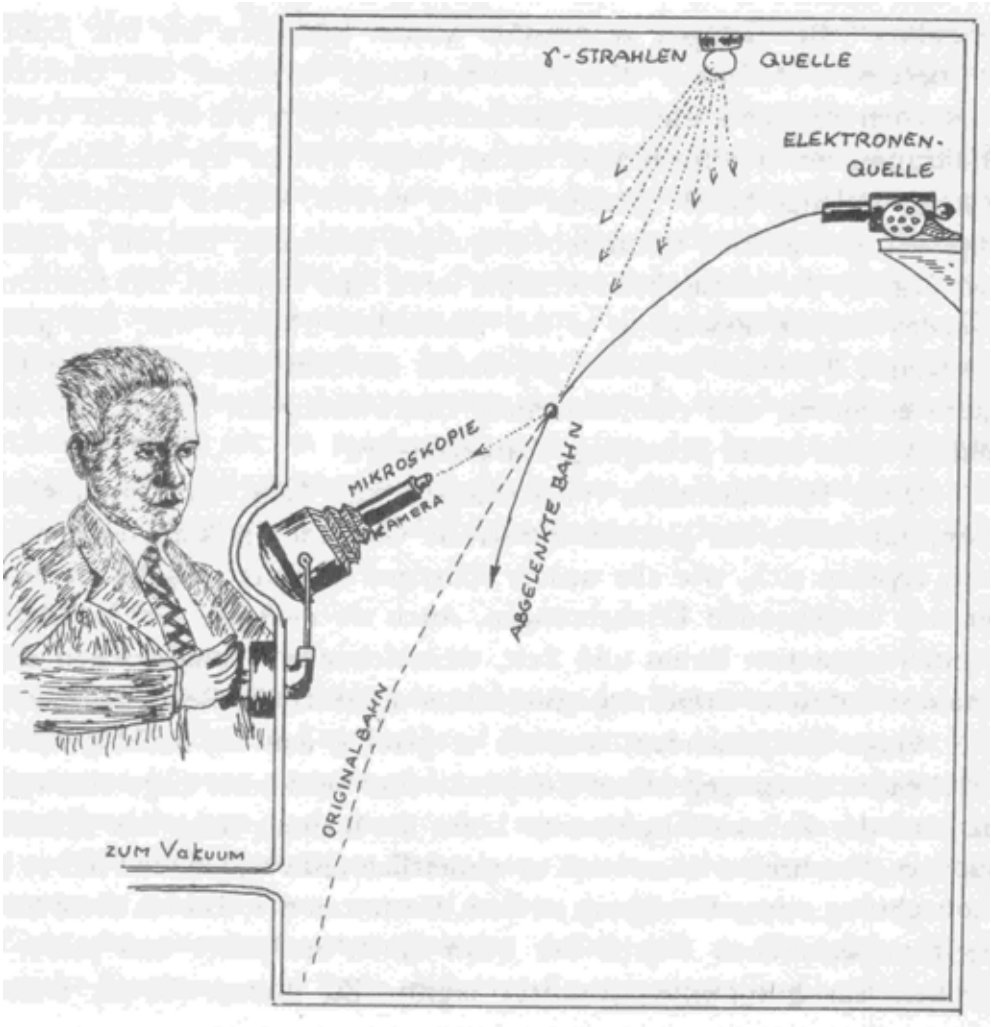
mit abnehmender Wellenlänge zunimmt.
Einen der besten experimentellen Beweise für die Richtigkeit der Annahme von Lichtquanten und der ihnen zugeschriebenen Größen Energie und Impuls haben die Forschungsergebnisse des amerikanischen Physikers Artbur Compton erbracht. Seine Untersuchungen von Zusammenstößen zwischen Lichtquanten und Elektronen bewiesen, daß sich Elektronen, die durch Einwirkung eines Lichtstrahls in Bewegung gesetzt werden, genauso verhalten, als wären sie von einem Teilchen getroffen worden, dessen Energie und Impuls durch die Formeln (1) und (2) gegeben sind. Auch die Lichtquanten selbst zeigten nach dem Zusammenstoß mit dem Elektron bestimmte Veränderungen ihrer Frequenz, die mit den theoretischen Vorhersagen vortrefflich übereinstimmten.
Heute dürfen wir behaupten, daß die Quantelung der Strahlung, soweit es sich um Wechselwirkungen mit Materie handelt, experimentell völlig abgesichert ist.
Die weitere Entwicklung der Quantentheorie verdanken wir dem berühmten dänischen Physiker Niels Bobr, der im Jahre 1913 als erster den Gedanken aussprach, daß die innere Bewegung jedes mechanischen Systems nur eine bestimmte, diskontinuierliche Folge möglicher Energiewerte annehmen darf und daß eine Änderung des Bewegungszustandes nur sprunghaft, in endlichen Stufen, stattfinden kann, wobei bei jedem dieser Übergänge eine bestimmte Energiemenge abgestrahlt wird. Die mathematischen Auswahlregeln, durch weiche die möglichen Zustände mechanischer Systeme festgelegt sind, sind wesentlich komplizierter als im Fall der Strahlung; wir wollen hier nicht näher darauf eingehen. Ich möchte diesbezüglich nur vermerken, daß so, wie im Falle der Lichtquanten der Impuls durch die Wellenlänge des Lichts definiert ist, im mechanischen System der Impuls jedes bewegten Teilchens mit den geometrischen Ausmaßen des Raumbereichs, in dem es sich bewegt, verknüpft ist. Seine Größenordnung ist durch den Ausdruck
(3)

$$\text{p Teilchen} \cong \frac{b}{l} \tag{3}$$

gegeben, wobei 1 hier die lineare Ausdehnung des Raumes darstellt, in dem die Bewegung stattfindet. Entsprechend dem extrem kleinen Wert des Wirkungsquantums können Quantenphänomene nur für Bewegungen innerhalb so kleiner Bereiche von Bedeutung sein, wie es die Räume im Inneren der Atome und Moleküle sind. Diese Phänomene spielen daher eine sehr wichtige Rolle in unserer Kenntnis vom inneren Aufbau der Materie.
Einer der unmittelbarsten Beweise dafür, daß es für solche fragile mechanische Systeme eine Serie diskreter Energiezustände gibt, haben die 74
Experimente von James Franck und Gustav Hertz erbracht. Sie bombardierten Atome mit Elektronen verschiedener Energie und entdeckten dabei, daß nur dann Änderungen im Zustand des Atoms eintraten, wenn die Energie der als Geschosse benutzten Elektronen bestimmte Werte annahm. Lag dagegen die Energie der Elektronen unter einem bestimmten Grenzwert, dann konnte man überhaupt keine Wirkung beobachten. In diesem Falle reichte nämlich die von jedem Elektron mitgeführte Energiemenge nicht aus, um das Atom vom ersten in den zweiten Quantenzustand zu heben.
Am Ende des vorläufig ersten Stadiums der Entwicklung der Quantentheorie könnte man die Situation daher folgendermaßen beschreiben: Zwar wurden die fundamentalen Vorstellungen und Prinzipien der klassischen Physik nicht modifiziert, aber sie wurden durch einigermaßen geheimnisvoll erscheinende Quantenbedingungen mehr oder weniger eingeschränkt, indem

aus dem klassischen Kontinuum möglicher Bewegungen eine diskrete Folge "erlaubter" Bewegungen ausgewählt wurde. Bemühen wir uns jedoch um ein tieferes Verständnis des Zusammenhangs zwischen den Gesetzen der klassischen Mechanik und den Quantenbedingungen, wie sie unser erweiterter Erfahrungsbereich erforderlich macht, dann werden wir einsehen, daß ein System, welches beide Systeme in sich vereint, logisch unhaltbar ist. Die empirisch gefundenen Quantenbedingungen bewirken, daß die grundlegendsten Begriffe der klassischen Mechanik ihren Sinn verlieren. Das fundamentale Konzept für die Bewegung in der klassischen Theorie war, daß jedes sich bewegende Teilchen in jedem gegebenen Moment eine bestimmte Lage im Raum einnimmt und eine bestimmte Geschwindigkeit besitzt, die den zeitlichen Verlauf seiner Bewegung, charakterisiert.

Diese fundamentalen Vorstellungen von Lage, Geschwindigkeit und Bahn, auf denen das gesamte kunstvolle Gebäude der klassischen Mechanik ruht, ergaben sich, wie alle unsere sonstigen Begriffe, aus der Beobachtung der uns umgebenden Erscheinungen. Auch sie mussten, wie die klassischen Vorstellungen von Raum und Zeit, weitreichende Veränderungen erfahren, sobald sich unserer Erfahrung neue, bisher unerforschte Bereiche erschlossen.
Frage ich jemanden, weshalb er glaube, daß ein beliebiges bewegtes Teilchen zu einem gegebenen Zeitpunkt eine bestimmte Lage einnimmt und im Lauf der Zeit eine bestimmte Linie, die man als Bahn des Teilchens bezeichnet, beschreibt, dann wird er vermutlich antworten. Weil ich es bei der Beobachtung seiner Bewegung so sehe. Gestatten Sie, daß ich diese Methode, die zum klassischen Begriff der Bahn führt, analysiere und prüfe, ob sie wirklich ein bestimmtes Resultat ergibt. Zu diesem Zweck wollen wir uns einen Physiker denken, der mit Hilfe eines äußerst empfindlichen Apparates die Bewegung eines kleinen materiellen Körpers zu verfolgen versucht, der von der Wand seines Labors weggeschleudert wird. Er beschließt, seine Beobachtungen dadurch zu machen, daß er "sieht", wie sich der Körper bewegt, und benutzt zu diesem Zweck einen kleinen, aber sehr präzisen Theodoliten. Um den Körper zu sehen, muß er ihn natürlich beleuchten, und da er weiß, daß Licht auf Körper einen Druck ausübt und so die Bewegung stören könnte, beschließt er, den Körper immer dann, wenn er ihn beobachten will, mit Hilfe eines Blitzlichtes kurz anzuleuchten. Beim ersten Versuch möchte er nur zehn Punkte der Wurfbahn beobachten und wählt daher sein Blitzlicht so schwach, daß die Wirkung des gesamten Lichtdrucks während der zehn aufeinanderfolgenden Beobachtungen noch innerhalb der Genauigkeitsgrenzen liegt, die er benötigt. Er erhält also durch zehnmaliges Beleuchten des fallenden Körpers zehn Punkte der Wurfbahn mit der gewünschten Präzision.



Heisenbergs Quantenmikroskop

Nun möchte er das Experiment wiederholen und hundert Bahnpunkte erhalten. Er weiß, daß hundert aufeinanderfolgende Lichtblitze die Bewegung zu stark stören würden und wählt daher bei der Vorbereitung seiner zweiten Beobachtungsserie eine zehnmal schwächere Lichtintensität. Bei der dritten Beobachtungsserie möchte er tausend Punkte erhalten und wählt daher das Blitzlicht hundertmal schwächer als ursprünglich.

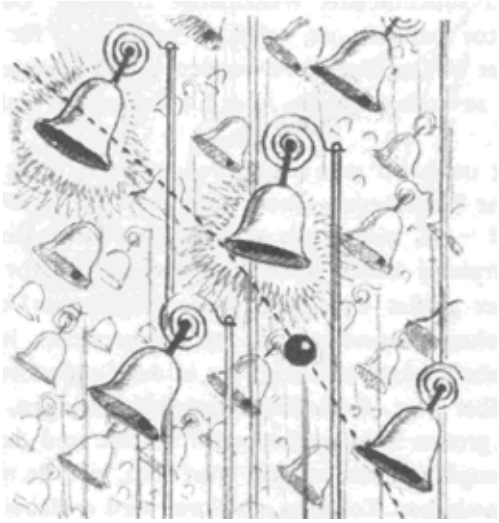
Wenn er seine Versuche in dieser Weise fortsetzt und dabei ständig die Intensität seiner Lichtquelle verringert, kann er so viele Punkte der Wurfbahn erhalten, wie er wünscht, ohne dabei die ursprünglich gewählte Genauigkeitsgrenze unterschreiten zu müssen. Dieses idealisierte, aber im Prinzip durchaus mögliche Verfahren stellt eine streng logische Methode dar, den Verlauf einer Bahn dadurch zu rekonstruieren, daß man "den bewegten Körper ansieht". Wie Sie sehen, ist dies im Rahmen der klassischen Physik durchaus möglich.

Was aber geschieht, wenn wir Quantenbedingungen einführen und die Tatsache in Betracht ziehen, daß die Wirkung jeder Strahlung nur in Form von Lichtquanten übertragen werden kann. Wie wir gesehen haben, hat unser Beobachter die Lichtmenge, mit der er den bewegten Körper beleuchtete, ständig vermindert. Wir erwarten daher, daß er einhalten müsste, sobald er nur noch ein einziges Lichtquant zur Beleuchtung verwendet. Der bewegte Körper würde dann entweder alles oder nichts von diesem Lichtquant reflektieren, und im zuletzt genannten Fall wäre eine Beobachtung unmöglich. Allerdings haben wir gehört, daß die Wirkung eines Zusammenstoßes mit einem der Lichtquanten bei zunehmender

Wellenlänge abnimmt. Da dies auch unserem Experimentator bekannt ist, wird er versuchen, für seine Beobachtungen Licht größerer Wellenlänge zu verwenden, um so die wachsende Zahl der Beobachtungen zu kompensieren. Aber hierbei wird er auf eine andere Schwierigkeit stoßen.

Wie allgemein bekannt ist, kann man bei Anwendung von Licht einer bestimmten Wellenlänge keine Einzelheiten sehen, die kleiner als die Wellenlänge des Lichtes selbst sind - so, wie man ja auch eine persische Miniatur nicht mit einem Anstreicherpinsel malen kann! Der Experimentator wird daher bei Anwendung immer größer werdender Wellenlängen die Umrisse jedes einzelnen Punktes verschmieren und bald ein Stadium erreichen, in dem jeder Schätzung ein Unsicherheitsfaktor anhaftet, der in der Größenordnung des ganzen Labors und darüber liegt. Schließlich wird er gezwungen, einen Kompromiss zwischen einer großen Zahl beobachteter Punkte und der Unschärfe jeder Schätzung einzugehen. Eine exakte Wurfbahn, wie die mathematische Linie, die seine klassischen Kollegen erhielten, wird er dabei allerdings nie erhalten. Sein bestes Resultat wird ein ziemlich breites, verwaschenes Band sein. Begründete er jedoch darauf seine Vorstellung von einer Wurfbahn, würde sich diese von der klassischen Vorstellung beträchtlich unterscheiden.

Das hier besprochene Verfahren ist ein optisches. Aber wir wollen jetzt auch noch eine andere Möglichkeit untersuchen, eine mechanische Methode nämlich. Zu diesem Zweck könnte sich unser Experimentator einen winzigen mechanischen Apparat ausdenken, sagen wir, kleine Glöckchen, die an Federn aufgehängt werden. Falls ein materieller Körper nahe an ihnen vorbeistreift, würden sie seinen Durchgang anzeigen. Der Experimentator könnte eine große Zahl solcher "Glöckchen" dort verteilen, wo er den Durchgang des Körpers erwartet. Das "Läuten der Glöckchen" würde dann dessen Spur verraten. In der klassischen Physik könnte man diese Glöckchen so klein und empfindlich machen, wie man es nur wünscht. Im Grenzfall einer unendlichen Zahl unendlich kleiner Glöckchen würde sich der Verlauf der Bahn wieder mit beliebiger Genauigkeit angeben lassen. Die Quantenbedingungen für mechanische Systeme würden allerdings auch hier störend in Erscheinung treten. Sind nämlich die "Glöckchen" zu klein, wird der vom bewegten Körper auf sie übertragene Impuls laut Formel (3) zu groß. Die Bewegung wäre damit auch dann empfindlich gestört, wenn auch nur ein "Glöckchen" angeschlagen würde. Sind dagegen die "Glöckchen" groß, dann wird die Unbestimmtheit aller Ortsangaben sehr groß. Die schließlich ermittelte Wurfbahn wäre dann wieder ein verwaschenes Band.



Kleine Glocken an Federn kündigen die Bahn an.

Ich fürchte, die Überlegungen unseres Physikers, der die Flugbahn eines Teilchens zu beobachten versucht, hinterlassen bei Ihnen einen allzu technischen Eindruck. Wenn es unserem Beobachter auch nicht gelungen sein mag, die Wurfbahn mit den ihm zur Verfügung stehenden Mitteln zu bestimmen, so müsste es eben andere, kompliziertere Verfahren geben, die zum gewünschten Ergebnis führen, werden Sie vielleicht sagen. Dem muß ich allerdings entgegenhalten, daß wir hier nicht irgendein, in einem Laboratorium ausgeführtes Experiment, sondern allgemein das Problem des physikalischen Messvorgangs in idealisierter Form untersucht haben. Überall dort, wo Wirkungen entweder durch Strahlung oder durch rein mechanische Vorgänge hervorgerufen wurden, muß jede noch so ausgeklügelte Messanordnung zwangsläufig auf die in diesen beiden Methoden beschriebenen Elemente zurückgreifen und damit schließlich zum gleichen Resultat führen. Wenn unsere idealisierte Messvorrichtung also die gesamte physikalische Realität umfasst, müssen wir schließen, daß Begriffe, wie exakte Lagen und genau festlegbare Bahnen, in einer Welt, in der die Quantengesetze gelten, keinen Platz haben.
Doch kehren wir zu unserem Experimentator zurück und versuchen wir, die Einschränkungen, die ihm durch die Quantenbedingungen auferlegt wurden, mit Hilfe der Mathematik zu formulieren. Wir haben schon gesehen, daß beide Methoden stets zu einem Konflikt zwischen Orts- und Geschwindigkeitsbestimmung führen. Bei der optischen Methode wird die Kollision mit einem Lichtquant nach dem aus der Mechanik bekannten Gesetz von der Erhaltung des Impulses eine Unschärfe im Impuls des Teilchens hervorrufen, die mit dem Impuls des verwendeten Lichtquants vergleichbar ist. Unter Benutzung von Formel (2) können wir daher für die Unschärfe des Impulses des Teilchens schreiben:
(4)

$$\Delta pTeilchen \cong \frac{b}{\lambda}.$$

Wir erinnern uns, daß die Unschärfe der Lage eines Teilchens durch die Wellenlänge gegeben ist (Am X) und dürfen daher ableiten:
(5)

$$\Delta pTeilchen * \Delta qTeilchen \cong b.$$

Bei der mechanischen Methode wird der Impuls des bewegten Teilchens um den Anteil, den die "Glöckchen" aufnehmen, unscharf. Wir wenden unsere Gleichung (3) an und erinnern uns, daß in diesem Fall die Unschärfe der Lage durch die Größe der "Glöckchen" ($\Delta q \cong l$) gegeben ist. Wir erhalten so wieder die gleiche Formel wie im vorhergehenden Fall. Die zuerst vorn deutschen Physiker Werner Heisenberg formulierte Beziehung (5) stellt die grundlegende Unschärferelation der Quantentheorie dar: je genauer man die Lage eines Teilchens definiert, um so unbestimmter wird der Impuls und umgekehrt.

Erinnern wir uns, daß wir unter Impuls das Produkt aus Masse und Geschwindigkeit des bewegten Teilchens verstehen, dann können wir schreiben:
(6)

$$\Delta vTeilchen * \Delta qTeilchen \cong \frac{b}{mTeilchen}$$

Für Körper, mit denen wir es gewöhnlich zu tun haben, ist dieses Produkt lächerlich klein. Bei einem leichteren Staubkörnchen mit der Masse 0,000 000 log können sowohl Lage als auch Geschwindigkeit mit einer Genauigkeit von 0,00000001% gemessen werden! Bei

einem Elektron (mit der Masse iCr30 kg läge das Produkt AvAq schon ungefähr bei 0,0001. Die Geschwindigkeit eines Elektrons im Inneren eines Atoms sollte wenigstens im Bereich von ± 106 m/s liegen, andernfalls entwischt es. Für die Unschärfe der Lage ergibt sich damit lCf-lo in, also der Durchmesser des Atoms. Das "Orbital" eines Elektrons im Atom ist daher so stark verschmiert, daß die "Breite" seiner Bahn gleich groß wird wie ihr "Radius". Das Elektron befindet sich somit gleichzeitig überall rund um den Kern.

Während der letzten zwanzig Minuten habe ich versucht, Ihnen ein Bild der verhängnisvollen Folgen zu geben, die unsere Kritik am klassischen Bewegungsbegriff mit sich brachte, Die eleganten, klar umrissenen Begriffe der klassischen Physik sind in Trümmer gegangen. An ihrer Stelle erhielten wir ein unförmiges, schwammiges Etwas. Natürlich können Sie jetzt fragen, wie um alles in der Welt die Physiker angesichts dieses Meeres an Unschärfe irgendwelche Phänomene beschreiben können. Die Antwort ist, daß wir bisher die alten klassischen Begriffe wohl zerstört, aber eine exakte Formulierung der neuen noch nicht in Angriff genommen haben.

Damit wollen wir jetzt beginnen. Wenn wir weder den Ort eines materiellen Teilchens durch einen Matheernahtischen Punkt, noch seine Bahn durch eine mathematische Linie bestimmen können, weil sich diese Dinge ja nun verschmiert haben, ist es selbstverständlich, dass wir andere Methoden der Beschreibung verwenden müssen, indem wir etwa die "Dichte unseres Breis" an den verschiedenen Punkten des Raums angeben. Mathematisch erfordert dies die Verwendung von stetigen Funktionen (wie sie auch in der Hydromechanik angewendet werden), und physikalisch bedeutet es, daß wir uns an Sätze gewöhnen wie "dieses Objekt ist hauptsächlich hier, aber auch teilweise dort und sogar da drüben", oder "diese Münze ist zu 75% in meiner Tasche und zu 25% in deiner". Ich weiß, daß Ihnen solche Sätze nicht ganz geheuer erscheinen, doch werden Sie wegen der Kleinheit des Wirkungsquantums im täglichen Leben ohnedies niemals anzuwenden brauchen. Wenn Sie jedoch Atomphysik studieren wollen, empfehle ich Ihnen wärmstens, sich mit solchen Ausdrücken vertraut zu machen.

Ich möchte Sie hier ausdrücklich vor dem Irrglauben warnen, wonach der mathematischen Funktion, die die "Wahrscheinlichkeitsdichte" beschreibt, in unserem gewöhnlichen, dreidimensionalen Raum irgendwelche physikalische Realität zukomme. Wenn wir zum Beispiel das Verhalten von zwei Teilchen beschreiben wollen, müssen wir nach der Anwesenheit unseres ersten Teilchens an dem einen Ort und der gleichzeitigen Anwesenheit unseres zweiten Teilchens an einem beliebigen anderen Ort fragen. Um antworten zu können, brauchen wir eine Funktion mit sechs Variablen (den Koordinaten der beiden Teilchen), die im dreidimensionalen Raum nicht "untergebracht" werden können. Für kompliziertere Systeme benötigen wir Funktionen mit einer noch größeren Anzahl von Variablen. Hier besteht eine Analogie zwischen der "quantenmechanischen Funktion" einerseits und der "Potentialfunktion" eines Teilchensystems in der klassischen Mechanik oder auch der "Entropie" eines Systems in der statistischen Mechanik andererseits. Sie beschreibt nur die Bewegung und hilft uns, irgend eine spezielle Bewegung unter gegebenen Bedingungen vorauszusagen. Physikalische Realität kommt nur dem Teilchen selbst zu, dessen Bewegung wir beschreiben.

Die Funktion, die nun beschreibt, bis zu welchem Grad sich ein Teilchen oder ein Teilchensystem an verschiedenen Orten aufhält, erfordert eine mathematische Form. Der österreichische Physiker Erwin Schröninger stellte als erster eine Gleichung auf, die das

Verhalten dieser Funktion wiedergibt. Die Funktion selbst bezeichnete er mit ip ("Psi-Funktion").
Ich möchte hier diese fundamentale Gleichung nicht ableiten, sondern ihre Aufmerksamkeit lieber auf die Annahmen bei dieser Ableitung lenken. Die wichtigste unter ihnen ist sehr ungewöhnlich: Die Gleichung muss so formuliert sein, daß die Funktion, welche die Bewegung der Materieteilchen beschreibt, alle Charakteristika einer Welle aufweist.
Es war der französische Physiker Louis de Broglie, der aufgrund theoretischer Studien über den Aufbau der Atome als erster auf die Notwendigkeit hinwies, der Bewegung von Materieteilchen Wellencharakter zuzuschreiben. In den darauffolgenden Jahren wurde die Wellennatur bewegter Teilchen durch zahlreiche Experimente bestätigt und gesichert. Man fand Erscheinungen, wie die Beugung eines Elektronenstrahls an einer kleinen Öffnung, und beobachtete selbst an so verhältnismäßig großen und komplexen Teilchen wie Molekülen Interferenzerscheinungen.
Vom Standpunkt eines klassischen Bewegungsbegriffs mussten die beobachteten Welleneigenschaften von Materieteilchen völlig unverständlich erscheinen. De Broglie sah sich demnach zu der ganz außergewöhnlichen Annahme gezwungen, daß die Teilchen von bestimmten Wellen begleitet sind, die gewissermaßen die Bewegung dirigieren".
Sobald man jedoch auf die klassischen Begriffe verzichtet und die Bewegungen durch stetige Funktionen beschreibt, wird die Forderung nach dem Wellencharakter der Materie viel verständlicher. Damit wird nichts anderes gesagt, als daß die Fortpflanzung unserer Psi-Funktion sich nicht wie beispielsweise die Fortpflanzung von Wärme durch eine bloß auf einer Seite geheizte Mauer vollzieht, sondern eher wie die Fortpflanzung von mechanischen Störungen (Schall). Mathematisch erfordert das eine bestimmte, ziemlich eingeschränkte Gleichungsform. Diese grundlegende Bedingung und die zusätzliche Forderung, daß unsere Gleichung in jene der klassischen Mechanik übergehen müsse, wenn sie auf Teilchen großer Masse angewendet wird (für die ja die Quanteneffekte vernachlässigt werden können), reduziert das Problem, die Gleichung zu finden, praktisch auf eine rein mathematische Aufgabe.
Vielleicht interessiert es Sie zu sehen, wie die Gleichung in ihrer endgültigen Form aussieht. Ich will sie gerne für Sie aufschreiben. Hier ist sie:
(7)

$$\nabla^2\Psi + \frac{4\pi m i\Psi}{b} - \frac{8\pi^2 mU\Psi}{b^2} = 0$$

In dieser Gleichung stellt die Funktion U das Potential der Kräfte dar, die auf unser Teilchen (mit der Masse m) wirken. Für jede beliebige Kräfteverteilung ist die Gleichung eindeutig zu lösen. Die Anwendung dieser 1926 aufgestellten "Schrödingerschen Wellengleichung" hat es den Physikern ermöglicht, das bisher vollständigste und logisch ausgewogenste Bild aller in die Welt der Atome gehörigen Erscheinungen zu entwerfen.
Manche von Ihnen werden sich vielleicht wundern, daß ich bis jetzt das Wort "Matrix", das man oft im Zusammenhang mit der Quantentheorie hört, noch nicht erwähnt habe. Ich muß gestehen, daß mir diese Matrizen nicht sonderlich sympathisch sind. Ich ziehe es vor, ohne sie das Auslangen zu finden. Um Sie aber über dieses mathematische Hilfsmittel der Quantentheorie nicht völlig im dunkeln zu lassen, möchte ich doch ein paar Worte darüber sagen. Die Bewegung eines Teilchens oder eines komplexen mechanischen Systems kann, wie wir gesehen haben, immer durch bestimmte stetige Wellenfunktionen beschrieben

werden. Diese Funktionen sind oft ziemlich kompliziert. Man kann sie aber aus einer Anzahl einfacher Schwingungen, den sogenannten "Eigenfunktionen", zusammengesetzt denken - ungefähr so, wie man einen komplizierten Klang aus einer Anzahl einfacher harmonischer Töne zusammensetzen kann. Die komplizierte Gesamtbewegung läßt sich dadurch beschreiben, daß man die Amplituden ihrer verschiedenen Komponenten angibt. Da die Anzahl der Komponenten (Obertöne) unendlich ist, müssen wir unendliche Amplitudentabellen anschreiben. Das sieht etwa so aus:

(8)
q11 q12 q13…
q21 q22 q23…
q31 q32 q33…
.....
Eine solche Tabelle nennt man "Matrix". Sie entspricht einer bestimmten Bewegung. Das Arbeiten mit solchen Matrizen erfordert nur verhältnismäßig einfache Rechenoperationen, und manche theoretischen Physiker ziehen es deshalb vor, mit Matrizen statt mit der Wellenfunktion selbst zu rechnen. Die "Matrizenmechanik", wie sie manchmal auch genannt wird, ist also nur eine mathematische Modifikation der gewöhnlichen "Wellenmechanik". Im Rahmen dieser Vorträge, die vor allem grundsätzlichen Fragen gewidmet sein sollen, brauchen wir nicht weiter in diese Problematik einzudringen.
Ich bedaure, daß die Zeit es mir nicht gestattet, Ihnen von der Weiterentwicklung der Quantentheorie im Hinblick auf die Relativitätstheorie zu erzählen. Diese Entwicklung, die wir hauptsächlich der Arbeit des englischen Physikers Paul Adrien Maurice Dirac verdanken, erbrachte eine Reihe äußerst interessanter Gesichtspunkte und führte zu einigen außerordentlich wichtigen experimentellen Entdeckungen. Vielleicht ist es mir möglich, ein anderes Mal darauf zurückzukommen. Bevor ich schließe, möchte ich der Hoffnung Ausdruck geben, daß diese Vortragsreihe Ihnen geholfen habe, sich ein klareres Bild vom gegenwärtigen physikalischen Weltbild zu machen, und daß Sie vielleicht sogar angeregt wurden, ihre Studien auf diesem Gebiet fortzusetzen.

8 Im Quantendschungel

Mr. Tompkins lag im Bett und schlummerte noch, als er plötzlich das Gefühl hatte, daß sich außer ihm noch jemand anderes im Raum befand. Er sah um sich und erblickte seinen alten Freund, den Professor, im Lehnstuhl sitzend und in das Studium einer Landkarte vertieft, die er auf seinen Knien ausgebreitet hatte.
"Kommen Sie mit?" fragte der Professor und hob den Kopf.
"Wohin?" erwiderte Mr. Tompkins und wunderte sich dabei noch immer darüber, wie der Professor in das Zimmer gekommen sein könnte.
"Die Elefanten anschauen natürlich und die anderen Tiere des Quantendschungels. Der Besitzer des Billardzimmers, in dem wir uns unlängst trafen, hat mir verraten, woher das Elfenbein für seine Billardkugeln stammt. Sehen Sie das Gebiet, das ich auf der Karte rot markiert habe? Anscheinend ist alles innerhalb dieser Grenze Quantengesetzen mit einem sehr großen Wirkungsquantum unterworfen. Die Eingeborenen glauben, daß dieser ganze Landstrich von Dämonen bewohnt ist; ich fürchte, wir werden kaum einen Führer finden.

Aber wenn Sie mitfahren Wollen, müssen Sie sich beeilen. Unser Schiff fährt in einer Stunde ab und wir müssen noch Sir Richard mitnehmen. "
"Wer ist Sir Richard?" fragte Mr. Tompkins.
"Haben Sie noch nie von ihm gehört?" Der Professor war offensichtlich erstaunt. "Er ist ein berühmter Großwildjäger und entschloss sich, uns zu begleiten, als ich ihm eine interessante Jagd versprach."

Sie kamen gerade noch rechtzeitig zum Hafen, um zu sehen, wie eine Anzahl schmaler Kisten verladen wurde. Diese enthielten Sir Richards Flinten und die Spezialkugeln, die der Professor aus Blei hatte gießen lassen, das in den Bleibergwerken in der Nähe des Quantendschungels gefunden wurde. Mr. Tompkins hatte sein Gepäck noch nicht in der Kabine verstaut, als das gleichmäßige Vibrieren des Bootes schon verriet, daß ihre Fahrt begonnen hatte. Die Seereise verlief ohne besondere Vorkommnisse. Mr. Tompkins hatte kaum bemerkt, wie rasch die Zeit verflogen war, als sie auch schon in einer märchenhaften orientalischen Stadt an Land gingen. Es war die letzte Siedlung vor dem geheimnisvollen Quantengebiet.
"Wir müssen jetzt für unsere Reise ins Landesinnere einen Elefanten kaufen", sagte der Professor. "Ich glaube nicht, daß wir einen Eingeborenen finden werden, der uns begleitet. Wahrscheinlich wird uns nichts anderes übrigbleiben, als den Elefanten selbst zu führen. Tja, und Sie, mein lieber Mr. Tompkins, Sie werden diese Kunst jetzt wohl lernen müssen. Ich selbst werde zu sehr mit meinen wissenschaftlichen Beobachtungen beschäftigt sein und Sir Richard muß sich um die Schusswaffen kümmern."
Gemeinsam gingen die drei Reisegefährten nun auf den Elefantenmarkt am Rande der Stadt. Mr. Tompkins war recht unglücklich, als er die riesigen Tiere sah. So etwas sollte er lenken! Sir Richard, der eine Menge über Elefanten wusste, wählte ein schönes, großes Tier aus und fragte den Besitzer nach dem Preis.
"Hrup hanweck 'o hobot hum. Hagori ho, haraham oh Hoho-hoho," sagte der Eingeborene grinsend und entblößte zwei Reihen blendend weißer Zähne.
"Der Elefant ist nicht billig", dolmetschte Sir Richard, "aber er soll aus dem Quantendschungel stammen und deshalb so teuer sein. Sollen wir ihn kaufen?"
"Auf jeden Fall", erklärte der Professor. "Auf dem Schiff hat man uns erzählt, daß sich Elefanten manchmal aus dem Quantenland herauswagen und dann von den Eingeborenen gefangen werden. Solche Tiere sind viel besser als Elefanten aus anderen Gebieten. In unserem Fall ist ein Quantenelefant besonders vorteilhaft, denn er wird sich im Dschungel zu Hause fühlen."
Mr. Tompkins besah sich den Elefanten von allen Seiten; es war ein besonders schönes, großes Tier, doch benahm es sich nicht anders als die, die er im Zoo gesehen hatte. Er wandte sich an den Professor. "Sie sagten, das sei ein Quantenelefant; aber ich finde, er sieht wie ein ganz gewöhnlicher Elefant aus. Er benimmt sich auch nicht so komisch, wie die Billardkugeln, die aus den Stoßzähnen seiner Verwandten angefertigt wurden. Warum verschmiert er sich nicht in alle Richtungen?"
"Sie begreifen aber ziemlich langsam", antwortete der Professor. "Das kommt von seiner großen Masse. Ich habe Ihnen doch schon vor einiger Zeit erklärt, daß jede Unschärfe des Ortes und der Geschwindigkeit von der Masse abhängt: je größer die Masse, desto geringer die Unschärfe. Das ist auch der Grund, weshalb die Quantengesetze im täglichen Leben nicht

einmal an so leichten Körpern wie Staubkörnchen beobachtet werden können, dagegen für Elektronen, die Billionen- und abermillionenmal leichter sind, wichtig werden. Im Quantendschungel ist das Wirkungsquantum ziemlich groß, jedoch immer noch nicht groß genug, eine auffällige Veränderung im Verhalten eines so schweren Tieres, wie es ein Elefant ist, hervorzurufen. Die Ortsundschärfe eines Quantenelefanten bemerkt man nur, wenn man ihn unmittelbar aus der Nähe ansieht. Vielleicht ist Ihnen schon aufgefallen, daß die Konturen seiner Haut nicht sehr scharf sind und die Haut so aussieht, als wäre sie mit einem leichten Flauen bedeckt. Im Laufe der Jahre nimmt diese Unschärfe allmählich zu, und ich glaube, dies ist der Grund dafür, daß sich die Eingeborenen erzählen, die sehr alten Elefanten aus dem Quantendschungel besäßen ein dichtes, langhaariges Fell. Aber an den kleineren Lebewesen werden die Quanteneffekte gewiss viel leichter zu bemerken sein."

"Was für ein Glück", dachte Mr. Tompkins, "daß wir diese Expedition nicht zu Pferd machen! Dann wüsste ich ja nie, ob ich mein Pferd noch zwischen den Schenkeln habe oder ob es schon über alle Berge ist."

Nachdem der Professor und Sir Richard mit seinen Flinten in den auf dem Rücken des Elefanten befestigten Korb geklettert waren und Mr. Tompkins in seiner neuen Würde als Mahout seinen Platz am Nacken des Tieres, den Stock fest unklammernd, eingenommen hatte, begann die Reise in den geheimnisvollen Dschungel.

Die Leute in der Stadt hatten ihnen erklärt, daß sie ungefähr eine Stunde zu reiten hätten. Mr. Tompkins, der sich bemühte, zwischen den Ohren des Elefanten das Gleichgewicht zu halten, beschloss, diese Zeit zu nützen und vom Professor mehr über Quantenphänomene in Erfahrung zu bringen.

"Können Sie mir sagen", fragte er den Professor, "warum sich Körper mit kleiner Masse so sonderbar verhalten? Und was bedeutet eigentlich dieses Wirkungsquantum, von dem Sie ständig reden?"

"Nun, das ist gar nicht schwer zu verstehen", erwiderte der Professor. "Das eigentümliche Verhalten aller Gegenstände der Quantenwelt, das Sie beobachten, rührt einfach daher, daß Sie diese Gegenstände ansehen."

"Sind sie denn so scheu?" sagte Mr. Tompkins lächelnd.

" Scheu' ist nicht das richtige Wort", antwortete der Professor trocken. "Durch das Beobachten der Bewegung wird diese nämlich zwangsläufig gestört. Die Bewegung eines Körpers können Sie nur deshalb beobachten, weil er eine gewisse Wirkung auf Ihre Sinne oder die von Ihnen benutzten Apparate ausübt. Nach dem Gesetz von Wirkung und Gegenwirkung muß auch Ihr Messgerät auf den Körper einwirken und seine Bewegung sozusagen stören'. Dadurch entsteht eine Unschärfe des Ortes und der Geschwindigkeit."

"Nun ja," meinte Mr. Tompkins, "wenn ich die Billardkugel mit meinem Finger berührt hätte, dann hätte ich ihre Bewegung sicherlich gestört. Aber ich habe sie doch nur angesehen. Hat sie denn das auch gestört?"

"Natürlich. In der Dunkelheit können Sie die Kugel nicht sehen; wenn Sie jedoch das Licht einschalten, dann werden die Lichtstrahlen, die von der Kugel reflektiert werden und die sie sichtbar machen, auf sie einwirken (wir sprechen hierbei vom Lichtdruck) und ihre Bewegung stören-.

"Angenommen aber, ich verwende besonders empfindliche Instrumente. Kann ich dann nicht die Wirkung meiner Instrumente auf den bewegten Körper so gering machen, daß man sie vernachlässigen kann?"

"Genau das hat man in der klassischen Physik tatsächlich angenommen, bevor das Wirkungsquantum entdeckt wurde. Zu Beginn dieses Jahrhunderts fand man, daß die Wirkung auf irgendein beliebiges Objekt eine bestimmte untere Grenze nicht unterschreiten kann. Diese Grenze wird allgemein als Quantenkonstante oder Wirkungsquantum bezeichnet. Im alltäglichen Leben ist das Wirkungsquantum sehr klein; in den gebräuchlichen Einheiten wird es durch eine Zahl ausgedrückt, die nach dem Komma vierunddreißig Nullen besitzt. Wichtig wird diese Größe erst für so leichte Teilchen wie Elektronen, die wegen ihrer geringen Masse schon durch sehr kleine Wirkungen beeinflußt werden. Im Quantendschungel, dem wir uns jetzt nähern, ist das Wirkungsquantum dagegen sehr groß. Das ist eine Welt, in der es nicht gerade sanft zugeht. Wenn man in einer solchen Welt ein Kätzchen streichelte, würde es entweder gar nichts fühlen oder das erste Quantum Zärtlichkeit würde ihm das Genick brechen."
"Das ist ja alles ganz in Ordnung", meinte Mr. Tompkins nachdenklich, "was geschieht jedoch, wenn niemand zuschaut? Benehmen sich die Tiere dann anständig, das heißt so, wie wir es uns normalerweise vorstellen?"
"Wenn niemand hinsieht", sagte der Professor, "kann auch niemand wissen, wie sie sich benehmen. Ihre Frage ist daher vorn physikalischen Standpunkt aus gesehen sinnlos."
"Nun", rief Mr. Tompkins, "wenn das nicht Philosophie ist!"
"Wenn sie wollen, nennen Sie es Philosophie", antwortete der Professor offensichtlich verärgert. "in der modernen Physik gilt jedenfalls das grundlegende Prinzip, niemals über Dinge zu sprechen, die man nicht wissen kann. Alle modernen physikalischen Theorien beruhen auf diesem Prinzip. Von den Philosophen dagegen wird es gewöhnlich übersehen. Der berühmte deutsche Philosoph Kant zum Beispiel verbrachte ziemlich viel Zeit damit, über die Eigenschaften von Dingen nachzudenken; und zwar nicht darüber, wie sie uns erscheinen', sondern über sie als das Ding an sich'. Für den modernen Physiker haben nur die sogenannten observablen' (das sind die grundsätzlich beobachtbaren) Eigenschaften Bedeutung. Die gesamte moderne Physik beruht auf deren wechselseitiger Beziehung. Nicht beobachtbare Dinge dienen bloß eitler Spekulation - man kann sie ungehindert erfinden, jedoch weder ihre Existenz überprüfen, noch irgendwelchen Nutzen aus ihnen ziehen. Ich möchte sogar behaupten ..."
In diesem Augenblick ließ ein schreckliches Gebrüll die Luft erzittern und ihr Elefant machte einen so heftigen Satz, daß Mr. Tompkins beinahe abgeworfen worden wäre. Ein großes Rudel Tiger griff den Elefanten an und sprang gleichzeitig von allen Seiten auf ihn ein. Sir Richard griff schnell nach seiner Flinte, zielte genau zwischen die Augen des ihm am nächsten befindlichen Tieres und drückte ab. Gleich darauf hörte ihn Mr. Tompkins einen unter Jägern gebräuchlichen Fluch ausstoßen. Sir Richard hatte genau durch den Kopf des Tigers hindurchgeschossen, ohne das Tier dabei auch nur im geringsten zu verletzen.
"Schießen Sie weiter!" schrie der Professor. "Knallen Sie einfach wild um sich, egal wohin. Es ist nur ein Tiger, er hat sich jedoch rund um unseren Elefanten verschmiert. Unsere einzige Hoffnung ist, den Hamilton zu vergrößern. "
Der Professor packte selbst ein Gewehr, und das Knallen der Schüsse vermischte sich mit dem Gebrüll des Quantentigers. Mr. Tompkins schien es eine Ewigkeit zu dauern, ehe alles vorüber war. Eine der Kugeln "traf den Punkt"; zu Mr. Tompkins' größtem Erstaunen wurde der Tiger - denn plötzlich war nur mehr ein einziger vorhanden - in einem gewaltigen Bogen durch die Luft geschleudert; sein toter Körper landete irgendwo in einem weit entfernten

Palmenhain.
"Wer ist dieser Hamilton?" fragte Mr. Tompkins, nachdem sich wieder alles beruhigt hatte. "Ist es ein berühmter Jäger, den Sie aus dem Grab zitieren wollten, um uns zu helfen?"
‚Ach, verzeihen Sie bitte", sagte der Professor. "In der Aufregung des Kampfes habe ich plötzlich naturwissenschaftliche Termini benutzt, die Sie nicht verstehen können! Hamilton ist ein mathematischer Ausdruck, der die Quantenwechselwirkung zwischen zwei Körpern beschreibt. Er ist nach dem irischen Mathematiker Hamilton benannt, der als erster diese mathematische Form benutzte. Ich wollte damit nur sagen, daß wir durch das Abgeben mehrerer Schüsse von Quantenkugeln die Wahrscheinlichkeit einer Wechselwirkung zwischen den Kugeln und dem Körper des Tigers erhöhen. Wie Sie gesehen haben, kann man in der Quantenwelt auch dann, wenn man genau zielt, nicht sicher sein, etwas zu treffen. Wegen der Verschmierung der Kugel und des Zieles selbst ist die Wahrscheinlichkeit für einen Treffer begrenzt; sie wird niemals zur Gewissheit.

Eine Herde verschwommen aussehender Tiger griff den Elephanten an.
Wir haben mindestens dreißig Schuss abgefeuert, bevor eine Kugel traf; dann aber war die Wirkung der Kugel auf das Tier so gewaltig, daß es in weitem Bogen weggeschleudert wurde. Diese Dinge passieren auch bei uns zu Hause, nur in einem viel geringeren Ausmaß. Wie ich bereits gesagt habe, muß man normalerweise das Verhalten so kleiner Teilchen wie Elektronen untersuchen, um davon etwas zu bemerken. Vielleicht haben Sie davon gehört, daß jedes Atom aus einem verhältnismäßig sicheren Kern und einer Anzahl von Elektronen besteht, die ihn umkreisen. Ursprünglich dachte man, daß die Bewegung der Elektronen um den Kern analog zur Bewegung der Planeten um die Sonne verläuft, doch genauere Untersuchungen ergaben, daß unsere üblichen Vorstellungen von Bewegung zu groß für ein so winziges System sind, wie es ein Atom darstellt. Die Prozesse, die innerhalb eines Atoms Bedeutung haben, sind von der gleichen Größenordnung wie das Wirkungsquantum; deshalb verwischt sich dieses ganze Bild. Die Bewegung eines Elektrons um den Atomkern gleicht in vieler Hinsicht der Bewegung unseres Tigers, der sich rund um den Elefanten aufzuhalten schien."
"Und schießt auch irgend jemand auf das Elektron wie wir auf den Tiger?" fragte Mr. Tompkins.

"Selbstverständlich. Der Atomkern selbst sendet manchmal sehr energiereiche Lichtquanten aus, also elementare Wirkungseinheiten des Lichts. Man kann das Elektron auch von außerhalb des Atoms aus beschießen, indem man es mit einem Lichtstrahl beleuchtet. Und alles geht dabei genauso vor sich wie bei unserem Tiger hier. Viele Lichtquanten gehen ohne jede Wirkung durch die Elektronenwolke hindurch, bis plötzlich eines auf das Elektron einwirkt und es aus dem Atom herausschleudert. Ein Quantensystem kann man nicht bloß oberflächlich stören: Entweder es wird überhaupt nicht beeinflußt oder es wird gänzlich verändert."
"Genau wie das arme Kätzchen, das man in der Quantenwelt nicht streicheln kann, ohne es zu töten", folgerte Mr. Tompkins.
"Schauen Sie, Gazellen! Und gleich so viele!" rief da Sir Richard und hob die Flinte. Tatsächlich brach eine große Gazellenherde aus dem Bambusdickicht hervor.
"Aber die sind ja dressiert!" dachte Mr. Tompkins. "Sie bewegen sich in einer Linie wie eine Formation Soldaten bei der Parade. Ob das auch ein Quanteneffekt ist?"
Die Gazellen bewegten sich rasch auf ihren Elefanten zu. Sir Richard war eben im Begriff, sein Gewehr in Anschlag zu bringen, als ihn der Professor zurückhielt:
"Vergeuden Sie Ihre Patronen nicht", sagte er. "Die Chance, das Tier zu treffen, ist sehr gering, wenn es sich in einem Beugungsmuster bewegt."

Sir Richard wollte gerade schießen, als ihn der Professor zurückhielt.
"Was soll das heißen - das Tier?" rief Sir Richard erstaunt. "Das sind doch mindestens ein naar Dutzend!"
regelmäßige Reihe von Öffnungen hindurch, zum Beispiel zwischen den Bambusstämmen, dann zeigt er Beugungserscheinungen, die Sie ja von der Schule her vielleicht kennen. Wir sprechen daher auch vom Wellencharakter der Materie."
Doch weder Sir Richard noch Mr. Tompkins konnten sich unter dieser geheimnisvollen "Beugung" auch nur das geringste vorstellen, das Gespräch geriet daher ins Stocken.

Auf ihrem weiteren Weg durch das Quantenland trafen unsere Reisenden noch auf viele andere Phänomene. So sahen sie unter anderem einige sehr lustige Quantenaffen und Quantenmoskitos, von denen man infolge ihrer geringen Masse kaum sagen konnte, wo sie sich eigentlich befanden. Schließlich näherten sie sich einem Gebilde, das ganz wie ein Eingeborenendorf aussah.
"Ich wusste gar nicht", sagte der Professor, "daß in diesen Gegenden Menschen wohnen. Nach dem Lärm zu urteilen, müssen sie gerade ein Fest feiern. Hören Sie nur dieses unaufhörliche Glockengeläute!"
Es war nicht einfach, die einzelnen Gestalten auszunehmen. Offenbar führten sie gerade einen wilden Tanz um ein großes Feuer auf. Immer wieder erhoben sich braune Hände mit Glocken in allen Größen aus der Menge. Doch als sich die Reisenden näher heranwagten, begann alles vor ihren Augen zu verschwimmen, selbst die Hütten und die großen Bäume in ihrer unmittelbaren Umgebung. Das Glockengeläute wurde Mr. Tompkins immer unerträglicher - da streckte er seine Hand aus, packte etwas und schleuderte es weg. Der Wecker traf nur ein Wasserglas, das auf seinem Nachttisch stand, und ein Schwall kalten Wassers brachte ihn zur Besinnung. Er sprang auf und begann sich rasch anzukleiden. In einer halben Stunde schon hatte er nämlich in der Bank zu sein.

Was der Professor noch nicht wusste

Wie unverfänglich waren doch die relativistischen Träumereien von Mr. Tompkins gewesen. Wie gefährlich ist es dagegen, sich im Quantendschungel mit seinen Elefanten, Tigern und Quantenmoskitos zu verirren! Vielleicht durchdringen zwar Autos Wände, doch etwas seltener als der Professor im Kopf berechnete. Meine Überlegungen
lassen erwarten, daß ein derartiges Ereignis nur alle 10 (1040) Jahre auf treten würde. Wenn Sie öfter durch Wände fahren, sollten Sie diesen Effekt vielleicht doch nicht auf die Quantentheorie. sondern t Ihre Fahrweise zurückführen.
Gefährlicher als Quantenmoskitos und Tiger sind aber vielleicht Begegnungen mit Physikern und Philosophen, die debattierend im Quantendschungel herumstreunen. Dürfen wir sie etwas belauschen?'
"Wie der Professor richtig sagte", meinte ein grauhaariger Herr, der noch an den berühmten Diskussionen in Kopenhagen teilgenommen hatte, "entsteht die Unschärfe dadurch, daß wir die Quantensysteme durch unsere Beobachtungen stören. Um uns im Quantendschungel zu orientieren, beschießen wir alles mit Lichtatomen und verschmieren dadurch die Wellenpakete." "Und wenn wir nicht beobachten?", fragte sein Gesprächspartner, der fast über eine verschmierte Wurzel gestolpert wäre. "Gibt es die Wellenpakete dann nicht?" Der grauhaarige Herr schüttelte den Kopf: "Physik muß sich auf Beobachtungen beschränken! Es ist sinnlos zu fragen, was die Tiere des Quantendschungels tun, wenn wir sie nicht beobachten. Wenn wir sie aber beobachten. so stören wir sie in indem Falle und verschmieren dadurch Wel1en Pakete. "
"Das ist doch idealistischer Unsinn!", kam sofort die Antwort. irgendwie erinnert dies an Bischof Berkeley, der im 18. Jahrhundert behauptete, unsere Umwelt würde aufhören zu existieren, wenn sie niemand beobachtet. Esse esst percipi - Sein ist gesehen werden - war

sein Prinzip (und die High Society lebt heute noch danach). Da es dem guten Bischof aber selbst zu unsinnig erschien, daß alle Gegenstände verschwinden sollten, wenn sie gerade niemand beobachtet, rief er Gott zu Hilfe. Er sollte immer alles beobachten und dadurch die Stabilität der Weit garantieren. Ist es nicht viel sinnvoller zu behaupten, daß Materie, Wellenfunktionen und Unschärfen auch dann existieren, wenn wir sie nicht beobachten? Wir rufen doch auch nicht die Materie durch unsere Beobachtung hervor, sondern stellen nur fest, daß sie da ist. Genauso verhält es sich mit den Unschärfen und den Wellenpaketen. Sie sind stets vorhandene Eigenschaften der Materie, die sich in allen Messungen bemerkbar machen "

1 Der folgende Dialog soll die umtanzreiche Debatte über die Grundlagen der Quantenmechanik andeuten. Siehe dazu die im Literaturverzeichnis anzuführen Werke.

Leider wurden nach diesen Worten die Wellenpakete der beiden Widersacher so diffus, daß Mr. Tompkins ihren Streit nicht weiter verfolgen konnte.' Nur wirre Geräusche drangen aus dem Quantendschungel vereinzelt an sein Ohr. Statistische Deutung, Kopenhagener Deutung, Undiversen, die sich bei jeder Messung spalten, interferierten so lange miteinander, bis Mr. Tompkins gar nichts mehr verstand, die streitenden Deuter der Quantentheorie sich selbst überließ und sich lieber neuen Träumen zuwandte.

9 Der Maxwellsche Dämon

Während vieler Monate voll ungewöhnlicher Abenteuer, in deren Verlauf der Professor ihn in die Geheimnisse der Physik einzuweihen versuchte, ließ sich Mr. Tompkins mehr und mehr von Maud bezaubern und zu guter Letzt machte er ihr - etwas linkisch - einen Heiratsantrag. Dieser wurde prompt angenommen und sie wurden Mann und Frau. In seiner neuen Rolle als Schwiegervater sah es der Professor als seine Pflicht an, die Kenntnisse seines Schwiegersohnes auf dem Gebiete der Physik und deren jüngster Entwicklungen zu fördern.

Es war Sonntag. Mr. und Mrs. Tompkins hatten sich vorgenommen, einen geruhsamen Nachmittag zu verbringen. Sie saßen in den Lehnstühlen ihrer gemütlichen Wohnung-. sie, in die letzte Ausgabe der Vogue vertieft, er mit dem Lesen eines Artikels des Esquire* beschäftigt.

"Schau," rief Mr. Tompkins plötzlich, "hier ist ein System eines Glücksspiels angegeben, das wirklich funktioniert!"

"So, meinst Du wirklich, Cyrit?" fragte Maud, indem sie etwas widerwillig die Lektüre ihres Modemagazins unterbrach. "Vater hat immer gesagt, daß es so etwas wie ein unfehlbares System nicht geben kann."

‚Aber sieh doch her, Maud", erwiderte Mr. Tompkins und hielt ihr den Artikel, den er nun seit einer halben Stunde studiert hatte, unter die Augen. "Ich verstehe nichts von Systemen. Das hier gründet sich jedoch auf einfache, reine Mathematik. Ich kann mir wirklich nicht vorstellen, wie das schief gehen sollte. Alles, was man zu tun hat, ist, drei Zahlen, nämlich

1, 2, 3 auf ein Stück Papier zu schreiben und einige einfache Regeln, die hier angegeben sind, zu beachten."
"Also gut, probieren wir es aus", schlug Maud mit zunehmendem Interesse vor. "Wie sehen Deine Regeln denn aus?"
„Folgen wir dem im Artikel gegebenen Beispiel; dies dürfte die beste Methode sein, die Regeln kennen zulernen. Zur Illustration hat man hier ein Roulette verwendet, bei dem man sein Geld auf rot oder schwarz setzen kann. Genauso gut könnte ich aber auch eine Münze aufwerfen und auf Kopf oder Adler wetten. Ich schreibe also
1, 2, 3 auf. Die Regel schreibt vor, dass ich bei jedem neuen Spiel die Summe der beiden äußeren Zahlen dieser Serie setzen muss. Ich nehme also ein und drei, somit vier Chips und lege sie, sagen wir, auf rot. Gewinne ich, so streiche ich die beiden Zahlen eins und drei und setze als nächstes die übriggebliebene Zahl 2. Wenn ich verliere, dann füge ich den verlorenen Betrag an das Ende der Serie an und wende beim nächsten Spiel dieselbe Regel an. Angenommen, die Kugel hält auf schwarz und der Croupier streicht meine vier Chips ein. Dann wird die neue Serie
1,2, 3,4 sein und mein nächster Einsatz ist eins plus vier, somit fünf. Nehmen wir an, ich verliere ein zweites Mal. Der Artikel empfiehlt für diesen Fall, in derselben Weise fortzufahren, das heißt, die Zahl 5 an das Ende der Serie anzufügen und sechs Chips zu setzen.

"Aber diesmal musst Du gewinnen!" rief Maud aufgeregt. "Du kannst doch nicht jedes Mal verlieren."
"Möglich wäre es", sagte Mr. Tompkins. "Als Bub spielte ich oft mit Freunden Kopf oder

Adler' und, ob Du es glaubst oder nicht, ich warf in einem Fall zehnmal hintereinander Kopf. Doch las uns, wie das ja auch der Artikel tut, annehmen, dass ich dieses Mal gewinne. Dann gewinne ich zwölf Chips, besitze also um drei Chips weniger als am Beginn des Spiels. Halte ich mich nun weiterhin an die Regeln, habe ich die Ziffern 1 und 5 zu streichen und meine Serie lautet:
,1, 2, 3, 4, 5
Das nächste Spiel geht um zwei plus vier, also wieder um sechs Chips."
"Hier steht, dass Du wieder verloren hast", seufzte Maud, die, ihrem Gatten über die Schulter blickend, mitlas. "Das heißt, Du musst die Sechs der Serie hinzufügen und das nächste Mal acht Chips setzen, nicht wahr?"
„Ja, richtig. Doch jetzt verliere ich wieder. Die Serie heißt nun
1, 2, 3, 4, 5, 6, 8
und ich muss diesmal zehn Chips setzen. Ich gewinne, streiche also die Ziffern 2 und 8 und setze das nächste Mal drei plus sechs, das ergibt neun. Doch ich verliere wieder."

Aber diesmal musst du gewinnen!
"Ein dummes Beispiel", schmollte Maud. "Bisher hast Du dreimal verloren und nur ein einziges Mal gewonnen. Das ist nicht fair!"
"Einerlei, das spielt keine Rolle", besänftigte sie Mr. Tompkins mit der Selbstgewissheit eines Magiers. "Am Ende dieses Zyklus werden wir bestimmt gewinnen. Beim letzten Coup verlor ich neun Chips; ich werde diese Zahl der Serie daher wieder hinzufügen; das ergibt
,1, 2, 3, 4, 5, 6,8, 9
.Ich setze nun zwölf Chips. Diesmal gewinne ich, streiche daher die Ziffern 3 und 9 und setze die Summe der beiden restlichen Ziffern, also zehn Chips. Der folgende zweite Gewinn schließt den Zyklus ab, da nun alle Zahlen gestrichen sind. Ich habe jetzt sechs Chips mehr, obwohl ich bloß viermal gewonnen und fünfmal verloren habe."
"Bist Du sicher, sechs Chips gewonnen zu haben?" fragte Maud zweifelnd.
" Völlig sicher. Du siehst, das System ist so aufgebaut, dass Du jedes Mal am Ende eines Zyklus sechs Chips gewonnen hast. Man kann dies durch einfache arithmetische Überlegungen nachweisen. Darum sagte ich, dies sei ein mathematisch abgesichertes System, das nicht schief gehen kann. Wenn Du es nicht glaubst, nimm ein Stück Papier zur Hand und überzeuge Dich selbst."
"Schon gut. Ich verlasse mich ja darauf, dass es sich so verhält, wie Du sagst", sagte Maud nachdenklich. "Aber sechs Chips sind natürlich kein sehr hoher Gewinn."
"Doch, wenn man sicher sein kann, dass man sie am Ende jedes Zyklus in die Tasche stecken kann. Man kann das Ganze ja immer wieder von vorne beginnen, indem man jedes Mal mit 1, 2, 3 anfängt und schließlich soviel Geld scheffelt, wie es einem beliebt. Ist doch fantastisch, nicht?"
"Wundervoll!" rief Maud. "Dann kannst Du ja Deinen Job bei der Bank kündigen; wir ziehen in ein schöneres Haus; und heute habe ich einen Pelzmantel in einer Auslage gesehen, um bloß ..."
"Natürlich kaufen wir ihn, doch sollten wir zunächst so rasch wie möglich nach Monte Carlo. Diesen Artikel müssen viele Leute gelesen haben und es wäre doch zu schade, hinzukommen und sehen zu müssen, dass uns jemand zuvorgekommen ist und die Bank gesprengt hat."

"Ich werde sofort den Flughafen anrufen und feststellen, wann die nächste Maschine abfliegt", meinte Maud voller Eifer.
"Was soll diese Eile?" hörten sie da eine vertraute Stimme aus dem Vorraum. Mauds Vater betrat das Zimmer und betrachtete überrascht das aufgeregte Paar.
"Mit dem nächsten Flug sind wir in Monte Carto. Wir werden als reiche Leute zurückkehren", sagte Mr. Tompkins und erhob sich, um den Professor zu begrüßen.
"Soso", lächelte dieser und machte es sich in einem altmodischen Lehnstuhl in der Nähe des Kamins bequem. "Du hast also ein neues System gefunden. "
"Doch diesmal funktioniert es, Vater!" warf Maud ein, wobei sie noch immer den Telefonhörer in der Hand hielt.
"So ist es", pflichtete Mr. Tompkins bei und überreichte dem Professor das Magazin. "Das hier kann einfach nicht schief gehen."
"Nein?" lächelte der Professor. "Nun, dann wollen wir uns die Sache einmal näher ansehen." Nach einem kurzen Blick auf den Artikel fuhr er fortcharakteristisch an diesem System ist, dass Dich die Regel zwingt, Deinen Einsatz nach jedem Verlust zu erhöhen und ihn andererseits nach jedem Gewinn zu verringern. Wenn Du daher in regelmäßiger Abwechslung gewinnst oder verlierst, wird Dein Kapitalsstand auf- und abschwanken, wobei allerdings jeder Gewinn etwas größer ausfallen wird als der vorangegangene Verlust. Du wirst mir sicher einräumen, dass ein Spiel im allgemeinen nicht so regelmäßig verläuft. Tatsächlich ist die Wahrscheinlichkeit für eine derart regelmäßig alternierende Serie genauso gering wie die für eine durchgehende Gewinnserie. Daher sind wir gezwungen zu überprüfen, was geschieht, wenn mehrere Gewinne oder Verluste einander unmittelbar folgen, wenn man also, wie man so sagt, beispielsweise eine Glückssträhne hat. Die Regel verlangt dann von Dir, dass Du nach jedem Gewinn Deinen Einsatz verminderst oder ihn zumindest nicht vergrößerst; der totale Gewinn wird damit nicht sehr hoch ausfallen. Andererseits kann eine Pechsträhne katastrophal enden, da Du ja Deinen Einsatz nach jedem Verlust erhöhen musst. Dabei kannst Du sogar aus dem Spiel geworfen werden. Eine Kurve, die die Entwicklung Deines Kapitalsstands darstellt, wird somit aus einigen langsam ansteigenden Teilen bestehen, aber an einigen Stellen dazwischen scharf einknicken. Es ist wahrscheinlich, dass Du Dich am Beginn des Spiels an einem der langen, allmählich ansteigenden Teile der Kurve bewegst und so eine Weile das Gefühl genießt, Dein Geld langsam, aber stetig wachsen zu sehen. Wenn Du jedoch in der Hoffnung auf immer größer werdenden Gewinn lang genug weiterspielst, stößt Du Unerwartetherweise auf einen dieser scharfen Knicks, und es könnte sein, dass Du Deinen letzten Penny setzen musst und verlierst. Wie sich ganz allgemein zeigen lässt, ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Kurve die doppelte Höhe erreicht, für dieses wie für jedes andere System genauso groß wie die Wahrscheinlichkeit, dass die Kurve auf den Nullpunkt absinkt. Mit anderen Worten: Die Chance, am Ende gewonnen zu haben, ist genauso groß wie jene, beim einmaligen Setzen des gesamten Kapitals auf Rot oder Schwarz den Einsatz zu verdoppeln oder mit einer einzigen Drehung des Rades alles zu verlieren. Alles, was ein solches System zu leisten vermag, ist, das Spiel in die Länge zu ziehen und damit um dasselbe Geld mehr Spaß zu machen. Aber wenn das alles ist, was Du möchtest, brauchst Du es Dir nicht so schwer zu machen. Wie Du weißt, gibt es auf dem Roulettrad sechsunddreißig Zahlen. Nichts kann Dich davon abhalten, alle Zahlen außereiner zu belegen. Dann stehen die Chancen auf Gewinn für Dich 3 5 zu 3 6 und die Bank zahlt Dir bei Gewinn einen Chip mehr aus, als Du

gesetzt hast. Doch wird die Kugel bei sechsunddreißig Umdrehungen im Schnitt genau einmal bei jener Zahl stehen bleiben, die Du mit keinem Chip belegt hast. Dann wirst Du alle fünfunddreißig Chips verlieren. Spielst Du auf diese Weise lange genug, wird die Kurve, die die Schwankungen Deines Kapitalstands zeigt, genauso aussehen wie die, die Du erhältst, wenn Du dem System Deines Zeitungsartikels folgst.'
‚Natürlich habe ich bei meinen Überlegungen durchgehend vorausgesetzt, dass die Bank in keiner Weise bevorzugt ist. Demgegenüber besitzt jedes Roulette, das ich bisher gesehen habe, eine Null, oft auch noch eine Doppel-Null. Das vergrößert die Chancen der Bank gegenüber dem Spieler noch zusätzlich. Also wird das Geld des Spielers, welches System er auch benutzen mag, letztlich aus seiner eigenen Tasche in jene des Besitzers der Spielbank überwechseln."

"Du meinst also", sagte Mr. Tompkins traurig, "dass es so etwas wie ein unfehlbares System gar nicht gibt; dass also keine Möglichkeit besteht, Geld zu gewinnen, ohne dabei mit der wenn auch nur geringfügig höheren Wahrscheinlichkeit rechnen zu müssen, es zu verlieren."
"Genau das wollte ich sagen", erwiderte der Professor. "Meine Ausführungen betreffen darüber hinaus nicht nur so verhältnismäßig unwichtige Probleme wie die Gewinnchancen beim Spielen, sondern auch viele physikalische Phänomene, die auf den ersten Blick mit Wahrscheinlichkeitsgesetzen gar nichts zu tun haben. Wenn man ein System erfinden könnte, mit dem sich die Wahrscheinlichkeitsgesetze ausschalten ließen, könnte man viel aufregendere Dinge anfangen als bloß Geld gewinnen. Man könnte Autos bauen, die ohne Benzin laufen, Dampfmaschinen, die sich ohne Kohle betreiben lassen und eine Menge anderer phantastischer Dinge tun."
"Irgendwo habe ich einmal von einer solchen hypothetischen Maschine gelesen - Perpetuum mobile, glaube ich, nennt man sie", meinte Mr. Tompkins. "Wenn ich mich richtig erinnere, sagt man, es sei unmöglich, Maschinen zu bauen, die ohne Treibstoff laufen, da man Energie nicht aus dem Nichts hervorbringen kann. Wie dem auch sei: Es besteht jedenfalls keine Verbindung zwischen solchen Maschinen und dem Glücksspiel."
"Du liegst damit ganz richtig, mein Lieber", bemerkte der Professor zustimmend, den es freute, dass sein Schwiegersohn wenigstens so etwas wie einen Ansatz physikalischer Bildung zeigte. "Dieser Typ einer in ewiger Bewegung befindlichen Maschine, die man Perpetuum mobile erster Art' nennt, kann deshalb nicht existieren, weil sie dem Satz von der Erhaltung der Energie widerspricht. Die antriebslose Maschine hingegen, die ich meine, gehört einem ganz anderen Typ an, nämlich dem des Perpetuum mobile zweiter Art'. Sie ist nicht dazu bestimmt, Energie aus dem Nichts zu erzeugen, sondern Energie den Wärmereservoirs der Erde, also dem Meer oder der Luft, zu entziehen. Stell Dir zum Beispiel ein Dampfschiff vor, in dessen Kesseln Dampf aufgemacht wurde - und zwar nicht durch Verbrennen von Kohle, sondern dadurch, dass man dem umliegenden Wasser Wärme entzog. Wenn es möglich wäre, Wärme dazu zu zwingen, vom Kälteren zum Wärmeren zu strömen anstatt umgekehrt, könnte man ein Pumpensystem konstruieren, mit dessen Hilfe man Seewasser anpumpt und ihm den Wärmeinhalt entzieht. Die übrig bleibenden Eisblöcke könnte man einfach über Bord werfen. Ein Fas kaltes Wasser, das zu Eis gefriert, gibt genügend Wärme ab, ein zweites Fas kaltes Wasser beinahe bis zum Siedepunkt zu erhitzen. Pumpt man mehrere Liter Meerwasser pro Minute in dieser Weise durch, kann man leicht Wärme genug gewinnen, um eine verhältnismäßig große Maschine zu betreiben. Für alle

praktischen Zwecke würde ein solches Perpetuum mobile zweiter Art denselben Dienst leisten wie eines, das Energie aus dem Nichts erzeugt. Würden Maschinen dieser Art die Arbeit besorgen, könnte jedermann so sorgenfrei leben, wie jemand mit einem unfehlbaren Roulettesystem. Unglücklicherweise sind jedoch beide gleich unmöglich, da beide gleichermaßen die Wahrscheinlichkeitsgesetze verletzen."

"Ich gebe zu, dass die Idee, dem Meerwasser Wärme zu entziehen, um in Schiffskesseln Dampf zu erzeugen, verrückt klingt", sagte Mr. Tompkins. "Es will mir aber nicht gelingen, irgendeine Verbindung zwischen diesem Problem und den Gesetzen eines Glücksspiels zu sehen. Du wirst doch sicherlich nicht vorschlagen wollen, dass Würfel und Rouletteräder als Antriebsteile dieser treibstofflosen Maschinen dienen sollen?"
"Natürlich nicht!" lachte der Professor. "Zumindest kann ich mir nicht vorstellen, dass selbst der verrückteste Erfinder eines Perpetuum mobile auf diese Idee gekommen wäre. Der springende Punkt dabei ist, dass Wärmeprozesse ihrer Natur nach dem Würfelspiel sehr ähnlich sind. Genauso wenig wie man annehmen kann, dass Wärme von einem kälteren Körper zu einem wärmeren Körper strömt, ebenso wenig wird das Geld aus der Bank eines Casinos in Deine Tasche fließen."
"Soll das vielleicht heißen, dass die Bank kalt ist und meine Tasche heiß?" fragte Mr. Tompkins nunmehr völlig verwirrt.
"in gewissem Sinn ja", antwortete der Professor. "Wenn Du meinen Vortrag der letzten Woche nicht versäumt hättest, dann wüsstest Du jetzt, dass Wärme nichts anderes ist als die schnelle, unregelmäßige Bewegung unzählig vieler Teilchen, der Atome und Moleküle nämlich, aus denen alle materiellen Körper bestehen. Je heftiger diese Molekularbewegung ist, desto wärmer erscheint uns der betreffende, Körper. Da diese Bewegung völlig unregelmäßig ist, kann man die Gesetze des Zufalls auf sie anwenden. Dabei lässt sich leicht zeigen, dass der wahrscheinlichste Zustand eines aus einer sehr großen Anzahl von Teilchen bestehenden Systems einer einigermaßen gleichförmigen Verteilung der vorhandenen Gesamtenergie auf diese Teilchen entspricht. Erhitzt man einen Teil des Körpers oder, mit anderen Worten, beginnen sich die Moleküle dieses Teils schneller zu bewegen, dann müsste man erwarten, dass sich diese überschüssige Energie infolge zahlreicher Zusammenstöße bald gleichmäßig auf alle übrigen Teilchen verteilt. Da sich diese Zusammenstöße jedoch rein zufällig ergeben, ist es möglich, dass - rein zufällig - eine bestimmte Gruppe von Teilchen den Großteil der vorhandenen Energie auf Kosten der anderen auf sich konzentriert. Diese spontane Konzentration von Wärmeenergie in einem bestimmten Teil des Körpers würde einen Wärmefluss entgegen dem Temperaturgradienten bedeuten, was grundsätzlich nicht auszuschließen ist. Versucht man allerdings, die relative Wahrscheinlichkeit einer derartigen spontan auftretenden Wärmekonzentration zu berechnen, dann erhält man numerisch so kleine Werte, dass man sagen kann, dieses Phänomen sei praktisch unmöglich."
jetzt begreife ich", sagte Mr. Tompkins. "Du meinst, ein Perpetuum mobile der zweiten Art könne bisweilen funktionieren, doch die Wahrscheinlichkeit, dass dies geschieht, sei genauso gering, als würfe man beim Würfelspiel hundertmal in ununterbrochener Folge die Sechs."
"Die Chancen stehen viel schlechter", erwiderte der Professor. "Die Wahrscheinlichkeit, das Spiel gegen die Natur zu gewinnen, ist in der Tat so klein, dass es schwer ist, sie mit Worten zu beschreiben. Ein Beispiel: Ich kann berechnen, wie wahrscheinlich es ist, dass die

gesamte Luft dieses Raums sich spontan unter dem Tisch hier ansammelt und alles andere zum absoluten Vakuum wird. Die Zahl der Würfel, die auf einmal zu werfen wären, sei dabei gleich der Zahl der Luftmoleküle in diesem Raum. Zunächst muss ich also wissen, wie viele Luftmoleküle es hier gibt. Ein Kubikzentimeter Luft enthält, soweit ich mich erinnere, bei Atmosphärendruck eine durch zwanzig Nullen beschriebene Zahl an Molekülen. Die Anzahl der Luftmoleküle im ganzen Raum muss daher eine Zahl mit etwa siebenundzwanzig Nullen ergeben. Der Raum unterhalb des Tisches macht ungefähr ein Prozent des Gesamtvolumens des Zimmers aus; die Chance, dass sich eines dieser Moleküle unter dem Tisch und nicht irgendwo anders befindet, steht daher eins zu hundert. Um nun zu berechnen, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, dass sich plötzlich alle Moleküle unter dem Tisch befinden, muss ich ein Hundertstel mit einem Hundertstel usw. multiplizieren, je einmal für jedes Molekül im Raum. Das Ergebnis ist eine Dezimalzahl mit vierundfünfzig Nullen. "

"Ach du meine Güte!" seufzte Mr. Tompkins. "Bei so geringen Gewinnchancen würde ich sicherlich nicht wetten. Bedeutet all das nicht, dass Abweichungen von dieser gleichförmigen Verteilung einfach unmöglich sind?"

ja", stimmte der Professor zu, "man kann es als sicher annehmen, dass wir nicht ersticken werden, weil sich alle Luft unter diesem Tisch befindet, und dass übrigens auch die Flüssigkeit in Deinem Whisky glas nicht plötzlich von selbst zu sieden beginnen wird. Betrachtet man aber kleinere Räume, die weit weniger unserer Würfelmoleküle beinhalten, so werden Abweichungen von der statistischen Verteilung viel wahrscheinlicher. Auch in diesem Raum hier zum Beispiel gruppieren sich die Luftmoleküle gewöhnlich an bestimmten Stellen etwas dichter. Es entstehen dabei winzige Inhomogenitäten, die man als statistische Dichtefluktuationen bezeichnet. Wenn das Sonnenlicht die irdische Atmosphäre durchquert, bewirken solche Inhomogenitäten die Streuung der blauen Lichtstrahlen des Spektrums und verleihen so dem Himmel seine gewohnte Farbe. Gäbe es diese Dichtefluktuationen nicht, dann wäre der Himmel stets völlig schwarz und die Sterne blieben auch bei vollem Tageslicht deutlich sichtbar. Auch die leichte Opalessenz, die Flüssigkeiten knapp vor Erreichung des Siedepunktes zeigen, erklärt sich durch dieselben Dichtefluktuationen, die von der Unregelmäßigkeit der molekularen Bewegung herrühren. Doch bei entsprechend großen Dimensionen sind solche Fluktuationen so extrem unwahrscheinlich, dass wir Billionen Jahre warten müssten, ohne welche entdecken zu können."

jedenfalls besteht die Chance für ein so ungewöhnliches Ereignis, auch hier und jetzt in diesem Raum", insistierte Mr. Tompkins. "Oder nicht?"

"Natürlich besteht sie; es wäre unvernünftig, darauf zu beharren, dass eine Suppenschale sich nicht von selbst über den ganzen Tisch ergießen könne, wenn die thermische Bewegung der Hälfte ihrer Moleküle zufällig nach derselben Richtung erfolgt."

"Warum ist diese dumme Sache auch ausgerechnet gestern passiert", warf hier Maud ein, die ihr Magazin zu Ende gelesen hatte und nun interessiert dem Gespräch folgte. "Die Suppe ergoss sich über den Tisch und das Mädchen behauptete, ihn nicht einmal berührt zu haben."

Der Professor kicherte. "In diesem besonderen Fall", sagte er, "habe ich eher das Mädchen im Verdacht, zumindest bevor ich dem Maxwellschen Dämon die Schuld zuschiebe."

"Dem Maxwellschen Dämon?" wiederholte Mr. Tompkins überrascht. "Ich hätte gedacht, Naturwissenschaftler seien die Letzten, die sich über Dämonen und ähnliches Gedanken machen."

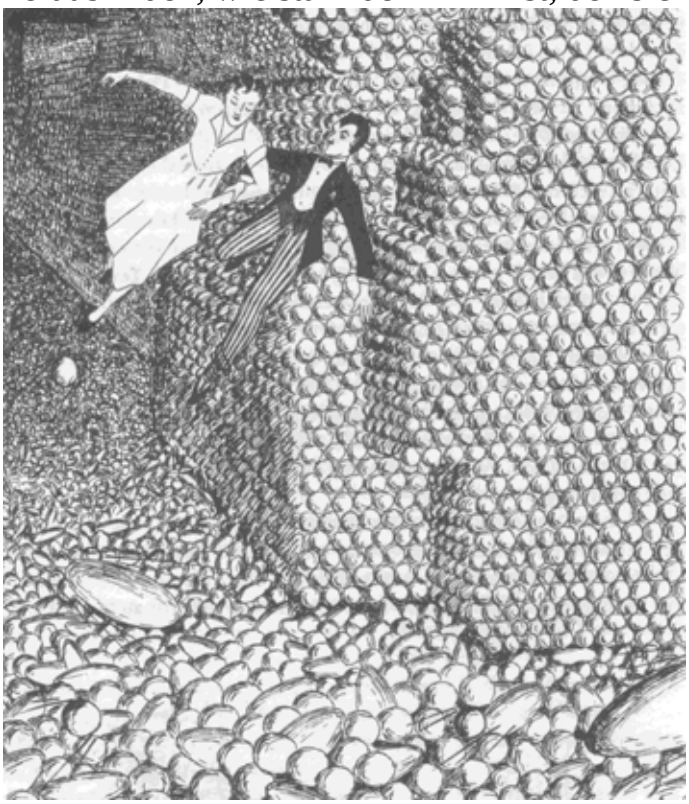
"Nun ja, wir nehmen ihn auch nicht sehr ernst", sagte der Professor. "Der berühmte Physiker Clerk Maxwell ist für die Einführung dieses statistischen Dämons verantwortlich. Es handelt sich dabei einfach um einen bildlichen Ausdruck, den Maxwell benutzte, um die Diskussion über Wärmephänomene anschaulicher zu gestalten. Man beschreibt den Maxwellschen Dämon als einen ziemlich rastlosen Burschen, der imstande ist, die Richtung jedes einzelnen Moleküls beliebig zu verändern. Gäbe es diesen Dämon wirklich, könnte man Wärme von kälteren zu heißeren Stellen fließen lassen und das fundamentale Gesetz der Thermodynamik, das Gesetz von der steten Zunahme der Entropie', wäre keinen Heller wert."
"Entropie?" wiederholte Mr. Tompkins. "Dieses. Wort habe ich doch schon einmal gehört. Einer meiner Kollegen gab einmal eine Party und nach einigen Gläsern begannen Chemiestudenten, die er eingeladen hatte, nach der Melodie von Oh du lieber Augustin' zu singen:

Zu nimmt sie, ab nimmt sie,
ab nimmt sie, zu nimmt sie,
was zum Teufel scherts uns, was
Entropie macht.
Was also ist Entropie?"
"Es ist nicht schwer, dies zu erklären. Entropie' ist einfach ein Ausdruck, den man benutzt, um den Grad der Unordnung der Molekularbewegung in einem gegebenen physikalischen Körper oder einem System von Körpern zu beschreiben. Die zahlreichen unregelmäßigen Zusammenstöße zwischen den Molekülen zielen immer auf eine Vergrößerung der Entropie ab, da absolute Unordnung den wahrscheinlichsten Zustand jedes beliebigen statistischen Systems darstellt. Könnte man dagegen den Maxwellschen Dämon zur Arbeit anhalten, so würde dieser bald Ordnung in die Bewegung der Moleküle bringen -nicht anders als ein guter Schäferhund eine Schafherde einkreist und führt; und die Entropie würde abnehmen. Weiter wäre hier hinzuzufügen, dass im Sinne des von Ludwig Bolzmann eingeführten Theorems ... "
Der Professor hatte offensichtlich vergessen, dass er zu einem Mann sprach, der praktisch nichts von Physik wusste, und nicht zu einer Klasse bereits fortgeschrittener Studenten. So verlor er sich in weitläufigen Ab
Schweifungen, gebrauchte so monströse Worte wie "verallgemeinerte Parameter" und "quasi ergodische Systeme" und war davon überzeugt, die fundamentalen Gesetze der Thermodynamik und deren Beziehungen zur Gibbschen Form der statistischen Mechanik kristallklar dargestellt zu haben. Mr. Tompkins seinerseits war es gewohnt, dass sein Schwiegervater des öfteren über seinen Kopf hinwegredete. Er nippte versonnen an seinem Scotch mit Soda und versuchte möglichst intelligent dreinzuschauen. Maud jedoch war die Aufzählung dieser Glanzlichter der statistischen Physik schließlich zu viel. Sie hatte sich in ihrem Sessel zusammengekauert und war angestrengt bemüht, die Augen offen zu halten. Um ihre Schläfrigkeit zu überwinden, entschloss sie sich, aufzustehen und nachzusehen, was man Abendessen könnte.

"Wünschen Sie etwas, Madame?" fragte mit einer leichten Verbeugung ein hochgewachsener, elegant gekleideter Butler, als sie das Speisezimmer betrat.

" Nein, machen Sie nur weiter" - und sie wunderte sich, warum sich sonst noch jemand außer ihr hier befand. Dies kam ihr besonders seltsam vor, da sie ja niemals einen Butler gehabt hatten und sie sich bestimmt auch keinen leisten könnten. Der Mann war groß und schlank, hatte olivefarbene Haut, eine lange, spitze Nase und grünliche Augen, die seltsam intensiv glühten. Maud schauderte, als sie zwei symmetrische Höcker über seiner Stirn entdeckte, die zur Hälfte von schwarzem Haar bedeckt waren.
"Entweder ich träume", dachte sie, "oder es ist Mephisto persönlich, der sich aus der Oper herbemüht hat. "
"Hat Sie mein Gatte angestellt?" fragte sie laut, nur um etwas zu sagen.
,' Nicht ganz", antwortete der seltsame Butler, wobei er mit einigen kunstvollen Handbewegungen dem für das Abendessen gedeckten Tisch den letzten Schliff verlieh. "Um der Wahrheit die Ehre zu geben: ich kam aus eigenem Antrieb hierher und zwar, um ihrem verehrten Vater zu zeigen, dass ich doch nicht der bloße Mythos bin, für den er mich hält. Erlauben Sie, dass ich mich vorstelle. Ich bin der Maxwellsche Dämon.
"Oh!" atmete Maud erleichtert auf. "So sind Sie vermutlich auch nicht böse, wie die anderen Dämonen, und beabsichtigen auch nicht, irgendjemandem Leid anzutun?"
"Natürlich nicht", erwiderte der Dämon mit einem breiten Lächeln. "Doch ich liebe es, jemandem einen Streich zu spielen, und heute ist Ihr Vater an der Reihe."
"Was wollen Sie denn tun?" fragte Maud beunruhigt. "ich möchte ihm nur zeigen, dass, wenn ich es will, das Gesetz von der Zunahme der Entropie außer Kraft gesetzt wird. Ich möchte Sie davon überzeugen, dass dies möglich ist. Darf ich Sie also um die Ehre Ihrer Gesellschaft bitten? Ich versichere Ihnen, dass es keineswegs gefährlich wird."
Bei diesen Worten fühlte Maud den harten Griff des Dämons an ihrem Arm und alles um sie herum begann verrückt zu spielen. All die vertrauten Gegenstände in ihrem Speisezimmer fingen an mit ungeheurer Geschwindigkeit zu wachsen. Sie konnte gerade noch einen letzten kurzen Blick auf die Lehne eines Stuhls werfen, der bereits den ganzen Horizont bedeckte. Als schließlich alles zur Ruhe gekommen war, fand sie sich am Arm ihres Gefährten durch die Lüfte schwebend wieder. Nebelige Kugeln von der Größe eines Tennisballs schwirrten kreuz und quer um sie herum, doch der Maxwellsche Dämon bewahrte sie klug vor jedem Zusammenstoß mit den gefährlich aussehenden Gebilden. Als Maud hinabblickte, erkannte sie etwas, das aussah wie ein Fischerboot, und bis zum Rand mit zuckenden, silbrigen Fischen gefüllt war. Es waren jedoch keine Fische, sondern unzählige Nebelbälle, ähnlich denen, die an ihnen vorbeigeflogen waren. Der Dämon führte sie näher heran. Schließlich meinte sie von einem Meer grobkörnigen Schleims umgeben zu sein, der in ständiger regelloser Bewegung begriffen war. Einzelne Kugeln wurden aus dieser kochenden Masse an die Oberfläche geschleudert, andere scheinbar hinabgesaugt. Gelegentlich schoss eine mit solcher Geschwindigkeit an die Oberfläche, dass sie sich losriss und in den Raum hinaus flog; dann wieder tauchte eine der Kugeln, die aus der Luft geflogen kamen, in der schleimigen Masse unter und verschwand unter tausenden von anderen Kugeln. Als sich Maud die Masse näher besah, entdeckte sie, dass es zwei verschiedene Arten von Kugeln gab. Die meisten von ihnen glichen Tennisbällen, die größeren und länglichen davon Rugbybällen. Alle waren halbdurchsichtig und schienen eine komplizierte innere Struktur zu besitzen, die Maud nicht erkennen konnte.
"Wo sind wir?" rang Maud nach Atem. "Sieht etwa so die Hölle aus?"
"Nein", lächelte der Dämon, "es gibt jedoch nichts Phantastischeres als dies hier. Wir sehen

uns übrigens aus größter Nähe einen sehr kleinen Teil der Flüssigkeitsoberfläche des Whisky-Sodagemischs an, das Ihren Gatten so erfolgreich wachhält, während sich Ihr Vater über quasi- ergodische Systeme verbreitert. Alle diese Kugeln sind Moleküle. Die kleinen, runden sind Wassermoleküle, die größeren, länglichen Alkoholmoleküle. Wenn Sie sich der Mühe unterziehen wollen, sie zu zählen und ihr Verhältnis zu bestimmen, dann können Sie herausfinden, wie stark der Drink ist, den sich Ihr Mann zubereitet hat."



Sieht etwa so die Hölle aus?

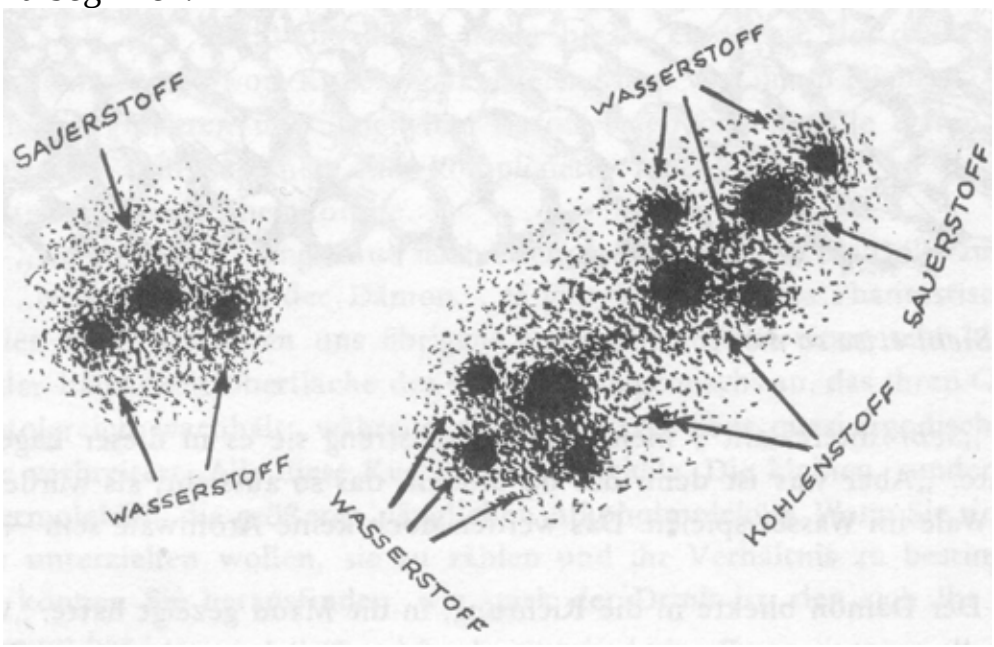
"Sehr interessant", meinte Maud so streng sie es in dieser Lage vermochte. "Aber was ist denn das da drüben, das so aussieht, als würden ein paar Wale im Wasser spielen. Das werden doch keine Atomwale sein - oder doch?"

Der Dämon blickte in die Richtung, in die Maud gezeigt hatte. "Wale? Kaum," meinte er. "Es sind einige sehr feine Teilchen gebrannter Gerste, jenes Mittels, das dem Whisky seinen besonderen Geschmack und die Farbe verleiht. jedes dieser Teilchen besteht aus Millionen und Abermillionen komplexer organischer Moleküle und ist verhältnismäßig groß und schlank. Zusammenstöße mit Wasser- und Alkoholmolekülen als Folge der thermischen Bewegung bewirken, dass Sie so umherspringen sehen. Das Studium solcher mittelgroßer Teilchen, die einerseits so klein sind, dass sie von der Molekularbewegung beeinflusst werden, andererseits aber doch so groß, dass sie mit Hilfe eines stärkeren Mikroskops noch gesehen werden können, gab den Wissenschaftlern den ersten direkten Beweis für die kinetische Theorie der Wärme. Aus der Messung der Intensität dieses einer Tarantella ähnlichen Tanzes, den solch winzige, in Flüssigkeiten schwebende Teilchen aufführen - man spricht hier von der Brownschen Bewegung -, können Physiker direkte Information über die Energie der molekularen Bewegung erhalten."

Wieder fasste der Dämon nach ihrem Arm und geleitete sie weiter. Sie kamen zu einer riesigen Mauer, die aus zahllosen Wassermolekülen bestand, welche wie Ziegelsteine aneinandergefügt waren.

"Phantastisch!" begeisterte sich Maud. "Das ist genau der Hintergrund, den ich mir für ein

Porträt gewünscht habe, das ich soeben male. Was ist das für ein prächtiges Gebäude?"
"Ein Stückchen eines Eiskristalls, der zusammen mit vielen anderen den Eiswürfel im Glas Ihres Gatten bildet," gab der Dämon zur Antwort. "Wenn Sie mich jetzt aber entschuldigen wollen, denn es ist höchste Zeit, mit meinem Streich an dem alten, selbstsicheren Professor zu beginnen."



Mit diesen Worten verließ der Maxwellsche Dämon Maud, die sich wie ein in Bedrängnis geratener Bergsteiger an der Zacke eines Eiskristalls festklammerte, und machte sich an die Arbeit. Mit einem wie ein Tennisschläger aussehenden Gerät begann er gegen die Moleküle rund um sich zu schlagen. Er schlug hierhin und dahin und traf erstaunlicherweise immer im richtigen Moment eines jener widerspenstigen Moleküle, das immer wieder hartnäckig versuchte, sich in die falsche Richtung zu bewegen. Trotz ihrer offensichtlich gefährlichen Lage konnte Maud nicht umhin, seine unglaubliche Schnelligkeit und Treffsicherheit zu bewundern, und ertappte sich dabei, wie sie begeistert jubelte, wenn er wieder erfolgreich ein besonders widerspenstiges und schnelles Molekül ablenken konnte. Verglichen mit dieser glanzvollen Vorführung, deren Zeugin sie nun war, erschienen ihr die Tennischampions, die sie bisher gesehen hatte, als blutige Anfänger. Nach wenigen Minuten waren die Früchte der Arbeit des Dämons deutlich sichtbar. Obwohl nun der eine Teil der Flüssigkeitsoberfläche mit sehr langsamen und verhältnismäßig ruhigen Molekülen bedeckt war, brodelte der zu ihren Füßen befindliche Bereich schrecklicher als je zuvor. Die Zahl der Moleküle, die sich während des Verdampfens von der Oberfläche lösten, stieg sehr rasch an. jetzt entwichen sie in Gruppen von tausenden, indem sie als riesige Blasen aus der Oberfläche schossen. Bald darauf verdeckte eine Dampfwolke Mauds Blickfeld. Nun konnte sie den hin- und hersausenden Schläger des Dämons und die Frackschöße seines Anzugs, die inmitten der sich wie rasend gebärdenden Moleküle flatterten, nur noch gelegentlich sehen. Schließlich gaben die Moleküle ihres eiskristallenen Sitzes nach und sie stürzte in die dicken Dampfwolken hinab.
Als sich die Wolken auflösten, fand sich Maud in demselben Lehnstuhl wieder, in dem sie gesessen war, bevor sie das Esszimmer betreten hatte.
"Du heilige Entropie!" schrie ihr Vater laut auf und starrte verstört auf das Whiskyglas des

Mr. Tompkins. "Es kocht!"
Die Flüssigkeit im Glas war mit wild brodelnden Blasen bedeckt und eine feine Dampfwolke bewegte sich langsam gegen die Zimmerdecke. Besonders eigenartig war dabei jedoch, dass das Getränk nur auf einer verhältnismäßig kleinen Fläche rund um den Eiswürfel siedete. Der Rest blieb völlig kalt.
" Bewahrt diesen Augenblick im Gedächtnis!" fuhr der Professor mit ehrfürchtiger, leicht zitternder Stimme fort. "Gerade jetzt, da ich Euch von statistischen Fluktuationen im Entropiegesetz erzähle, können wir sie hier mit eigenen Augen erleben. Infolge eines unglaublichen Zufalls, vielleicht zum ersten Mal seit Bestehen des Erdballs überhaupt, haben sich alle schnellen
Moleküle an einem Teil der Wasseroberfläche konzentriert und das Wasser hat so von selbst zu sieden begonnen! Auch für die folgenden Jahrbillionen werden wir wahrscheinlich die einzigen gewesen sein, die Gelegenheit hatten, dieses außergewöhnliche Phänomen zu beobachten." Er blickte nachdenklich auf das Getränk, das nun langsam abzukühlen begann. "Welch ein Glücksfall!" flüsterte er selig vor sich hin.

Du heilige Entropie! Es kocht!

10 Das heitere Volk der Elektronen

An einem der folgenden Tage erinnerte sich Mr. Tompkins bei Beendigung seines Abendessens daran, dass heute der Vortrag des Professors über die Struktur der Atome stattfinden sollte und dass er versprochen hatte, sich diesen anzuhören. Doch hatte er die langwierigen Ausführungen seines Schwiegervaters so satt, dass er beschloss, den Vortrag einfach zu vergessen und einen ruhigen Abend zu Hause zu verbringen. Gerade als er im Begriff war, es sich mit einem Buch gemütlich zu machen, durchkreuzte Maud seine Pläne, indem sie auf die Uhr blickte und freundlich, aber streng bemerkte, dass es jetzt bald Zeit für ihn sei zu gehen. So fand er sich denn eine halbe Stunde später auf einer harten Holzbank im Hörsaal der Universität, zusammen mit einer Gruppe eifriger junger Studenten wieder.
"Meine Damen und Herrn", begann der Professor, wobei er seine Zuhörer gemessen über den Rand seiner Brille hinweg betrachtete. "In meinem letzten Vortrag versprach ich, Ihnen

Genaueres über die innere Struktur der Atome zu erzählen und Ihnen zu erklären, in welcher Weise die charakteristischen Merkmale dieser Struktur für deren physikalische und chemische Eigenschaften verantwortlich sind. Natürlich wissen Sie, dass man heute nicht mehr die Atome als elementare unteilbare Bestandteile der Materie betrachtet, sondern dass diese Rolle viel kleinere Teilchen, wie Elektronen, Protonen usw. übernommen haben.

Die Idee der Existenz elementarer Bausteine, die den letztmöglichen Schritt in der Teilbarkeit der Materie darstellen, geht auf den frühen griechischen Philosophen Demokrit zurück, der im vierten Jahrhundert vor Christus lebte. Über die verborgene Natur der Dinge meditierend., stieß Demokrit auf das Problem der Struktur der Materie und sah sich mit der Frage konfrontiert, ob es möglich sei, dass die Materie aus unendlich kleinen Teilchen bestehe. Da es zu dieser Zeit nicht üblich war, ein Problem anders als durch bloßes Nachdenken zu lösen, und da es ausgeschlossen war, an eine solche Frage mit experimentellen Methoden heranzugehen, suchte Demokrit in den Tiefen seines Geistes nach der Lösung seines Problems. Auf der Basis einiger obskurer philosophischer Überlegungen kam er letztlich zu dem Schluss, es sei undenkbar', dass Materie endlos in immer kleiner werdende

Teile gespalten werden könne und dass man die Existenz eines kleinsten Teilchens' annehmen müsse, das nicht weiter zerlegbar sei. Er nannte diese Teilchen Atome', was im Griechischen, wie Sie wahrscheinlich wissen, die Unteilbaren' bedeutet.

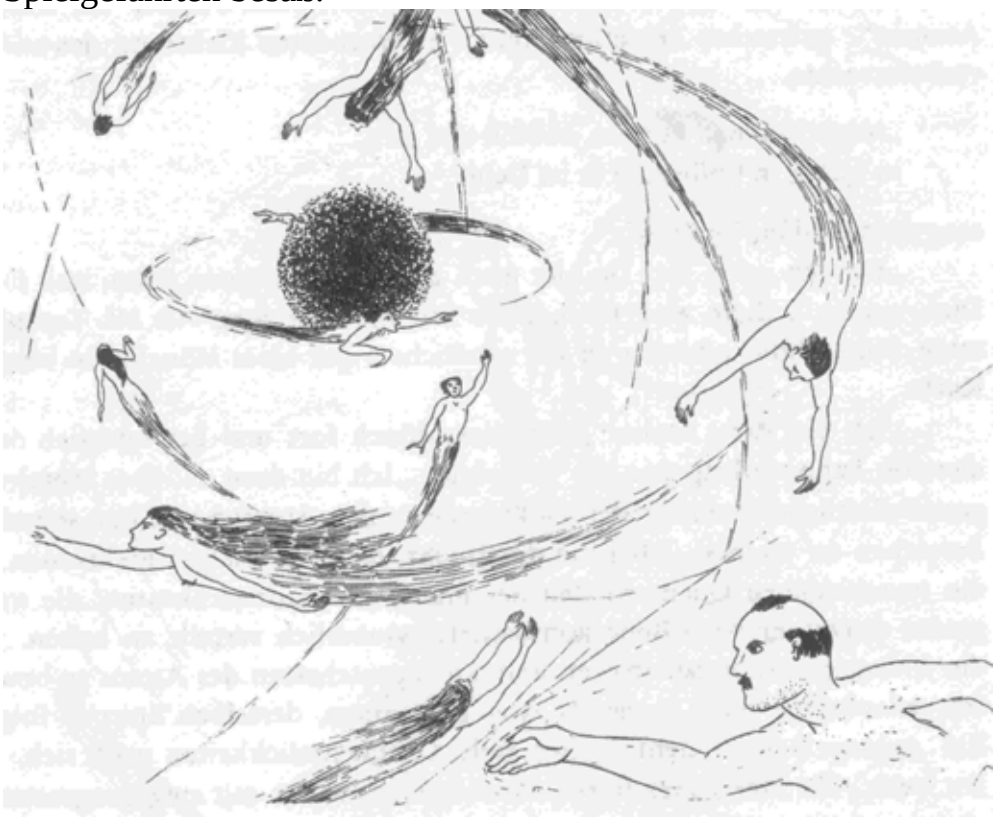
Ich möchte den großen Anteil, der Demokrit am Fortschritt der Naturwissenschaft zukommt, nicht schmälern; es ist jedoch wert, festgehalten zu werden, dass neben Demokrit und seinen Schülern auch eine andere griechische Philosophenschule existierte, deren Anhänger behaupteten, dass der Prozess der Teilbarkeit ins Unendliche fortgeführt werden könne. Unabhängig von der Antwort, die in Zukunft durch die exakte Naturwissenschaft erfolgen sollte, ist also die Philosophie des antiken Griechenlands mit einem ehrenvollen Platz in der Geschichte der Physik bedacht. Zur Zeit Demokrits und in den folgenden Jahrhunderten war die Existenz solcher unteilbarer Materieteilchen jedenfalls bloße philosophische Hypothese. Erst im neunzehnten Jahrhundert waren die Wissenschaftler davon überzeugt, diese unteilbaren Bausteine der Materie endlich gefunden zu haben, die von jenem alten griechischen Philosophen vor mehr als zweitausend Jahren vorausgesagt worden waren.

Im Jahre 1808 zeigte nämlich der englische Chemiker John Dalton dass die relativen Proportionen ..."

Eigentlich hatte Mr. Tompkins schon gleich zu Beginn des Vortrag das unwiderstehliche Bedürfnis verspürt, die Augen zu schließen und während des restlichen Vortrags vor sich hin zu dösen. Nur die akademische Streng(der Bank hielt ihn davon ab, sein Vorhaben auszuführen. Daltons Gebet; der relativen Proportionen besorgte nun jedenfalls den Rest. Bald konnte man daher in der Stille des Auditoriums ein sanftes Schnarchen vernehmen das aus der Ecke drang, in der Mr. Tompkins saß.

Als Mr. Tompkins einzuschlafen begann, schien das Unbehagen, da ihm die widerspenstige Bank bereitete, in das angenehme Gefühl eines Durch die- Luft- Gleitens überzugehen. Er öffnete die Augen und stellte überrasch fest, dass er mit halsbrecherischer Geschwindigkeit durch den Raum dahin schoss. Um sich blickend, entdeckte er, dass er auf dieser phantastischen Reis nicht allein war. In seiner Nähe schwirrte eine Anzahl nebelhaft-verschwor meiner Figuren um ein großes, schwerfällig aussehendes Objekt in ihre Mitte. Diese seltsamen Wesen zogen in Paaren dahin, wobei sie auf keil förmigen und elliptischen

Bahnen fröhlich hintereinander herjagten. Mi Tompkins überkam plötzlich ein Gefühl der Einsamkeit, als er merkte, da er der einzige in der ganzen Gruppe war, der keinen Spielgefährten besaß.



Nebelhaft- verschwommene Figuren umkreisten ein großes Objekt.

"Warum habe ich bloß Maud nicht mitgenommen?" fragte er sich betrübt. Wir hätten in dieser unbekümmerten Gesellschaft hier eine schöne Zeit verlebt." Die Bahn, auf der er sich bewegte, lag weiter draußen als alle anderen Bahnen. Obwohl er sich gerne den übrigen angeschlossen hätte, hielt ihn das quälende Gefühl, ein Außenseiter zu sein, letztlich davon ab. Als jedoch eines der Elektronen (denn Mr. Tompkins hatte mittlerweile erkannt, dass er sich auf wunderbare Weise dem Elektronenverband eines Atoms angeschlossen hatte) auf seiner langgezogenen Bahn nahe an ihm vorbeikam, beschloss er schließlich doch, sich über seine Lage zu beschweren.
"Warum hat man nicht auch mir jemanden gegeben, mit dem ich spielen kann?" rief er hinüber.
"Weil unser Atom ungrad zahlig ist. Du bist das Valenzelektro-o-on rief das Elektron zurück, indem es eine Kehre beschrieb und wieder in den tanzenden Schwarm untertauchte.
"Valenzelektronen leben allein oder sie finden Partner bei anderen Atomen", quietschte der hohe Sopran eines anderen Elektrons, das an ihm vorbeirauschte.
"Magst Du 'nen Partner, hübsch und fein, so spring in Chlor und er ist Dein", sang spöttelnd ein anderes.
"Wie ich sehe, bist Du hier noch ziemlich neu, mein Sohn, und fühlst Dich einsam", sagte eine freundliche Stimme über ihm. Als Mr. Tompkins seine Augen hob, erblickte er die rundliche Figur eines Mönches in brauner Kutte.
" Ich bin Pater Paulini", fuhr der Mönch fort und bewegte sich dabei dieselbe Bahn entlang wie Mr. Tompkins. "Ich bin dazu da, über Moral und gesellschaftliche Ordnung der

Elektronen in den Atomen und den sonstigen Bereichen zu wachen. Ich habe die Pflicht, diese verspielten Elektronen auf die verschiedenen Quantenzellen der prächtigen Atomstrukturen, die unser großer Architekt Niels Bohr konstruierte, säuberlich verteilt zu halten. Um die Ordnung aufrechtzuerhalten und die Eigenschaften des Atoms zu bewahren, erlaube ich nicht mehr als zwei Elektronen, derselben Spur zu folgen. Ein manage ä trois ' zieht immer viele Unannehmlichkeiten nach sich, wie Du weißt. Die Elektronen treten daher stets in Paaren mit entgegengesetztem ‚Spin' auf. Niemand darf in eine Zelle eindringen, wenn sie bereits von einem Paar besetzt ist. Das ist eine gute Regel, und ich darf hinzufügen, dass kein einziges Elektron bisher dieses Gebot durchbrochen hat."
"Schon möglich, dass dies eine gute Regel ist", warf Mr. Tompkins ein, "doch für mich ist sie im Augenblick ziemlich unangenehm."
"Das sehe ich", lächelte der Mönch. "Du hast eben das Pech, in einem ungeradzahleigen Atom ein Valenzelektron zu sein. Das Natriumatom, dem Du angehörst, ist infolge der elektrischen Ladung seines Kerns (jener großen, dunklen Masse, die Du im Zentrum siehst) berechtigt, elf Elektronen bei sich zu haben. Zu Deinem Unglück ist elf aber eine ungerade Zahl, was jedoch, wenn man bedenkt, dass genau die Hälfte aller Zahlen ungerade ist und also bloß die andere Hälfte gerade, kein besonders ungewöhnlicher Umstand ist. Als Nachzügler wirst Du daher zumindest für eine Weile allein bleiben müssen."
"Heißt das, dass eine Chance besteht, dass ich später einmal Anschluss finde?" fragte Mr. Tompkins erwartungsvoll. "Zum Beispiel, indem ich einen der Alteingesessenen hinausbugsiere?!"

Pater Paulini warbt über die Moral der Elektronen.

"So etwas gehört sich nicht", erwiderte der Mönch, wobei er drohend seinen rundlichen Finger hob. "Doch besteht natürlich immer die Chance, dass einige der Zentrumsmitglieder durch eine äußere Störung hinausgeworfen werden und eine freie Stelle hinterlassen. Ich würde aber in Deinem Fall nicht allzu sehr damit rechnen."
"Man hat mir gesagt, dass ich besser wegkäme, wenn ich zu Chlor überwechselte", meinte Mr. Tompkins, durch Pater Paulinis Worte entmutigt. "Können Sie mir sagen, wie ich das

anstellen kann?"
"Mein Gott, junger Mann!" rief der Mönch besorgt. "Warum musst Du auch unbedingt eine Gefährtin haben? Kannst Du denn Einsamkeit nicht schätzen und diese vom Himmel gesandte Gelegenheit nützen, um in Frieden Einkehr zu halten? Warum müssen sogar Elektronen immer eine Neigung zum weltlichen Leben zeigen? Nun denn, wenn Du auf Gesellschaft bestehst, so werde ich Dir also bei der Erfüllung Deines Wunsches helfen. Blickst Du in die Richtung, in die ich zeige, so siehst Du ein Chloratom, das sich uns nähert. Sogar von hier aus kannst Du eine unbesetzte Stelle ausnehmen, an der Du ganz gewiss willkommen geheißen wirst. Die leere Stelle liegt in der äußeren Elektronengruppe, der sogenannten M-Schale. Sie sollte aus insgesamt acht Elektronen, die vier Paare bilden, bestehen. Doch wie Du siehst, drehen sich zwar vier Elektronen nach der einen Richtung, aber nur drei nach der anderen: ein Platz ist also frei. Die beiden inneren Schalen, die sogenannte K- und L-Schale, sind vollständig besetzt. Das Atom wird daher froh sein, Dich zu gewinnen und so auch seine Außenschale voll besetzt zu haben. Sobald die zwei Atome nahe beisammen sind, spring einfach hinüber, wie das Valenzelektronen gewöhnlich tun. Und: Friede sei mit Dir, mein Sohn!" Bei diesen Worten löste sich die Ehrfurcht gebietende Gestalt des Elektronenpaters mit einem Mal in Luft auf.
Mr. Tompkins, der sich jetzt beträchtlich wohler fühlte, sammelte seine Kräfte zu einem halsbrecherischen Sprung in das Orbital des vorbeiziehenden Chloratoms. Zu seiner Überraschung vermochte er jedoch mit müheloser Eleganz überzusetzen und fand sich in der kongenialen Gesellschaft der Mitglieder der M-Schale des Chloratoms wieder.
"Es war reizend von Dir, Dich uns anzuschließen!" rief ihm seine neue Partnerin entgegengesetzten Spins zu und glitt dabei graziös ihre Bahn entlang. "Nun kann niemand mehr behaupten, dass unsere Gemeinschaft nicht vollständig sei. Wir alle werden viel Spaß miteinander haben!"
Mr. Tompkins musste zugeben, dass es hier sehr lustig zuging. Eine Sorge jedoch konnte er trotzdem nicht loswerden. "Wie werde ich das alles Maud erklären, wenn wir uns wiedersehen?" dachte er etwas schuldbewusst bei sich - aber nicht lange. "Sie wird sicherlich nichts dagegen einwenden", resümierte er, "schließlich sind es ja bloß Elektronen."
"Warum geht denn das Atom, das Du gerade verlassen hast, nicht weg?" fragte seine Gefährtin schmollend. "Hofft es noch immer, Dich zurückzugewinnen?"
Und tatsächlich. das Natriumatom, dessen Valenzelektron nun fehlte, hielt sich weiterhin ganz dicht beim Chloratom, als ob es hoffte, Mr. Tompkins würde sich wieder anders besinnen und auf seine vereinsamte Bahn zurückspringen."Was soll das!" rief Mr. Tompkins böse und blickte dabei finster auf das Atom, das ihn zuvor so kühl empfangen hatte. "So ein Neidhammel! "
"Ach, so machen sie es immer", meinte ein erfahreneres Mitglied der M-Schale. "Soviel ich verstehe, ist es nicht so sehr der Elektronenverband des Atoms, der Dich zurückhaben will, sondern vielmehr der Natriumkern selbst. Zwischen dem zentralen Kern und seiner elektronischen Eskorte gibt es fast immer gewisse Missstimmigkeiten. der Kern wünscht so viele Elektronen um sich, wie er mit seiner elektrischen Ladung halten kann, während es die Elektronen selbst vorziehen, gerade zahlreich genug zu sein, um die Schale vollständig besetzen zu können. Es gibt nur wenige Atomarten, die sogenannten Edelgase, in welchen die Ansprüche des Kerns und die der ihm untergeordneten Elektronen voll harmonieren. Solche Atome, wie zum Beispiel Helium, Neon und Argon, sind mit sich selbst durchaus

zufrieden. weder schließen sie eines aus ihrer Runde aus, noch laden sie ein neues dazu ein. Sie sind chemisch träge und halten sich von den anderen Atomen fern. Doch bei allen übrigen Atomen sind die Elektronenverbände stets bereit, ihre Mitgliedszahl zu verändern. Im Natriumatom, in dem Du zuvor beheimatet warst, ist der Kern infolge seiner elektrischen Ladung berechtigt, ein Elektron mehr an sich zu binden, als zur Aufrechterhaltung der Harmonie innerhalb der Schalen nötig ist. Andererseits reicht in unserem Atom das normale Kontingent an Elektronen nicht für eine vollständige Harmonie aus und daher begrüßen wir Dein Eintreffen, obwohl Deine Anwesenheit unseren Kern überlastet. Solange Du hier bleibst, ist unser Atom nämlich nicht mehr neutral, sondern besitzt eine zusätzliche elektrische Ladung. Deshalb steht ihm das Natriumatom, das Du verlassen hast, bei und wird seinerseits durch elektrische Anziehungskraft gebunden. Einmal habe ich unseren großen Priester, Pater Paulini, sagen gehört, dass man solche atomare Gemeinschaften mit zusätzlichen oder fehlenden Elektronen negative beziehungsweise positive Ionen' nennt. Er gebrauchte auch das Wort Molekül' für Gruppen von zwei oder mehr Atomen, die durch elektrische Kräfte aneinander gebunden sind. Diese besondere Verbindung eines Natrium- und eines Chloratoms bezeichnet er als Speisesalz-Molekül', was immer das auch heißen mag."
"Meinst Du, Du kannst mir einreden, dass Du nicht weißt, was Speisesalz ist?" sagte Mr. Tompkins, der völlig vergessen hatte, mit wem er sprach. "Nun, es ist das, was Du beim Frühstück auf Deine Rühreier streust."
"Was ist das, Frühstück und Rühr-Eier'?" fragte das Elektron voller Neugier. Mr. Tompkins sprudelte sogleich zahllose Erläuterungen 'hervor, erkannte aber schließlich die Fruchtlosigkeit seines Bemühens, auch nur die
einfachsten Details des menschlichen Lebens seinem Gefährten verständlich zu machen. "Das ist es also, weshalb ich aus ihrem Gerede über Valenzen und vollbesetzte Schalen nicht recht klug werden kann", sagte er zu sich selbst und war entschlossen, seinen Besuch in dieser phantastischen Welt zu genießen, ohne sich darum zu kümmern, ob er sie auch verstehe. Doch es war nicht so einfach, von dem geschwätzigen Elektron loszukommen, das offensichtlich das große Bedürfnis hatte, alle im Laufe eines langen Elektronenlebens erworbenen Kenntnisse weiterzugehen.
"Du darfst nicht glauben", fuhr es fort, "dass für den Zusammenschluss von Atomen zu Molekülen jeweils bloß ein einziges Valenzelektron verantwortlich ist. Es gibt Atome, wie zum Beispiel das Sauerstoffatom, die zwei Elektronen benötigen, um ihre Schalen zu vervollständigen, und auch Atome, die drei und mehr Elektronen brauchen. Andererseits binden manche Kerne zwei oder mehr zusätzliche oder Valenzelektronen. Treffen solche Atome aufeinander, findet ein fortwährendes Austauschen und Sicht-Binden statt. Als Resultat entstehen dann verhältnismäßig komplexe Moleküle, die oft aus Tausenden von Atomen bestehen. Es gibt auch sogenannte homopolare' Moleküle, also Moleküle, die aus zwei gleichartigen Atomen bestehen. Das ist allerdings eine sehr unangenehme Situation."
"Unangenehm? Warum?" fragte Mr. Tompkins, der sich nun wieder für die Sache zu interessieren begann.
"Es macht zuviel Mühe, sie beisammen zu halten", führte das Elektron aus. "Vor einiger Zeit erhielt ich zufällig einen solchen Job. Ich hatte während jener ganzen Zeit keine einzige freie Minute. Nun ja, es sind eben keineswegs dieselben Verhältnisse wie hier, wo das Valenzelektron nichts weiter tut, als es sich gut gehen und das nach elektrischen Ladungen

hungernde, verlassene Atom einfach daneben stehen zu lassen. Nein, mein Lieber! Um die beiden gleichartigen Atome zusammenzuhalten, muss es hin- und herspringen, von einem zum anderen und wieder zurück. Ich gebe Dir mein Wort, man fühlt sich dabei wie ein Pingpong-Ball. "
Mr. Tompkins war nicht wenig überrascht, das Elektron, das nicht wusste, was Rühreier sind, nun so selbstverständlich von Pingpong-Bällen reden zu hören, doch enthielt er sich einer Bemerkung.

"Diesen Job werde ich nie mehr annehmen", brummte das faule Elektron vor sich hin, von einer Flut unangenehmer Erinnerungen übermannt. "Da, wo ich jetzt bin, fühle ich mich recht wohl."
"Moment mal!" rief es plötzlich. "ich glaube, ich sehe eine noch bessere Stelle für mich. Auf Wiedersehen!" und mit einem riesigen Sprung stürzte es sich in das Innere des Atoms.
Als Mr. Tompkins in die Richtung sah, in die sein Gesprächspartner geeilt war, verstand er, was geschehen war. Offenbar war eines der Elektronen aus dem inneren Bereich durch ein sehr schnelles fremdes Elektron, das unversehens in ihr System eingedrungen war, aus dem Atom herausgeschleudert worden, wodurch eine behagliche Stelle in der K-Schale frei wurde. Unzufrieden mit sich selbst, weil er die Gelegenheit verpasst hatte, sich einen Platz im Innern zu erobern, verfolgte Mr. Tompkins nun mit großem Interesse den Weg des Elektrons, mit dem er soeben gesprochen hatte. Immer tiefer drang dieses glückliche Elektron in das Innere des Atoms ein und helle Lichtstrahlen begleiteten seinen triumphalen Flug. Erst als es das innere Orbital erreicht hatte, erlosch endlich diese fast unerträgliche Strahlung.
"Was war das?" fragte Mr. Tompkins, dessen Augen vom Anblick dieser unerwarteten Erscheinung schmerzten. "Wozu diese ganze Pracht?"
"Ach, das ist bloß die Emission von Röntgenstrahlen, die mit einem solchen Übergang verbunden ist", erklärte seine Orbitalgefährtin und lächelte über seine Verwunderung. "Immer, wenn es einem von uns gelingt, tiefer in das Innere des Atoms einzudringen, muss die überschüssige Energie in Form von Strahlung emittiert werden. Der glückliche Bursche da vollführte einen wahrhaft mächtigen Satz und machte damit eine Menge Energie frei. Meist müssen wir uns hier in den Außenbezirken des Atoms mit kleineren Sprüngen zufrieden geben; in diesem Fall bezeichnet man unsere Strahlung als sichtbares Licht' - wenigstens nennt Pater Paulini es so. "
"Dieses Röntgenlicht - oder wie immer Du es nennen magst - ist doch auch sichtbar", protestierte Mr. Tompkins. "Deine Terminologie kommt mir etwas irreführend vor."
"Nun, wir sind Elektronen und für jede Art von Strahlung aufnahmefähig. Doch Pater Paulini berichtete uns, es gebe riesige Kreaturen, die er Menschen nennt. Diese könnten Licht nur dann sehen, wenn es innerhalb eines engen Energieintervalls oder, wie er es charakterisiert, eines Wellenlängenintervalls liegt. Er erzählte uns einmal, dass es eines großen Mannes bedurfte - Röntgen, glaube ich, war sein Name -, diese Strahlen zu entdecken, und er sagte, dass sie heute in einem breiten Bereich Anwendung finden, den er Medizin' nannte."
"Oh ja, darüber weiß ich ziemlich viel", sagte Mr. Tompkins, stolz darauf, dass nun er sein Wissen demonstrieren konnte. "Möchtest Du, dass ich Dir mehr davon erzähle?"
"Nein, danke", erwiderte das Elektron gähnend. "Ich mach' mir so gut wie nichts daraus. Kannst Du denn nicht glücklich sein, ohne zu sprechen? Versuch lieber, mich zu fangen!"

Und lange danach noch erfreute sich Mr. Tompkins an dem angenehmen Gefühl, mit den anderen Elektronen durch den Raum zu gleiten, großartigen Trapezkünstlern vergleichbar. Doch da fühlte er auf einmal, dass sich seine Haare aufzustellen begannen, eine Erfahrung, die er einmal während eines Gewitters in den Bergen gemacht hatte. Die Ursache war klar- eine starke elektrische Störung näherte sich ihrem Atom und brachte die Harmonie ihrer Bewegung in Unordnung. Die Elektronen wurden zu bedeutsamen Abweichungen von ihren Bahnen gezwungen. Vom Standpunkt eines menschlichen Physikers aus betrachtet war nur eine einzige Welle ultravioletten Lichts durch die Stelle hindurchgegangen, an der sich dieses einzelne Atom gerade befunden hatte. Doch für die winzigen Elektronen war es ein schrecklicher elektrischer Sturm gewesen.

"Halt Dich gut fest!" schrie gellend einer seiner Kameraden, "sonst wirst Du von photoelektrischen Kräften fortgeschleudert!" Doch schon war es zu spät. Mr. Tompkins wurde seinen Kameraden entrissen und mit ungeheurer Geschwindigkeit durch den Raum gewirbelt, so gezielt, als wäre er von zwei kräftigen Fingern erfasst worden. Atemlos sauste er weiter und immer weiter durch den Raum, vorbei an allen möglichen Arten verschiedener Atome - so rasch, dass er die einzelnen Elektronen kaum voneinander unterscheiden konnte. Plötzlich tauchte ein riesiges Atom genau vor ihm auf. Er erkannte, dass ein Zusammenstoß unvermeidbar war.

"Verzeih, aber ich bin das Opfer eines Photoeffekts und ich kann nicht begann Mr. Tompkins höflich, doch der Rest seines Satzes verlor sich in einem ohrenbetäubenden Knall, da er mit irgend einem äußeren Elektron frontal zusammenprallte. Beide stürzten kopfüber in den Raum hinaus. Mr. Tompkins hatte jedoch den Großteil seiner Geschwindigkeit bei dem Zusammenstoß eingebüßt und war nun imstande, seine neue Umgebung etwas näher zu untersuchen. Die Atome, die sich um ihn herum türmten, waren viel größer als alle, die er zuvor gesehen hatte. Er konnte genau neunundzwanzig Elektronen in jedem von ihnen zählen. Hätte er in der Physik besser Bescheid gewusst, würde er sie als Kupferatome wiedererkannt haben. Doch diese abgezirkelten Blöcke hatten wirklich keinerlei Ähnlichkeit mit Kupfer! Die Atome waren ziemlich dicht aneinandergefügt und bildeten ein regelmäßiges Muster, das sich so weit erstreckte, wie er sehen konnte. Was aber Mr. Tompkins am meisten überraschte, war, dass diese Atome nicht besonders darauf erpicht schienen, ihren Elektronenanteil bei sich zu behalten; dies betraf vor allem ihre äußeren Elektronen. Tatsächlich standen ihre äußeren Orbitale im allgemeinen leer und Scharen ungebundener Elektronen trieben träge durch den Raum, wobei sie von Zeit zu Zeit
an der Peripherie des einen oder anderen Atoms kurz haltachten. Von seinem halsbrecherischen Flug durch den Raum ziemlich müde geworden, versuchte Mr. Tompkins vorerst, an einem festen Orbital eines der Kupferatome ein wenig Ruhe zu finden. Doch bald wurde auch er vom allgemeinen Hang der Menge zum Vagabundieren angesteckt und schloss sich der unbestimmten Bewegung des Elektronenschwarms an.

"Die Organisation funktioniert hier nicht besonders gut", meinte er zu sich selbst. "Zu viele der Elektronen kümmern sich offenbar nicht um ihren Job. Meines Erachtens müsste da Pater Paulini einmal nach dem rechten sehen. "

"Ich? Warum?" sagte da die vertraute Stimme des Mönchs, der plötzlich aus dem Nichts wieder Gestalt angenommen hatte. "Diese Elektronen gehorchen sehr wohl meinen Befehlen und erfüllen übrigens eine in der Tat sehr wichtige Aufgabe. Vielleicht interessiert es Dich,

zu erfahren, dass es keine Leitfähigkeit gäbe, wenn alle Atome so sehr ihren Elektronenanteil zu halten suchten, wie dies manche machen. Du würdest dann in Deinem Haus nicht einmal eine elektrische Glocke besitzen, nicht zu reden von elektrischen Lampen oder einem Telefon."
"Ach, Sie wollen damit sagen, dass diese Elektronen den elektrischen Strom transportieren?" fragte Mr. Tompkins in der Hoffnung, dass die Konversation sich nun einem Gegenstand zuwenden würde, mit dem er mehr oder weniger vertraut war. "Ich kann aber keine bestimmte Richtung in ihrer Bewegung erkennen."
"Vor allem, mein junge", erwiderte der Mönch streng, "gebrauche nicht das Wort sie'; sag einfach wir'. Du scheinst vergessen zu haben, dass Du selbst ein Elektron bist. In dem Moment, in dem jemand auf den Knopf drückt, an den dieser Kupferdraht angeschlossen ist, bewirkt die elektrische Spannung, dass Du genauso gut wie all die anderen Leitungselektronen forteilst, um das Dienstmädchen zu rufen oder zu tun, was immer nötig sein mag. "
‚Aber ich will doch gar nicht!" sagte Mr. Tompkins entschlossen, einen Zug von Gereiztheit in der Stimme. "Die Wahrheit zu sagen: Ich bin es satt, ein Elektron zu sein, und finde es auch nicht mehr besonders lustig. Was ist das für ein Leben, wenn man nur Elektronenpflichten zu erfüllen hat - und das für immer und ewig!"
"Nicht unbedingt für ewig", entgegnete Pater Paulini, der Widerspruch von seiten gewöhnlicher Elektronen ganz und gar nicht liebte. "Es besteht ja immerhin die Möglichkeit, dass Du vernichtet wirst und zu existieren aufhörst. "Wie? Ver- vernichtet?" wiederholte Mr. Tompkins, und kalte Schauer liefen ihm über den Rücken. "Aber ich habe doch immer geglaubt, Elektronen lebten ewig?"
"Das haben auch die Physiker noch vor verhältnismäßig kurzer Zeit allgemein angenommen", meinte Pater Paulini verständnisvoll, von der Wirkung seiner Worte amüsiert. "Doch es stimmt nicht zur Gänze. Elektronen können geboren werden und sterben - genauso wie menschliche Lebewesen. So etwas wie einen Tod aus Altersschwäche gibt es dabei freilich nicht; der Tod tritt immer nur infolge von Zusammenstößen ein."
"Erst kürzlich hatte ich einen Zusammenstoß, und einen recht argen noch dazu", sagte Mr. Tompkins, der wieder etwas Zuversicht gewann. "Und wenn nicht einmal der mich außer Gefecht zu setzen vermochte, wie soll das dann ein anderer können?"
"Es handelt sich nicht um die Frage, wie stark der Zusammenprall ist", korrigierte ihn Pater Paulini, "sondern es geht darum, mit wem man zusammenstößt. Bei Deinem kürzlich erlittenen Zusammenstoß bist Du wahrscheinlich auf ein anderes negatives Elektron geprallt, das Dir selbst sehr ähnlich war. Bei einem solchen Zusammenprall besteht nicht die geringste Gefahr. Ihr könntet jahrelang wie zwei Böcke gegeneinander anrennen und würdet keinerlei Wunden davontragen. Es gibt jedoch eine andere Elektronenart, die positiven, die erst vor verhältnismäßig kurzer Zeit von den Physikern entdeckt wurden. Diese positiven Elektronen, oder auch Positionen, sehen genauso aus wie Du. Der einzige Unterschied besteht darin, dass ihre elektrische Ladung positiv statt negativ ist. Wenn Du einen solchen Burschen näherkommen siehst, glaubst Du zunächst, nur ein weiteres unschuldiges Mitglied Deines Geschlechts vor Dir zu haben. Du gehst auf ihn zu, um ihn zu begrüßen, doch plötzlich entdeckst Du, dass es Dich nicht wie ein anderes normales Elektron beiseite schiebt, um einen Zusammenstoß zu vermeiden, sondern Dich fest an sich zieht. Dann ist es zu spät, etwas dagegen zu unternehmen."

"Schrecklich!" seufzte Mr. Tompkins. "Und wie viele solcher armer, gewöhnlicher Elektronen kann ein Position vertilgen?"
"Zum Glück nur ein einziges, da sich das Position auch selbst zerstört, wenn es das Leben eines negativen Elektrons auslöscht. Man könnte sie als Mitglieder eines Selbstmörderklubs beschreiben, die sich stets auf der Suche nach Partnern zu wechselseitiger Vernichtung befinden. Gegenseitig fügen sie sich kein Leid zu, doch sobald ein negatives Elektron ihre Bahn kreuzt, hat es wenig Überlebenschancen."
"Da habe ich aber Glück gehabt, dass ich einem solchen Monster noch nicht begegnet bin", sagte Mr. Tompkins, den diese Ausführungen sehr bewegten. "Ich hoffe, es gibt nicht sehr viele von ihnen." "Es gibt nur wenige, und zwar aus einem sehr einfachen Grund-. Da sie nämlich das Unglück stets herausfordern, verschwinden sie bald nach ihrer Geburt wieder von der Bildfläche. Wenn Du eine Minute wartest, werde ich Dir wahrscheinlich eines zeigen können."
ja, dort!" fuhr Pater Paulini nach kurzer Pause fort. "Wenn Du jenen schweren Kern dort drüben genau ins Auge fasst, kannst Du die Geburt eines Positrons miterleben."
Das Atom, auf das der Mönch zeigte, war offensichtlich in eine starke elektromagnetische Störung geraten, die ihre Ursache in einer kräftigen, von außen auf das Atom einfallenden Strahlung hatte. Es handelte sich um eine weit heftigere Störung, als es jene gewesen war, die Mr. Tompkins aus seinem Chloratom verscheuchte. Die Elektronenfamilie des Atoms, die den Kern umgab, wurde auseinandergefegt und weggeblasen wie trockenes Laub von einem Hurrikan.
"Sieh genau auf den Kern hin", sagte Pater Paulini, und als Mr. Tompkins seine Aufmerksamkeit voll darauf konzentrierte, gewahrte er ein höchst merkwürdiges Phänomen, das sich tief im inneren des gestörten Atoms vollzog. Unmittelbar beim Kern, innerhalb der innersten Elektronenschale, gewannen zwei verschwommene Schatten langsam Gestalt. Eine Sekunde später sah Mr. Tompkins zwei glitzernde, nagelneue Elektronen mit großer Geschwindigkeit von ihrem Geburtsort wegsausen.
"Ich sehe ja zwei davon", sagte Mr. Tompkins, von diesem Anblick fasziniert.
~ "Richtig!" stimmte ihm Pater Paulini zu. "Elektronen werden immer paarweise geboren, andernfalls ergäbe sich ein Widerspruch mit dem Gesetz von der Erhaltung der elektrischen Ladung. Eines dieser beiden Teilchen, das hier unter der Einwirkung von starker Gamma-Strahlung auf den Kern entstand, ist ein gewöhnliches negatives Elektron, während es sich bei dem anderen um ein Position handelt-. den Mörder also. Es ist jetzt losgezogen, um sich Opfer zu suchen."
"Na schön, wenn die Geburt eines jeden Positrons, dessen Bestimmung es ist, ein Elektron zu zerstören, von der Geburt eines einfachen Elektrons begleitet ist, dann steht die Sache gar nicht so schlecht", bemerkte Mr. Tompkins nachdenklich. "Zumindest führt es nicht zur völligen Ausrottung des Elektronengeschlechts und ich ..."
"Vorsicht!" unterbrauch ihn der Mönch und schob ihn beiseite. Das neugeborene Position war soeben in einer Entfernung von nur wenigen Zentimetern an ihm vorbeigeschwirrt. "Du kannst nie achtsam genug sein, wenn diese mörderischen Teilchen in der Nähe sind. Doch genug geschwätzt! Ich habe noch andere Aufgaben zu erledigen. Vor allem muss ich mich jetzt um meinen Liebling kümmern, das Neutrino'." Und der Mönch verschwand, ohne Mr. Tompkins wissen zu lassen, was dieses , Neutrino' eigentlich sei und ob man es gleichfalls fürchten müsse. Solcherart allein gelassen, fühlte sich Mr. Tompkins noch einsamer als

zuvor. Und sooft der eine oder andere Elektronengefährte sich ihm auf seiner Reise durch den Raum näherte, gab er sich insgeheim sogar der verzweifelten Hoffnung hin, dass unter jedem unschuldigen, Äußeren das Herz eines Mörders verborgen sein könne. Lange Zeit, es schienen ihm Jahrhunderte zu sein, blieben seine Ängste und Hoffnungen unbegründet, und widerwillig beugte er sich den dumpfen Pflichten im Dasein eines Leitungselektrons.
Plötzlich geschah es dann - zu einem Zeitpunkt, als er es am wenigsten erwartet hatte. Es überkam ihn das heftige Verlangen, mit jemandem zu sprechen, wenn auch nur mit einem dummen Leitungselektron. Er näherte sich also einem Teilchen, das langsam herankam und in diesem Drahtstück offensichtlich neu war. Doch schon aus einiger Entfernung entdeckte er, dass er eine schlechte Wahl getroffen hatte. Eine unwiderstehliche Anziehungskraft zog ihn fort, die keinen Rückzug erlaubte. Eine Sekunde lang versuchte er, sich zu wehren und loszukommen, aber der Abstand zwischen ihnen wurde rasch kleiner. Mr. Tompkins schien es sogar, er könne ein teuflisches Grinsen im Gesicht seines Widersachers erkennen, dessen Beute er nun geworden war.

Eine unwiderstehliche A Anziehungskraft zog ihn fort.

"Lass mich los! Lass mich los!" schrie Mr. Tompkins aus voller Kehle und strampelte mit Armen und Beinen. "Ich will nicht vernichtet werden! Ich will elektrischen Strom leiten, und sei es für den Rest der Ewigkeit!" Doch es war alles vergeblich: der umliegende Raum wurde plötzlich von einem grellen Blitz erhellt.
"Schön, es ist ausgestanden", dachte Mr. Tompkins. "Aber wie kommt es dann, dass ich noch denken kann? Ist bloß mein Körper vernichtet worden und meine Seele in den Quantenhimmel gekommen?" Da fühlte er eine neue Kraft, diesmal jedoch sanfterer Natur, die ihn resolut schüttelte. Als er seine Augen auftat, erkannte er den Universitätspedell.
"Es tut mir leid, Sir", sagte dieser, "doch der Vortrag ist schon seit geraumer Zeit zu Ende. Wir müssen den Saal schließen." Mr. Tompkins unterdrückte ein Gähnen und blickte verstört um sich. "Gute Nacht, Sir", meinte der Pedell schließlich mit einem freundlichen Lächeln.

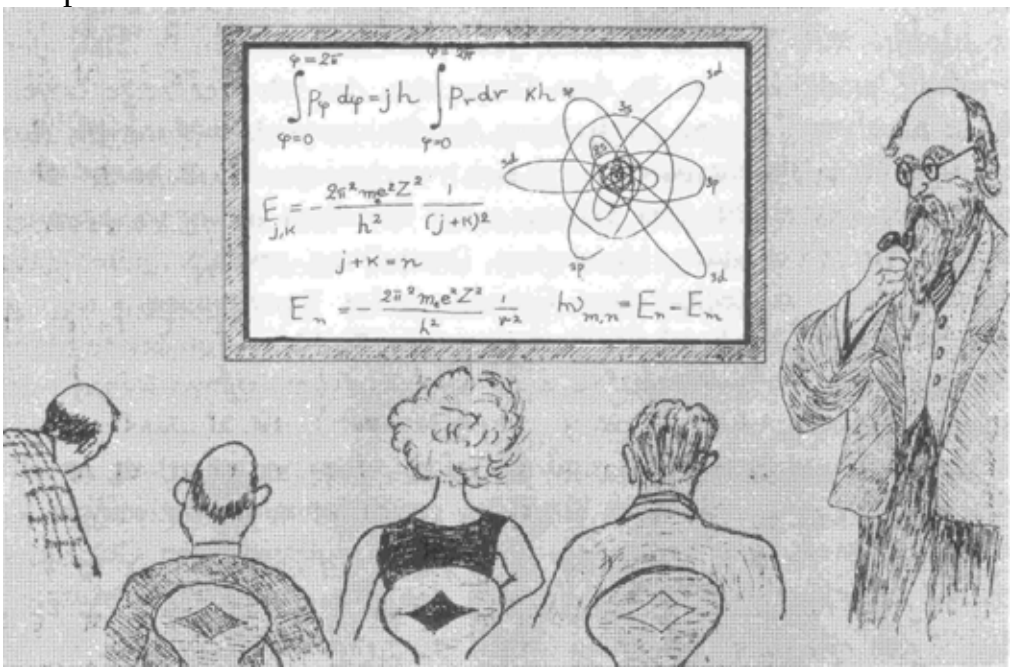
101/2 Ein Kapitel aus dem vorangegangenen Vortrag, das Mr. Tompkins verschlief

Im Jahre 1808 zeigte der englische Chemiker John Dalton, dass die relativen Massen verschiedener chemischer Elemente, die man zur Bildung komplizierterer chemischer Verbindungen benötigt, stets durch ein Verhältnis ganzer Zahlen ausgedrückt werden können. Er interpretierte dieses empirisch gefundene Gesetz so, dass alle chemischen

Verbindungen aus einer unterschiedlichen Anzahl von Teilchen aufgebaut sind, die den einfachen chemischen Elementen entsprechen. Der Misserfolg der mittelalterlichen Alchemisten bei ihrem Versuch, ein chemisches Element in ein anderes zu verwandeln, lieferte den scheinbaren Beweis für die Unteilbarkeit dieser Teilchen. Ohne lange zu zögern gab man ihnen den alten griechischen Namen "Atome". Einmal gegeben, blieb dieser Name erhalten; und obwohl wir heute wissen, dass diese "Daltonschen Atome" keineswegs unteilbar sind und in Wirklichkeit aus einer großen Anzahl noch kleinerer Teilchen bestehen, schließen wir vor dieser philologischen Inkonsequenz die Augen.
Diese Gebilde, die in der modernen Physik "Atome" genannt werden, sind also keineswegs jene elementaren und unteilbaren Bausteine der Materie, wie sie von Demokrit gedacht waren. Der Ausdruck "Atome" wäre tatsächlich korrekter, würde man ihn auf solche um vieles kleinere Teilchen wie Elektronen und Protonen anwenden, aus denen die "Daltonschen Atome" bestehen. Doch würde eine derartige Änderung der Bezeichnung zuviel Verwirrung stiften. Und übrigens-. Kein Physiker kümmert sich viel um philologische Schlüssigkeit! Deshalb belassen wir den alten Namen "Atome" im Daltonschen Sinn und bezeichnen Elektronen, Protonen usw. als "Elementarteilchen".
Dieser Name weist natürlich darauf hin, dass wir gegenwärtig die Auffassung vertreten, dass diese kleineren Teilchen tatsächlich elementar und unteilbar im Demokritischen Sinn des Wortes sind. Wobei Sie mich durchaus fragen dürfen, ob sich die Geschichte hier nicht wiederholt und sich im weiteren Verlauf naturwissenschaftlichen Fortschritts die Elementarteilchen der modernen Physik nicht als recht komplexe Gebilde erweisen werden. Meine Antwort hierauf ist folgende-. Obwohl es keine absolute Garantie dafür gibt,
dass dies nicht eintreten wird, sprechen sehr gute Gründe für die Annahme, dass wir diesmal völlig im Recht sind. Bekanntlich gibt es entsprechend den zweiundneunzig verschiedenen chemischen Elementen zweiundneunzig verschiedene Atomarten und jedes davon besitzt ziemlich komplizierte charakteristische Eigenschaften - eine Situation, die aus sich heraus eine gewisse Vereinfachung nahe legt, welche in einer Reduktion dieses komplizierten Bildes zu einem einfacheren bestehen müsste. Andererseits kennt die heutige Physik wenige Arten von Elementarteilchen-. Elektronen (positive und negative leichte Teilchen), Nukleonen (elektrisch geladene oder elektrisch neutrale schwere Teilchen, auch als Protonen und Neutronen bekannt) und möglicherweise die sogenannten Neutrinos, deren Natur bis heute noch nicht völlig geklärt ist.
Die Eigenschaften dieser Elementarteilchen sind äußerst einfach; eine weitere Reduktion könnte daher nur noch sehr geringe Vereinfachungen erbringen. Wenn man etwas Komplexeres aufbauen will, müssen sich überdies, wie Sie verstehen werden, stets mehrere elementare Begriffe im Spiel befinden; zwei oder drei elementare Begriffe sind hierbei gewiss nicht allzu viel. Sie können daher ruhig Ihren letzten Dollar darauf wetten, dass die Elementarteilchen der modernen Physik auch in Zukunft ihrem Namen gerecht werden.
Wir können nun zu der Frage zurückkehren, in welcher Weise die Daltonschen Atome aus Elementarteilchen aufgebaut sind. Die erste richtige Antwort erbrachte 1911 der berühmte britische Physiker Ernest Rutberford (später Lord Rutherford of Nelson). Er untersuchte die Struktur des Atoms, indem er verschiedene Atome mit winzigen schnellen Projektilen beschoss, den sogenannten Alphateilchen nämlich, die beim Zerfall radioaktiver Elemente entstehen. Aus der Beobachtung der Ablenkung (Streuung) dieser Projektile nach ihrem Durchgang durch ein Stück Materie zog Rutherford den Schluss, dass alle Atome einen sehr

dichten, positiv geladenen Kern besitzen (den Atomkern), der von einer ziemlich dünnen Wolke negativer elektrischer Ladung (der Elektronenhülle) umgeben ist. Heute wissen wir, dass der Atomkern aus einer bestimmten Anzahl von Protonen und Neutronen besteht - man kennt sie auch unter dem gemeinsamen Namen Nukleonen -, die durch starke Kohäsionskräfte zusammengehalten werden. Wir wissen weiteres, dass die Atomhülle aus einer jeweils verschieden großen Anzahl negativer Elektronen besteht, die unter dem Einfluss der elektrischen Anziehungskraft des positiv geladenen Kerns umherschwirren. Die Anzahl der Elektronen, die die Atomhülle bilden, bestimmt alle physikalischen und chemischen Eigenschaften des gegebenen Atoms und erstreckt sich entsprechend der natürlichen Reihenfolge der chemischen Elemente von eins (bei Wasserstoff) bis zweiundneunzig (beim schwersten unter den bekannten Elementen, dem Uran).
Trotz derbaugenscheinlichen Einfachheit des Ruthehrfordschen Atommodells erwies sich dieses bei genauerer Untersuchung als alles andere denn einfach. Nach Überzeugung der klassischen Physik ist nämlich mit einer Rotation der negativ geladenen Elektronen um den Atomkern ein Verlust an Bewegungsenergie infolge eines Abstrahlungsprozesses (Lichtemission) verbunden; man hat errechnet, dass infolge dieses steten Energieverlustes alle Elektronen der Atomhülle innerhalb eines Sekundenbruchteils in den Kern stürzen müssten. Diese scheinbar einwandfreie Folgerung der klassischen Theorie steht jedoch in scharfem Widerspruch zur empirischen Tatsache, dass die Atomhülle ganz im Gegenteil recht stabil ist und dass die Elektronen des Atoms, statt in den Kern zu stürzen, ihre Bewegung rund um das Zentrum unendlich lange aufrechterhalten. Wir sehen so, welch ein tiefgründiger Konflikt sich zwischen den Grundgedanken der klassischen Mechanik und den empirischen Daten auftut, die das mechanische Verhalten eines winzigen Bestandteils der atomaren Welt beschreiben. Dieser Sachverhalt brachte den berühmten dänischen Physiker Niels Bohr zu der Einsicht, dass die klassische Mechanik, die jahrhundertslang eine privilegierte und gesicherte Position im System der Naturwissenschaften innehatte, von nun an als eine Theorie betrachtet werden müsse, deren Anwendungsbereich sich auf die mikroskopische Weit unserer alltäglichen Erfahrung beschränkt und dass sie gänzlich scheitert, wenn man sie auf die viel heikleren Vorgänge im Inneren des Atoms anwendet. Bohr machte den Vorschlag, als Basis für eine neue allgemeine Mechanik, die auch auf die kleinsten sich bewegenden Teile des atomaren Mechanismus anwendbar wäre, anzunehmen, dass von der unendlichen Vielfalt der in der klassischen Theorie möglichen Bewegungsarten nur wenige eigens ausgewählte Typen in der Natur tatsächlich zu Finden seien. Diese erlaubten Bewegungstypen oder Bahnen sind so zu wählen, dass sie bestimmten mathematischen Bedingungen genügen, die man als Quantenbedingungen der Bohrsuchen Theorie kennt. Ich will hier diese Quantenbedingungen nicht im Detail behandeln, sondern nur erwähnen, dass sie so ausgewählt wurden, dass allen durch sie auferlegten Einschränkungen keinerlei praktische Bedeutung zukommt, wenn die Masse der bewegten Teilchen um vieles größer ist als jene, die wir im Inneren des Atoms vorfinden. Wird daher die neue Mikromechanik auf mikroskopische Körper angewendet, erbringt sie genau dieselben Resultate, wie die alte klassische Theorie (Korrespondenzprinzip); der Widerspruch zwischen den beiden Theorien gewinnt erst im Falle der winzigen atomaren Mechanismen wesentlich an Bedeutung. Ohne auf Einzelheiten einzugehen, möchte ich Ihre Neugier bezüglich der Atomstrukturen vom Standpunkt der Bohrsuchen Theorie aus befriedigen und Ihnen ein Schema der Bohrsuchen Quantenorbitale des Atoms zeigen.

(Erstes Bild bitte!) Sie sehen hier - natürlich in einem außerordentlich vergrößerndem Maßstab - das System der kreisförmigen und elliptischen Orbitale. Sie stellen die einzigen Bewegungsmöglichkeiten dar, welche den Elektronen, die nach den Bohrsuchen Quantenbedingungen die Atomhülle aufbauen, "erlaubt" sind. Während die klassische Mechanik zuließe, dass sich das Elektron in jeder beliebigen Entfernung vom Kern bewegt, und keine Einschränkung hinsichtlich der Exzentrizität der Orbitale macht, bilden die ausgewählten Orbitale der Bohrsuchen Theorie eine diskrete Folge, deren charakteristische Größen genau definiert sind. Die Zahlen und Buchstaben, die bei jedem Orbital stehen, geben den Namen des jeweiligen Orbitales innerhalb der üblichen Klassifikation an; Sie können z. B. feststellen, dass großen Zahlen Orbitalen mit großen Durchmessern entsprechen.



Das System der kreisförmigen und elliptischen Orbitale der Elektronen in einem Wasserstoffatom nach Bor und Sommerfeld

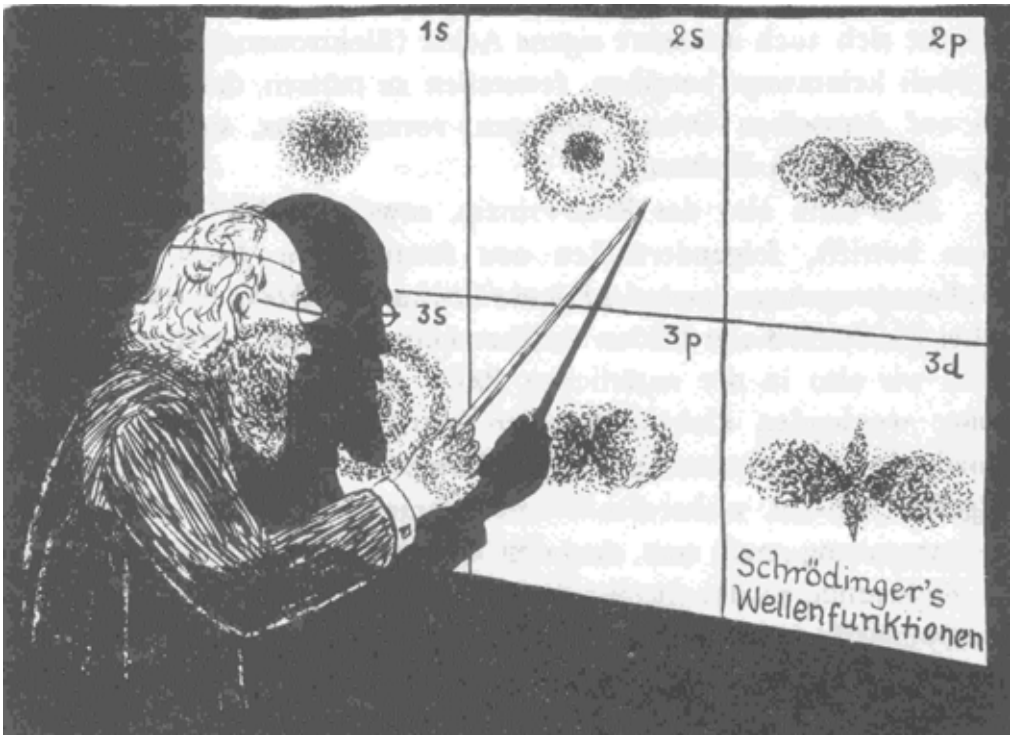
Obwohl sich die Borsche Theorie der Atomstruktur bei der Erklärung der verschiedenen Eigenschaften von Atomen und Molekülen als äußerst fruchtbar erwies, blieb der fundamentale Begriff der diskreten Quantenorbitale eher unklar; ja mehr noch: je tiefer wir uns in die Untersuchung dieser ungewöhnlichen Einschränkungen der klassischen Theorie einzudringen bemühten, desto verschwommener gestaltete sich das Gesamtbild.

Schließlich wurde deutlich, dass der Fehler der Bohrsuchen Theorie darin bestand, dass sie, statt eine fundamentale Änderung der klassischen Mechanik herbeizuführen, die Resultate dieses Systems durch zusätzliche Bedingungen, die der Gesamtstruktur der klassischen Theorie im Prinzip fremd waren, einfach einschränkte. Die richtige Lösung des ganzen Problems gelang kaum dreizehn Jahre später, und zwar durch die sogenannte "Wellenmechanik", die die gesamte Basis der klassischen Mechanik dem neuen Quantenprinzip gemäß modifizierte. Obwohl die Wellenmechanik auf den ersten Blick noch unsinniger erscheinen mochte als die alte Borsche Theorie, ist diese neue Mikromechanik heute eines der in sich geschlossensten Gebiete der modernen theoretischen Physik. Da ich die fundamentalen Prinzipien der neuen Mechanik, im besonderen die Begriffe "Unschärfe und sich verschmierende Bahnen", in einem meiner früheren Vorträg!! bereits erörtert habe, bitte ich Sie, sich in dieser Frage auf Ihr Gedächtnis beziehungsweise ihre Mitschrift zu

stützen. jetzt möchte ich zum Problem der Atomstruktur zurückkehren. In dem Diagramm, das ich hier zeige (zweites Bild bitte!), sehen Sie eine Darstellung der Elektronenbewegung im Atom, wie sie sich vom Gesichtspunkt "der sich verschmierenden Bahnen" der Wellenmechanik her ergibt. Das Schema zeigt dieselben Bewegungstypen, die wir in der vorhergehenden klassischen Darstellung gesehen haben (abgesehen davon, dass aus technischen Gründen jeder Bewegungstyp nun getrennt dargestellt ist), doch erhalten wir jetzt im Einklang mit der fundamentalen Aussage der Unschärferelation statt der scharf umrissenen Bahnen der Bohrsuchen Theorie verschwommene Muster. Die Bezeichnungen der verschiedenen Bewegungszustände sind dieselben wie beim vorhergehenden Bild. Sie werden, wenn Sie Ihre Phantasie etwas bemühen, bei einem Vergleich beider Darstellungen bemerken, dass unsere wolkenartigen Gebilde ziemlich getreu die charakteristischen Formen der alten Bohrsuchen Orbitale wiedergeben.

Diese Bilder zeigen Ihnen recht deutlich, was mit den guten, altmodischen Bahnen der klassischen Mechanik geschieht, wenn das Quant im Spiel ist. Obwohl es ein Laie eher für einen phantastischen Traum halten mag, können die Wissenschaftler, die sich mit dem atomaren Mikrokosmos beschäftigen, dieses Modell problemlos akzeptiere

Nach diesem kurzen Überblick über die Bewegungen eines Elektrons in einem Atom kommen wir nun zu dem wichtigen Problem der Verteilung der atomaren Elektronen auf die verschiedenen möglichen Bewegungszustände. Hier stoßen wir wieder auf ein neues Prinzip, eines, das im Makrokosmos völlig unbekannt ist. Es wurde zuerst von meinem jungen Freund Wolfgang Pauli formuliert und besagt, dass im Elektronenverband eines gegebenen Atoms keine zwei Teilchen gleichzeitig denselben Bewegungszustand haben dürfen. Diese Einschränkung wäre nicht sehr bedeutsam, wenn es, wie in der klassischen Mechanik, unendlich viele Bewegungsmöglichkeiten gäbe. Doch da die Zahl der "erlaubten" Bewegungszustände durch die Quantengesetze drastisch reduziert wurde, spielt das Pauli-Prinzip in der atomaren Welt eine sehr wichtige Rolle: es gewährleistet eine mehr oder weniger gleichförmige Verteilung der Elektronen rund um den Kern und verhindert, dass sie sich an einer einzelnen Stelle häufen.



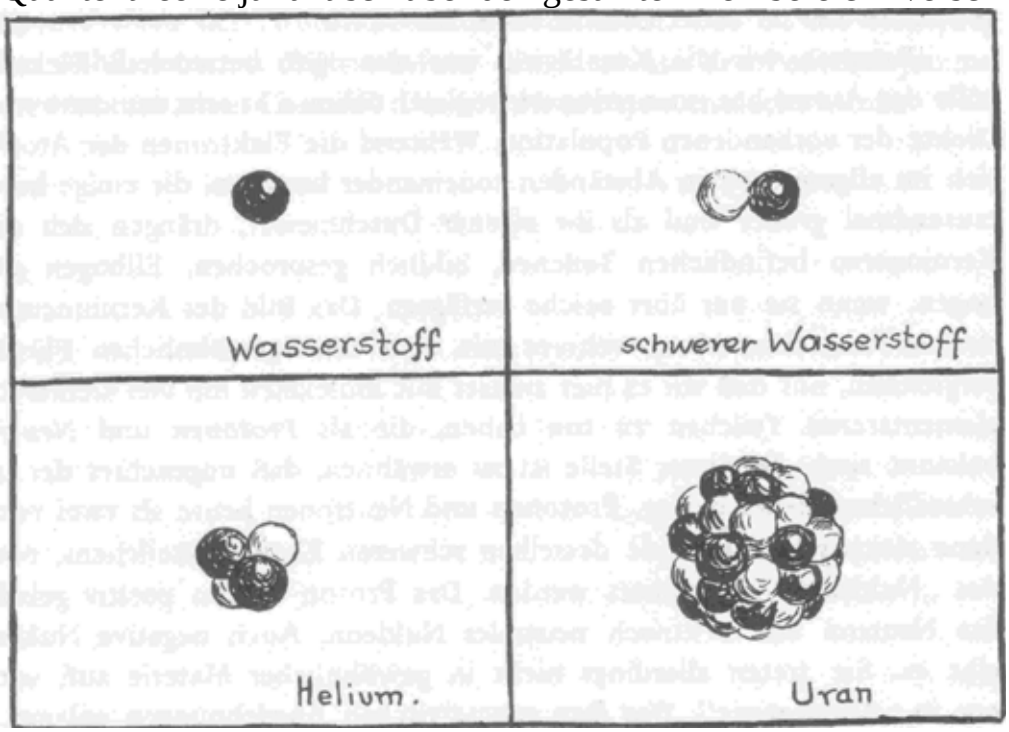
Die Wellenmechanik verschmiert die Bahnen der Elektronen.

Sie dürfen aber aus der obigen Formulierung dieses neuen Prinzips nicht schließen, dass jeder der auf meiner Zeichnung dargestellten diffusen Quantenzustände der Bewegung nur von einem Elektron "besetzt" sein darf. Tatsächlich bewegt sich jedes Elektron nicht nur sein Orbital entlang, sondern es dreht sich auch um seine eigene Achse (Elektronenspion). Es würde Herrn Dr. Pauli keineswegs betrüben, feststellen zu müssen, dass sich zwei Elektronen auf demselben Orbital bewegen, vorausgesetzt, sie drehen sich nach entgegengesetzten Richtungen.
Man kann also das Pauli-Prinzip, soweit es die Quantenzustände im Atom betrifft, folgendermaßen neu formulieren: jeder Quantenzustand der Bewegung kann von nickt mehr als zwei Elektronen "besetzt" werden, wobei die Spins dieser beiden Teilchen entgegengesetzt gerichtet sein müssen. Wenn wir also in der natürlichen Reihe der Elemente Atome mit immer größer werdenden Elektronenzahlen betrachten, finden wir, dass die verschiedenen Quantenzustände der Bewegung allmählich mit Elektronen aufgefüllt werden, wobei der Atomdurchmesser ständig zunimmt. In diesem Zusammenhang muss man, was den Gesichtspunkt der Stärke der Bindung der Elektronen an das Atom anlangt, auch erwähnen, dass die verschiedenen Quantenzustände in verschiedene Gruppen (oder Schalen) mit annähernd gleicher Bindung zusammengefasst werden können. Wenn wir zu schwereren Atomen übergehen, wird eine Schale nach der anderen aufgefüllt, wobei sich als Folge dieses schrittweise Besetzens der Elektronenschalen auch die Eigenschaften der Atome periodisch verändern. Das ist die Erklärung für die wohlbekannten Eigenschaften der Elemente des Periodensystems, das von dem russischen Chemiker Dimitrij Mendelejew entdeckt wurde.

12 Im Inneren des Kerns

Der nächste Vortrag, dem Mr. Tompkins beiwohnte, war dem Innern des Kerns gewidmet, dem eigentlichen Zentrum für die Drehbewegung der Elektronen um das Atom.
Meine Damen und Herrn! begann der Professor:
Wir sind allmählich immer tiefer in die Struktur der Materie eingedrungen. Nun wollen wir in unserer Phantasie das Innere des Atomkerns betreten, diese geheimnisvolle Region, die nur ein Tausendmillionstel des Gesamtvolumens des Atoms einnimmt. Doch trotz der beinah unvorstellbar kleinen Dimensionen unseres neuen Forschungsgebietes werden wir es voll von lebhaftester Aktivität vorfinden. Der Kern ist letztlich das eigentliche Herz des Atoms und enthält ungeachtet seiner verhältnismäßig geringen Größe etwa 99,97 % der Gesamtmasse des Atoms.
Betreten wir die Kernregion von der dünn besiedelten Elektronenhülle des Atoms her, so werden wir sogleich überrascht sein von der extremen Dichte der vorhandenen Population. Während die Elektronen der Atomhülle sich im allgemeinen in Abständen voneinander bewegen, die einige hunderttausendmal größer sind als ihr eigener Durchmesser, drängen sich die im Kerninneren befindlichen Teilchen, bildlich gesprochen, Ellbogen an Ellbogen, wenn sie nur über solche verfügten. Das Bild des Kerninneren lässt sich so betrachtet ohne weiteres mit dem einer gewöhnlichen Flüssigkeit vergleichen, nur dass wir es hier anstatt mit Molekülen mit viel kleineren und elementareren Teilchen zu tun haben, die als Protonen und

Neutronen bekannt sind. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass ungeachtet der unterschiedlichen Bezeichnung, Protonen und Neutronen heute als zwei verschiedene elektrische Zustände desselben schweren Elementarteilchens, nämlich des "Nukleons", betrachtet werden. Das Proton ist ein positiv geladenes, das Neutron ein elektrisch neutrales Nukleon. Auch negative Nukleonen gibt es. Sie treten allerdings nicht in gewöhnlicher Materie auf, sondern nur in "Antimaterie". Was ihre geometrischen Ausdehnungen anlangt, sind Nukleonen mit ihrem Durchmesser von ungefähr 0,000 000 000 000 001 m nicht sehr von den Elektronen verschieden. Doch sind sie viel schwerer:
man kann ein Proton oder Neutron mit 1840 Elektronen aufwägen. Die Kernbausteine sind, wie ich schon gesagt habe, sehr dicht gepackt. Dies ist auf die Wirkung besonderer nuklearer Bindungskräfte zurückzuführen, die mit den zwischen den Molekülen einer Flüssigkeit wirkenden Anziehungskräften vergleichbar sind. Wie in Flüssigkeiten verhindern diese Kräfte zwar eine völlige Trennung der Teilchen, nicht aber deren relative Verschiebung zueinander, Nukleare Materie besitzt daher bis zu einem gewissen Grad die Eigenschaften einer Flüssigkeit; wenn sie nicht durch äußere Kräfte gestört ist, nimmt sie die Gestalt eines kugelförmigen Tropfens an, genau wie ein gewöhnlicher Wassertropfen. In der schematischen Darstellung, die ich Ihnen nun aufzeichne, sehen Sie, wie sich verschiedene Kerne aus Protonen und Neutronen aufbauen. Der einfachste Kern ist der des Wasserstoffs: er besteht aus einem einzigen Proton. Der komplizierteste Kern hingegen ist der Urankern: er setzt sich aus 92 Protonen und 142 Neutronen zusammen. Diese Bilder dürfen Sie natürlich nur als eine sehr schematisierte Darstellung der wirklichen Gegebenheiten verstehen, da die Lage eines jeden Nukleons zufolge der nicht zu vernachlässigenden Unschärferelation der Quantentheorie ja faktisch über den gesamten Kernbereich "verschmiert" ist.



Atomkerne besteben aus Protonen und Neutronen.

Wie ich bereits ausgeführt habe, werden die Teilchen des Atomkerns durch starke Bindungskräfte zusammengehalten. Neben diesen Anziehungskräften gibt es jedoch auch

Kräfte, deren Wirkung genau entgegengesetzt ist. Die Protonen, die ungefähr die Hälfte der gesamten nuklearen Population ausmachen, tragen positive elektrische Ladung und stoßen einander daher infolge der elektrostatischen Coulombkräfte ab. Bei leichten Kernen, bei denen die elektrische Ladung verhältnismäßig klein ist, können die Coulombschen Abstoßungskräfte vernachlässigt werden; bei schwereren Kernen mit hoher Ladung treten sie hingegen in einen ernsthaften Wettstreit mit den anziehenden Bindungskräften. Unter solchen Umständen ist der Kern nicht mehr stabil, sondern bereit, einige seiner Bausteine abzustoßen. Dies trifft auf eine Anzahl von Elementen zu, die am äußersten Ende des Periodensystems stehen und als "radioaktive Elemente" bekannt sind.
Aus den obigen Überlegungen könnten Sie schließen, dass diese schweren, instabilen Kerne eigentlich Protonen emittieren müssten, da Neutronen keine elektrische Ladung tragen und deshalb nicht den " abstoßenden Coulombkräften unterliegen. Experimente zeigen jedoch, dass die Teilchen, die
tatsächlich emittiert werden, sogenannte Alphateilchen (Heliumkerne) sind; das sind komplexe Teilchen, von denen jedes aus zwei Protonen und zwei Neutronen besteht. Die Erklärung hierfür liegt in der besonderen Gruppierung der Kernbausteine. Es zeigt sich, dass die Kombination von zwei Protonen und zwei Neutronen, die zusammen ein Alphateilchen bilden, besonders stabil ist. Daher ist es viel leichter, die ganze Gruppe auf einmal abzustoßen, als sie in einzelne Protonen und Neutronen aufzuspalten.
Bekanntlich wurde das Phänomen des radioaktiven Zerfalls von dem französischen Physiker Henri Becquerel entdeckt. Die Deutung der Radioaktivität als Resultat eines spontanen Zerfalls des Atomkerns stammt vom berühmten britischen Physiker Lord Rutherford, dessen Namen ich in einem anderen Zusammenhang bereits erwähnt habe und dem die Naturwissenschaft für seine bedeutenden Entdeckungen auf dem Gebiet der Kernphysik großen Dank schuldet.
Eine der merkwürdigsten Eigenschaften des Alphazerfalls sind die manchmal extrem langen Zeitspannen, die Alphateilchen benötigen, um sich vom Kern zu lösen. Bei Uran und Thorium wird dieser Zeitraum in Jahrmilliarden gemessen; bei Radium liegt er bei ungefähr eintausendsechshundert Jahren. Obwohl es auch einige Elemente gibt, die innerhalb eines Bruchteils von einer Sekunde zerfallen, kann auch deren Lebensdauer als lang gelten, sofern man sie mit der ungeheuren Geschwindigkeit der infranuklearen Bewegung vergleicht.
Was zwingt nun ein Alphateilchen, manchmal viele Jahrmilliarden im Kern zu verbleiben? Und wenn es schon so lange geblieben ist-. warum bricht es dann schließlich doch aus?
Um diese Fragen beantworten zu können, müssen wir uns zunächst etwas eingehender mit der relativen Stärke der anziehenden Bindungskräfte und der elektrostatischen Abstoßungskräfte befassen, die das Teilchen bei seinem Austritt aus dem Kern beeinflussen. Rutherford führte diesbezüglich sehr sorgfältige Untersuchungen durch. Dabei benutzte er die Methode des sogenannten "atomaren Beschusses". Bei diesen berühmten Experimenten im Laboratorium von Cavendish verwendete Rutherford einen Strahl schneller Alphateilchen, die von einer radioaktiven Substanz emittiert wurden, und beobachtete die Ablenkungen (Streuung) dieser atomaren Projektile nach ihren Kollisionen mit den Kernen der bombardierten Substanz. Diese Experimente bestätigten den folgenden Sachverhalt-. Während bei großen Entfernungen vom Kern die Projektile durch die elektrischen Kräfte der Kernladung zurückgeworfen wurden, wird diese Abstoßung zu einer starken Anziehung, wenn es das Projektil schafft, sehr nahe an die äußeren Grenzen des Kernbereichs

vorzustoßen. Man kann behaupten, dass der Kern in gewisser Weise einer Burg gleicht, die auf allen Seiten von einem hohen, steilen Wall umgeben ist, der die Teilchen sowohl am Eindringen als auch an der Flucht hindert. Doch das erstaunlichste Resultat der Ruthehrfordschen Experimente besteht darin, dass sowohl die Alphateilchen, die im Verlaufe des radioaktiven Prozesses den Kern verlassen, wie auch die Projektile, die von außen in den Kern eindringen, weniger Energie besitzen, als der Spitze des Walls (den wir Übehrlicherweise als Potentialwall bezeichnen) entsprechen würde. Dieses Ergebnis stand in scharfem Widerspruch zu allen fundamentalen Grundsätzen der klassischen Mechanik. Warum auch sollte man erwarten, dass ein Ball über einen Hügel rollt, wenn man ihn mit weit weniger Energie in Bewegung gesetzt hat, als für das Erreichen der Spitze des Hügels erforderlich ist? Die klassische Physik konnte da nur staunen und annehmen, dass in den Ruthehrfordschen Experimenten irgendwo ein Fehler liegen müsse.

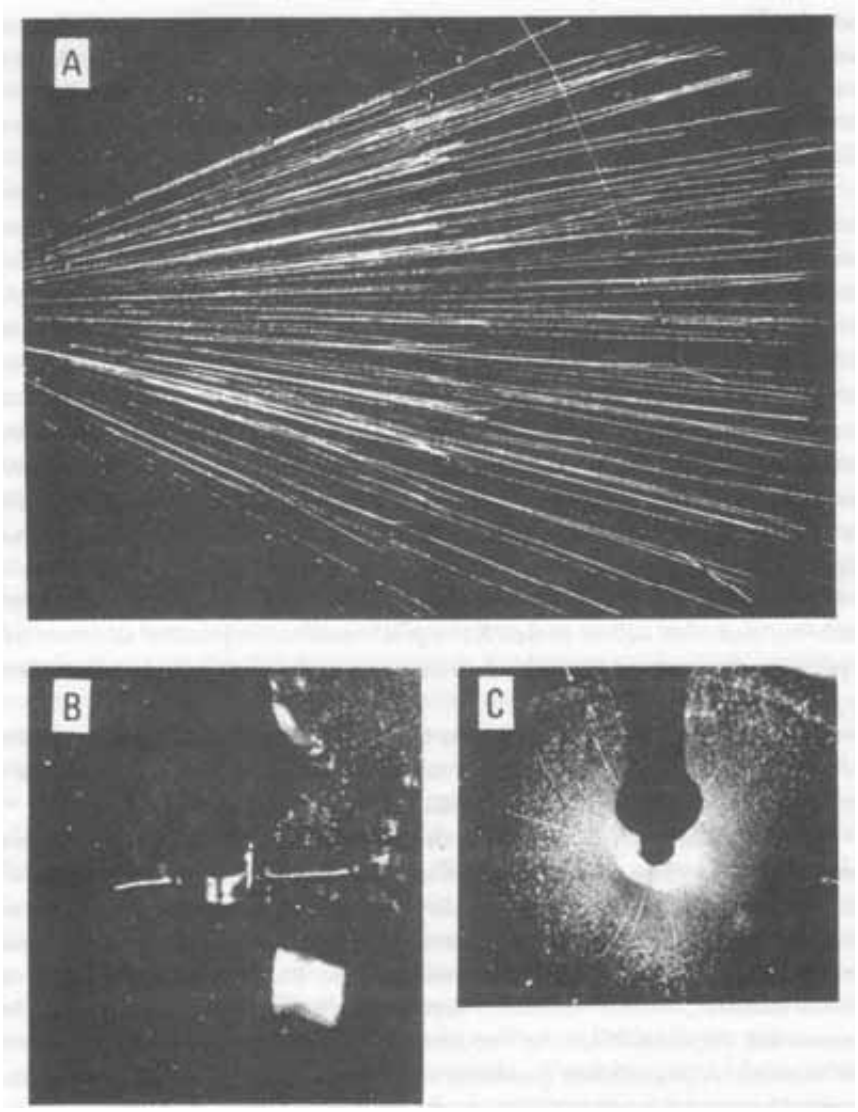
Es war jedoch kein Fehler unterlaufen. Wenn hier jemand im Irrtum war, dann war es nicht Lord Rutherford, sondern die klassische Mechanik selbst. Eine Klärung der Problematik wurde gleichzeitig von meinem lieben Freund Dr. George Gamov und den Herrn Doktoren Ronald Gurney und E.U. Condon herbeigeführt. Sie zeigten, dass jegliche Schwierigkeit beseitigt ist, wenn man das Problem vom Standpunkt der modernen Quantentheorie her betrachtet. Heute wissen wir nämlich, dass die Quantenphysik die wohldefinierten linienförmigen Bahnen der klassischen Theorie nicht gelten lässt und sie durch verschwommene, geisterhafte Streifen ersetzt. Und wie ein Geist der guten alten Zeit ohne Schwierigkeit durch die dicken Mauern eines alten Schlosses gehen konnte, so vermögen diese mysteriösen Bahnen Potentialwälle zu durchdringen, die vom klassischen Standpunkt aus gesehen völlig undurchdringlich scheinen.

Und glauben Sie bitte nicht, dass ich scherze-. Die Durchdringbarkeit von Potentialwällen für Teilchen unzureichender Energie ergibt sich als eine direkte mathematische Folgerung aus den fundamentalen Gleichungen der neuen Quantenmechanik und stellt einen der wichtigsten Unterschiede zwischen den neuen und alten Auffassungen von Bewegung dar. Doch obwohl die neue Mechanik so ungewöhnliche Effekte erlaubt, geschieht dies nur mit strengen Einschränkungen. In den meisten Fällen ist die Chance, den Wall zu durchqueren, außerordentlich gering. Daher muss sich das eingeschlossene Teilchen unglaublich oft gegen die Mauer werfen, bevor sein Versuch gelingt. Die Quantentheorie liefert uns exakte Vorschriften für die Berechnung der Wahrscheinlichkeit eines solchen Ausbruchs, wobei man zeigen konnte, dass sich die beobachteten Halbwertszeiten des Alphazerfalls in völliger Übereinstimmung mit den theoretisch berechneten Werten befinden. Auch bei den von außen in den Kern geschossenen Projektilen stimmen die Ergebnisse der quantenmechanischen Berechnungen sehr weitgehend mit dem Experiment überein.

Bevor ich hier fortfahre, möchte ich Ihnen einige Photographien zeigen, die den Zerfallsprozess verschiedener Kerne darstellen, welche von sehr energiereichen atomaren Projektilen getroffen wurden. (Bild bitte!)

Auf dem Bild sehen Sie zwei in der Nebelkammer gemachte Aufnahmen von Zerfallsprozessen, die ich in meinem letzten Vortrag beschrieben habe. Bild A zeigt einen Stickstoffkern, der von einem schnellen Alphateilchen getroffen wurde. Es handelt sich hierbei um die erste künstliche Elementesumwandlung, die je durchgeführt wurde. Die Photographie stammt von Patrick Blankett, einem Schüler Lord Rutherfords. Sie sehen zahlreiche Spuren von Alphastrahlen, die von einer kräftigen Alphaquelle herstammen. Die

meisten Alphateilchen passieren das Blickfeld der Kamera, ohne eine einzige ernstzunehmende Kollision zu erleiden. Einem von ihnen gelang es jedoch, einen Stickstoffkern zu treffen. Genau dort hört die Spur des Alphateilchens auf. Vom Kollisionspunkt sehen Sie zwei andere Spuren ihren Ausgang nehmen. Die lange, dünne Spur ist die eines Protons, das aus dem Stickstoffkern herausgeschlagen wurde, während die kurze, breite Spur den Rückstoß des Kerns zeigt. Hierbei handelt es sich jedoch nicht mehr um einen Stickstoffkern, weil dieser infolge des Verlustes von einem



Proton und der Aufnahme des eingedrungenen Alphateilchens in einen Sauerstoffkern verwandelt wurde. Demnach haben wir hier eine alchemistische Umwandlung von Stickstoff in Sauerstoff mit dem Nebenprodukt Wasserstoff vor uns.

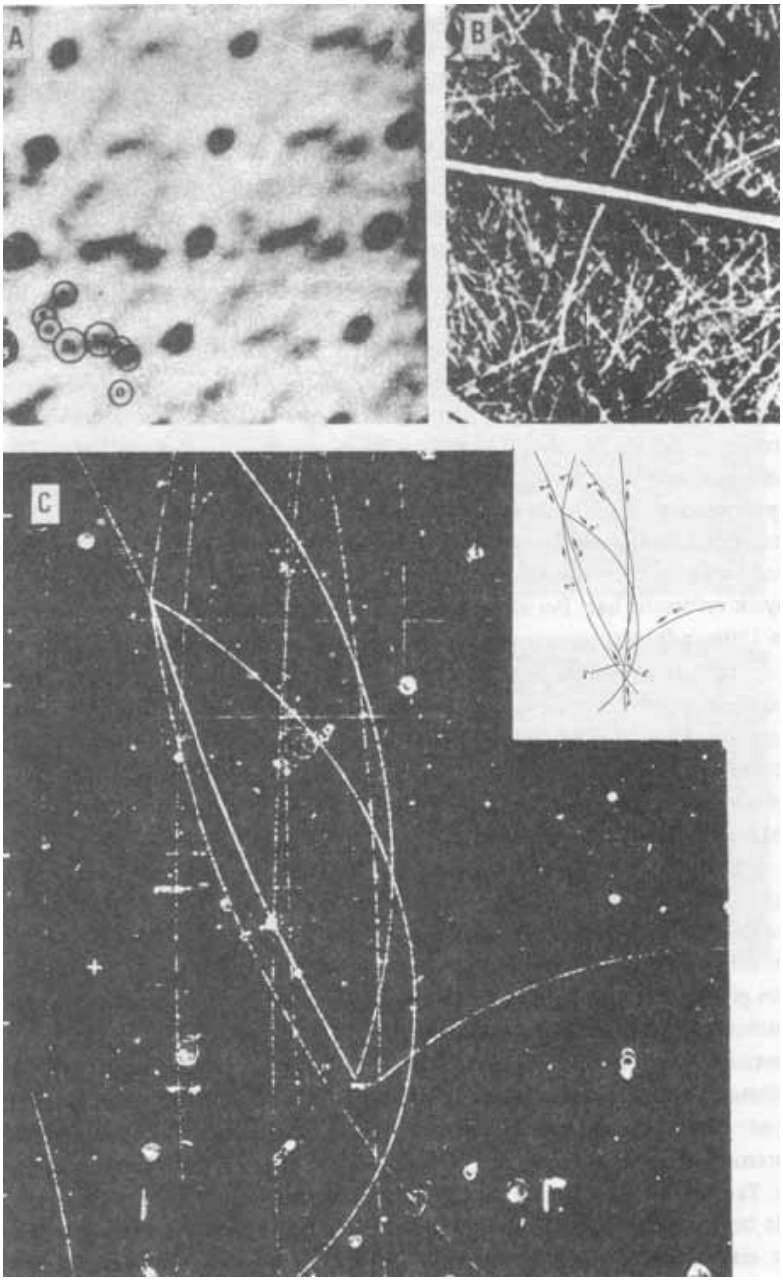
Das Bild B zeigt die Spaltung eines Kerns durch den Zusammenprall mit einem künstlich beschleunigten Proton. Ein schneller Protonenstrahl, der in einer speziellen Hochspannungsmaschine, dem sogenannten Zyklotron, erzeugt wurde, betritt die Kammer durch ein langes Rohr, dessen Ende man auf der Photographie erkennen kann. Das "target" - in unserem Fall eine dünne Schicht aus Bor - ist an der unteren Öffnung des Rohrs befestigt, so dass die bei der Kollision entstehenden nuklearen Bruchstücke die Luft in der Kammer durchqueren müssen, wobei sie wolkenartige Spuren hinterlassen. Wie Sie auf dem Bild erkennen können, zerfällt der von einem Proton getroffene Brokern in drei Teile. Berechnet

man die Summe der elektrischen Ladungen vor und nach dem Stoß, zeigt es sich, dass diese Bruchstücke Alphateilchen, also Heliumkerne, sein müssen. Die beiden auf den Photos gezeigten Kernumwandlungen stellen zwei recht typische Beispiele für einige hundert andere Kernumwandlungen dar, die man heute in der Experimentalphysik erforscht hat. Bei allen derartigen als "Austauschreaktionen" bekannten Umwandlungsprozessen dringt das einfallende Teilchen (Proton, Neutron oder Alphateilchen) in den Kern ein, schlägt dabei andere Teilchen heraus und nimmt deren Platz ein. Hierbei wird ein Proton durch ein Alphateilchen ausgetauscht, ein Alphateilchen durch ein Proton, ein Proton durch ein Neutron usw. Bei allen derartigen Umwandlungsprozessen steht das bei der Reaktion neu entstandene Element im Periodensystem in enger Nachbarschaft zum bombardierten Element.

Erst vor verhältnismäßig kurzer Zeit, unmittelbar vor dem zweiten Weltkrieg nämlich, entdeckten die beiden deutschen Chemiker 0. Haben und F. Strassmann einen völlig neuen Typ der Kernumwandlung, bei dem ein schwerer Kern unter Freisetzung einer ungeheuren Energiemenge in zwei gleiche Teile zerfällt. Mein nächstes Dia zeigt rechts oben, wie die beiden Bruchstücke eines Urankerns von einem dünnen Urandraht aus nach entgegengesetzten Richtungen auseinander fliegen. Dieses als "Kernspaltung" bekannte Phänomen wurde entdeckt, als man Uran mit einem Neutronenstrahl beschoss. Doch bald stellte sich heraus, dass auch andere am Ende des Periodensystems befindliche Elemente ähnliche Eigenschaften besitzen. Es sieht in der Tat so aus, als ob sich diese schweren Kerne an der Grenze ihrer Stabilität befänden und als ob schon die geringste Störung infolge einer Kollision mit einem Neutron genügte, sie in zwei Teile auseinanderfallen zu lassen einem zu groß geratenen Quecksilbertropfen vergleichbar. Das Faktum der Instabilität schwerer Kerne hilft uns auch die Frage klären, warum es in der Natur nur 92 Elemente gibt. Ein Kern, der schwerer als Uran ist, könnte nur sehr kurze Zeit existieren und würde bald in um vieles kleinere Teile zerfallen. Das Phänomen der Kernspaltung ist auch vom praktischen Standpunkt her interessant, da es bestimmte Möglichkeiten zur Nutzung von Nuklearenergie eröffnet. Wichtig dabei ist, dass schwere Kerne bei ihrer Spaltung eine gewisse Anzahl von Neutronen emittieren, die die Spaltung benachbarter Kerne herbeiführen können. Dies kann zu einer explosionsartigen Reaktion führen, bei der alle Energie, die im Inneren der Kerne gespeichert ist, innerhalb eines Sekundenbruchteils freigesetzt wird. Wenn Sie nun daran denken, dass die in einem einzigen Pfund Uran enthaltene Kernenergie dem Energiegehalt von zehn Tonnen Kohle entspricht, dann werden Sie verstehen, dass die Möglichkeit der Freisetzung dieser Energie sehr wesentliche Veränderungen unserer Wirtschaft in sich birgt.

Alle diese Kernreaktionen lassen sich jedoch nur in sehr geringem Umfang erzielen. Obwohl sie uns eine Menge an Information über die innere Struktur des Kerns liefern, schien bis vor verhältnismäßig kurzer Zeit dennoch keinerlei Hoffnung auf Freisetzung einer größeren Menge Kernenergie zu bestehen. Erst 1939 war es soweit, als die deutschen Chemiker 0. Hahn und P. Strassmann einen völlig neuen Typ der Kernumwandlung entdeckten. In diesem Falle bricht ein schwerer Urankern, von einem einzigen Neutron getroffen, in zwei ungefähr gleich große Teile, wobei nicht nur gewaltige Energiemengen, sondern auch zwei oder drei Neutronen freigesetzt werden, die ihrerseits weitere Urankerne treffen und spalten können, wodurch neuerlich Energie und Neutronen freiwerden. Dieser um sich greifende Spaltungsprozess kann zu einer fürchterlichen Explosion führen oder auch, sofern er kontrolliert abläuft, beinahe unerschöpfliche Energiemengen liefern. Wir dürfen uns sehr

glücklich schätzen, dass Dr. Tallerkin, der an der Atombombe
mitgearbeitet hat und als "Vater der Wasserstoffbombe" gilt, sich bereit fand, trotz seiner vielen Verpflichtungen zu uns zu kommen und ein paar Worte zum Thema Atombombe zu sagen. Er müsste jede Minute da sein.



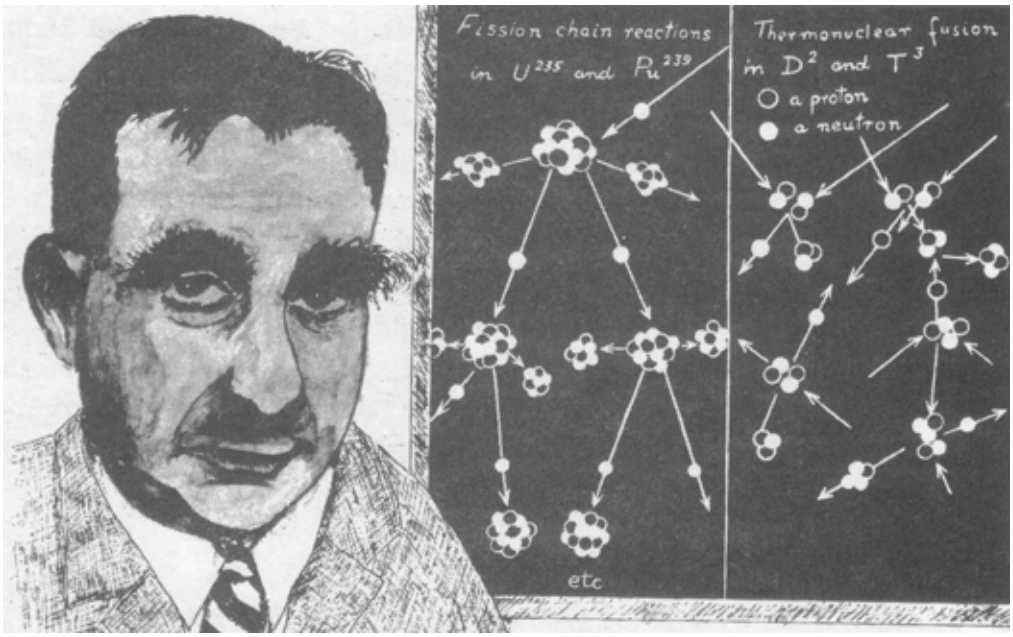
A Briggs Fotografiederb Atomfeines Diopsidkristalls. Die Kreise weisen auf einzelne Atome von Calcium, Magnesium, Silicium und Sauerstoff bin. Die Vergrößerung ist etwa 100 000 000-facb,

B Ein Neutron trifft auf einen Urankern und spaltet ihn in zwei Brucbstücke, die in entgegengesetzten Richtungen davonfliegen.

C Erzeugung und Zerfalltonneutralen Lambda -und Antilambda-Hyperonen.

Bei diesen Worten des Professors öffnete sich die Tür und herein trat ein wichtig aussehender Mann mit unruhigen Augen und buschig-überhängenden dunklen Brauen. Er schüttelte die Hand des Professors und wandte sich an das Auditorium.

"Hölgyeim gs Uraim", begann er. "Räviden kell besz~Inem, mert nagyon sok a dolgom. Ma reggel täbb megbeszhl~sem volt a Pentagon-ban ~s a FeUr Häz ban. D~lutän ... Oh verzeihen Sie bitte!" rief er. "Manchmal bringe ich meine Sprachen durcheinander. Lassen Sie mich von vorne beginnen! Meine Damen und Herrn! Ich muss mich kurz fassen, da ich sehr viel zu tun habe. Heute Vormittag habe ich an einigen Konferenzen im Pentagon und im Weißen Haus teilgenommen; nachmittags muss ich bei der unterirdischen Testexplosion in French Flaps in Nevada anwesend sein und abends habe ich bei einem Bankett in der Vandenberg Air Force Base in Kalifornien eine Rede zu halten.



Kernspaltung und Kernfusion sind völlig verschiedene Vorgänge.

Wesentlich ist, dass die Atomkerne durch zwei Arten von Kräften im Gleichgewicht gehalten werden. nuklearen Anziehungskräften, die das Ziel haben, den Kern als Ganzes zusammenzuhalten, und elektrischen Abstoßungskräften zwischen den Protonen. Bei schweren Kernen, wie bei denen des Urans oder Plutoniums, herrschen die letztgenannten Kräfte vor; der Kern ist bereit zu zerfallen, was bedeutet, dass er bei der geringsten Störung in zwei Spaltprodukte auseinander bricht. Eine solche Störung kann durch ein einziges Neutron, das den Kern trifft, ausgelöst werden."

Sich zur Tafel wendend, fuhr er fort: "Hier sehen Sie einen spaltbaren Kern, der soeben von einem Neutron getroffen wurde. Zwei Spaltprodukte fliegen auseinander, von denen jedes zirka eine Million Elektronenvolt Energie mit sich führt. Überdies werden einige neue Spaltneutronen freigesetzt - etwa zwei im Fall des leichten Uranisotops und zirka drei bei Plutonium. Dann setzt sich peng! peng! die Reaktion so fort, wie ich sie hier auf die Tafel gezeichnet habe. Ist das Stück spaltbarer Materie klein, so treten die meisten Spaltneutronen aus der Oberfläche aus, bevor sie die Chance hatten, auf einen anderen spaltbaren Kern zu treffen, so dass die Kettenreaktion erst gar nicht in Gang kommt. Doch sind die Abmessungen des Uranblocks größer als 8 cm, seine Masse damit größer als das, was wir als kritische Masse bezeichnen, werden die meisten der Neutronen eingefangen und das ganze Ding fliegt in die Luft. So etwas nennen wir Spaltbombe. Des öfteren bezeichnet man sie fälschlicherweise auch als Atombombe.

Weit bessere Resultate kann man allerdings erzielen, wenn man am anderen Ende des

Periodensystems arbeitet, wo die nuklearen Anziehungskräfte stärker als die elektrische Abstoßung sind. Kommen zwei leichte Kerne miteinander in Berührung, so verschmelzen sie wie zwei Quecksilbertröpfchen auf einer Tasse. Dies kann nur bei sehr hohen Temperaturen geschehen, da leichte Kerne ja bei gegenseitiger Annäherung durch elektrische Abstoßungskräfte daran gehindert werden, miteinander in Kontakt zu kommen. Doch wenn die Temperatur mehr als zehn Millionen Grad erreicht, ist die elektrische Abstoßung zu schwach, einen Kontakt zu verhindern und der Fusionsprozess beginnt. Die für eine Fusion geeignetsten Kerne sind Deuteriumikonen, also die Kerne des schweren Wasserstoffs. Hier rechts haben wir ein einfaches Schema einer thermonuklearen Reaktion in Deuterium. Als wir das erste Mal an die Wasserstoffbombe dachten, glaubten wir, sie würde ein Segen für die Welt sein, da sie keinerlei radioaktive Spaltprodukte erzeugt, die sich über die Atmosphäre auf die Erde ausbreiten könnten. Doch waren wir nicht imstande, eine solch reine' Wasserstoffbombe zu bauen, weil Deuterium, der beste nukleare Brennstoff schlechthin, da er problemlos dem Wasser der Ozeane entnommen werden kann, uns nicht den Gefallen macht, von selbst zu brennen zu beginnen. Deshalb mussten wir das Deuterium mit einem schweren Mantel aus Uran umgeben. Diese Schalen produzieren eine große Anzahl von Spaltprodukten und manche Leute sprechen daher von der ‚schmutzigen' Wasserstoffbombe. Auf eine ähnliche Schwierigkeit stößt man bei der Planung der kontrollierten thermonuklearen Deuterium-Reaktion, die wir trotz aller Anstrengungen noch immer nicht haben. Aber ich bin sicher, dass dieses Problem früher oder später gelöst sein wird."

"Dr. Tallerkin", fragte da jemand aus dem Auditorium, "wie verhält es sich eigentlich mit den Spaltprodukten der Atombombentests? Sie rufen doch schädliche Mutationen unter der Bevölkerung auf der ganzen Erde hervor! "
"Nicht alle Mutationen sind schädlich", lächelte Dr. Tallerkin, "einige von ihnen führen zu einer Verbesserung der Nachkommenschaft. Hätte es unter den lebenden Organismen keine Mutationen gegeben, wären Sie und ich noch immer Amöben. Sie wissen doch sicherlich, dass die Evolution des Lebens vollständig auf natürliche Mutationen und auf das Prinzip vom Überleben des Stärksten zurückzuführen ist?"
"Meinen Sie damit", schrie eine Frau im Auditorium hysterisch, "dass wir dutzendweise Kinder in die Welt setzen, die besten von ihnen behalten und die übrigen vielleicht umbringen sollen?!"
"Nun, gnädige Frau, -" setzte Dr. Tallerkin an, doch im selben Augenblick öffnete sich die Tür des Hörsaals und ein Mann in Pilotenuniform trat ein.
" Beeilen Sie sich, Sir! " rief er. "Ihr Helikopter wartet vor dem Eingang. Wenn wir nicht sofort starten, versäumen Sie den Anschluss auf dem Flughafen. "
"Bedaure", wandte sich Dr. Tallerkin an das Auditorium. "Sie sehen, ich muss gehen. Ist verrückt! " Und fort waren sie.

13 Der Holzschnitzer

Die Tür war groß und schwer und in der Mitte trug sie die warnende Aufschrift: EINTRITT VERBOTEN HOCHSPANNUNG. Doch wurde dieser erste, unfreundliche Eindruck durch das Wort "Willkommen" gemildert, das in großen Lettern auf der Türmatte zu lesen war. Also drückte Mr. Tompkins nach kurzem Zögern die Klingel. Nachdem ein junger Assistent

ihn gebeten hatte einzutreten, fand sich Mr. Tompkins in einem großen Raum vor, von dem gut die Hälfte von einer komplizierten, phantastisch aussehenden Maschine eingenommen wurde.
"Das ist unser großes Zyklotron", erklärte der Assistent, während er seine Hand liebevoll auf eine Spule des riesigen Elektromagneten legte, der den wichtigsten Teil dieses imposanten Werkzeugs moderner Physik darstellte.

Das Hochspannungslabor

"Es erzeugt Teilchen mit Energien bis zu zehn Millionen Elektronenvolt, fügte er stolz hinzu. "Es gibt nicht viele Kerne, die dem Stoß eines Projektils, das sich mit solch ungeheurer Energie bewegt, standhalten können. "
"Ganz schön fest, diese Kerne", meinte Mr. Tompkins. "Unglaublich, dass man ein derart riesiges Ding wie das hier bauen muss, bloß um den winzigen Kern eines winzigen Atoms zu spalten! Wie arbeitet diese Maschine denn eigentlich?"
"Warst Du jemals in einem Zirkus?" fragte da sein Schwiegervater, indem er aus dem Hintergrund des riesigen Gebildes hervortrat. 'IHM, ... ja, natürlich", sagte Mr. Tompkins, durch die unerwartete Frage nicht wenig überrascht. "Soll das etwa heißen, dass ich mit Dir heute Abend in den Zirkus gehen soll?" "Nicht unbedingt", lächelte der Professor, "doch würde es Dir helfen, die Funktionsweise eines Zyklotrons zu verstehen. Blickst Du zwischen die Pole dieses mächtigen Magneten, dann bemerkst Du eine runde Kupferschachtel. Sie ist eine Art zirkusartige Arena, in der die verschieden geladenen Teilchen, die man zum Beschießen der Kerne bei Experimenten braucht, beschleunigt werden. Im Mittelpunkt dieser Schachtel liegt die Quelle, die die geladenen Teilchen oder Ionen erzeugt. Die Teilchen besitzen nach ihrer Emission nur geringe Geschwindigkeit. Das starke Feld des Magneten krümmt ihre Bahn daher zu winzigen Kreisen um das Zentrum. Aber dann peitschen wir sie zu immer höheren Geschwindigkeiten auf." "Ich begreife, wie man einem Pferd die Peitsche gibt", sagte Mr. Tompkins. "Doch wie man dasselbe mit diesen winzigen Teilchen anstellen kann, geht etwas über meinen Horizont."

"Und trotzdem ist es sehr einfach. Sobald das Teilchen eine Kreisbahn beschreibt, braucht

man ihm bloß in dem Moment, in dem es einen bestimmten Punkt seiner Bahn durchläuft, eine Serie aufeinanderfolgender Elektroschocks zu erteilen, nicht anders, als es ein Dresseur im Zirkus macht, der in der Arena steht und das Pferd immer dann, wenn es an ihm vorbeiläuft, mit der Peitsche anfeuert." "Immerhin kann der Dresseur sein Pferd sehen", wandte Mr. Tompkins ein. Aber kannst Du ein Teilchen selben, wenn es in dieser Kupferschachtel rotiert, so dass Du ihm im jeweils genau richtigen Moment einen Stoß versetzen kannst?" "Natürlich nicht", erwiderte der Professor, "aber das ist ja gar nicht nötig. Die einzige Besonderheit am Aufbau des Zyklotrons ist die, dass das beschleunigte Teilchen, obwohl es sich immer rascher bewegt, stets im selben Zeitraum eine volle Umdrehung ausführt. Entscheidend dabei ist, wie Du siehst, dass sich der Radius der Teilchenbahn und damit seine gesamte Weglänge proportional zu seiner zunehmenden Geschwindigkeit vergrößern. Das Teilchen bewegt sich also längs einer Spiralbahn nach außen und kommt in regelmäßigen Intervallen immer an dieselbe Stelle der Arena' zurück. Alles, was man tun muss, ist, dort eine elektrische Vorrichtung anzubringen, die in regelmäßigen Intervallen elektrische Impulse abgibt. Wir erreichen das mit Hilfe eines elektrischen Schwingkreises, der den bei Rundfunkstationen verwendeten sehr ähnlich ist. Der einzelne elektrische Impuls ist nicht sehr stark, doch bewirkt die Kumulierung der Einzelimpulse eine Beschleunigung des Teilchens auf außerordentlich hohe Geschwindigkeiten. Das ist der große Vorzug dieser Anlage. sie erzielt eine Wirkung, die jener von vielen Millionen Volt entspricht, obwohl nirgendwo im System so hohe Spannungen tatsächlich vorhanden sind."

Das große Zyklotron ist ein Atomzertrümmerer

"Einfach genial", sagte Mr. Tompkins nachdenklich. "Wessen Idee war das eigentlich?"

"Zum ersten Mal wurde das Zyklotron von dem inzwischen verstorbenen Ernest Orlando Lawrence vor einigen Jahren an der Universität von Kalifornien gebaut", antwortete der Professor. "Seither sind diese Anlagen größer geworden und haben sich mit einer sonst nur Gerüchten eigenen Schnelligkeit über die physikalischen Laboratorien verbreitet. Sie scheinen wirklich viel zweckdienlicher als die alten Anlagen zu sein, die Kaskadentransformatoren oder auf elektrostatischem Prinzip beruhende Maschinen

benutzten.
Kann man denn den Kern nicht ohne all diese komplizierten Hilfst mittel spalten?" fragte Mr. Tompkins, der großes Vertrauen zu allem Einfachen hatte und jeder Sache, die komplizierter als ein Hammer war, misstraute.
"Natürlich kann man es. So hat Rutherford bei seinen berühmten ersten Experimenten zur künstlichen Elementumwandlung ganz gewöhnliche Alphateilchen benutzt, die von Körpern mit natürlicher Radioaktivität emittiert wurden. Doch das war vor mehr als zwanzig Jahren. Seither hat die Technik der Atomzertrümmerung, wie Du siehst, beträchtliche Fortschritte gemacht."
"Kannst Du mir zeigen, wie man ein Atom zertrümmert?" fragte Mr. Tompkins, der es stets vorzog, sich die Dinge mit eigenen Augen anzusehen, anstatt langwierigen Erklärungen zu lauschen.
"Gern", erwiderte der Professor. "Wir waren gerade dabei, mit einem Experiment zu beginnen. Wir betreiben hier soeben weitere Untersuchungen über den Zerfall von Boratomen beim Aufprall schneller Protonen. Wenn der Kern eines Bordatoms so stark von einem Proton getroffen wird, dass das Projektil den Potentialwall durchstoßen und in den Kern eindringen kann, zerfällt dieser in drei gleiche Stücke, die nach verschiedenen Richtungen davonfliegen. Dieser Vorgang kann mit Hilfe der sogenannten, Nebelkammer' direkt beobachtet werden, die es uns ermöglicht, die Bahnen aller an der Kollision beteiligten Teilchen zu verfolgen. Eine solche Kammer, in deren Mitte ein Stück Bor liegt, wird jetzt an die Öffnung der Beschleunigerkammer angebracht. Sobald wir das Zyklotron in Betrieb setzen, kannst Du also mit eigenen Augen beobachten, wie der Kern zertrümmert wird."
"Würden Sie bitte den Strom einschalten", wandte er sich an den Assistenten, "während ich versuche das Magnetfeld einzustellen."
Es dauerte einige Zeit, bis das Zyklotron in Gang kam. Allein gelassen, schlenderte Mr. Tompkins indessen müßig durch das Labor. Seine Aufmerksamkeit wurde von einem komplizierten System großer Verstärkerröhren angezogen, die in einem schwachen, bläulichen Licht glühten. In Unkenntnis des Umstandes, dass die im Zyklotron verwendeten elektrischen Spannungen zwar nicht dazu ausreichen, einen Kern zu zertrümmern, aber leicht einen Ochsen zu Boden strecken können, lehnte er sich vor, um die Röhren aus der Nähe zu betrachten.
Es gab einen lauten Knall, der dem der Peitsche eines Löwenbändigers ähnlich war - und Mr. Tompkins empfand einen furchtbaren Schlag, der seinen ganzen Körper erschütterte. Im nächsten Moment wurde ihm schwarz vor den Augen und er verlor das Bewusstsein.
Als er seine Augen wieder öffnete, fand er sich der Länge nach auf dem Boden liegend wieder, auf den ihn die elektrische Entladung geschleudert hatte. Der Raum um ihn schien derselbe zu sein, doch die Gegenstände darin hatten sich beträchtlich verändert. Statt des mächtigen Magneten des Zyklotrons, der glänzenden Kupferkabel und Dutzender komplizierter elektrischer Vorrichtungen, die an jedem nur möglichen Punkt angebracht gewesen waren, erblickte Mr. Tompkins einen langen, hölzernen Arbeitstisch, auf dem die einfachen Werkzeuge eines Zimmermanns lagen. Auf den altmodischen Borden, die an der Wand befestigt waren, entdeckte er eine große Zahl verschiedener Holzschnitzereien von ungewöhnlich seltsamen Formen. Ein alter, freundlich aussehender Mann arbeitete am Tisch. Als Mr. Tompkins dessen Gesichtszüge näher betrachtete, verblüffte ihn die außerordentliche Ähnlichkeit sowohl mit dem alten Gepetto in Walt Disneys Pinocchio als

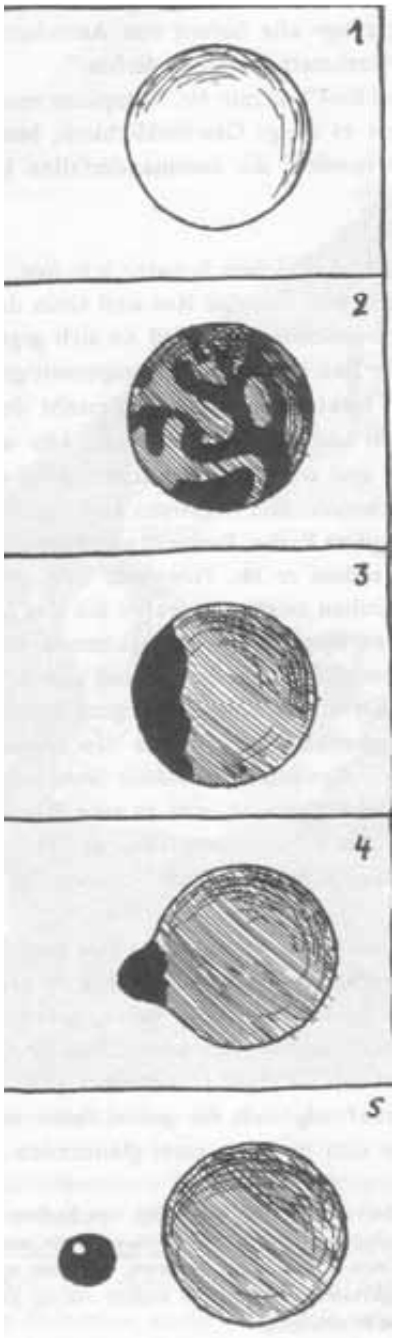
auch mit dem Porträt des seligen Lord Rutherford of Nelson, das im Laboratorium des Professors an der Wand hing.
"Entschuldigen Sie mein Eindringen", sagte Mr. Tompkins und erhob sich vom Boden. "Soeben erst habe ich nämlich ein Kernforschungslabor besucht. Dabei muss mir etwas Seltsames zugestoßen sein."
"Ach, sie interessieren sich für Atomkerne", sagte der alte Mann und legte das Holzstück, an dem er gerade arbeitete, zur Seite. "Dann sind Sie hier genau an der richtigen Stelle. Ich erzeuge alle Sorten von Atomkernen. Es würde mich freuen, Sie durch meine Werkstatt führen zu dürfen."
"Sie erzeugen Atomkerne, sagen Sie?" meinte Mr. Tompkins verdutzt.

Der Holzschnitzer bei der Arbeit

„Ja natürlich. Freilich erfordert es einige Geschicklichkeit, besonders, wenn es sich um radioaktive Kerne handelt, die auseinanderfallen können, bevor man Zeit findet, sie zu bemalen." "Bemalen?"
"Gewiss. Für die positiv geladenen Teilchen benutze ich Rot, für die negativ geladenen Grün. Vermutlich wissen Sie, dass Rot und Grün das sind, was man als Komplementärfarben' bezeichnet, und dass sie sich gegenseitig aufheben, wenn man sie vermischt*. Das entspricht der gegenseitigen Aufhebung von positiver und negativer elektrischer Ladung. Besteht der Kern aus gleich viel positiven und negativen Ladungen, die sich rasch hin- und herbewegen, so ist er elektrisch neutral und wird dem Betrachter weiß erscheinen. Gibt es einen Überschuss an positiven und negativen Ladungen, so hat das ganze System eine rote oder eine grüne Farbe. Einfach, nicht wahr?"
"Hier", setzte der Alte fort, indem er Mr. Tompkins zwei große, in der Nähe des Tisches stehende Holztruhen zeigte, "bewahre ich das Material auf, aus dem die verschiedenen Kerne hergestellt werden können. Die erste Truhe enthält Protonen, das sind die roten Kugeln da. Sie sind ziemlich stabil und bewahren ihre Farbe, außer man kratzt diese mit einem Messer oder etwas ähnlichem ab. Mehr Schwierigkeiten habe ich mit den sogenannten Neutronen in der zweiten Truhe hier. Gewöhnlich sind sie weiß oder elektrisch neutral, zeigen jedoch eine starke Tendenz, sich in rote Protonen zu verwandeln. Solange man die Truhe fest

verschlossen hält, ist alles in Ordnung, doch sobald man eine der Kugeln herausnimmt - sehen Sie selbst, was dann passiert."
Der alte Holzschnitzer öffnete die Truhe, entnahm ihr eine weiße Kugel und legte sie auf den Tisch. Eine zeitlang schien sich nichts zu ereignen, doch als Mr. Tompkins die Geduld schon fast verloren hatte, kam plötzlich Leben in die Kugel. An ihrer Oberfläche zeigten sich unregelmäßige rötliche und grünliche Streifen. Für kurze Zeit sah sie einer Glasmurmel ähnlich, wie sie bei Kindern so beliebt ist. Hierauf zog sich die grüne Farbe auf eine Seite zusammen; schließlich löste sie sich in Form eines glänzenden grünen

*(Der Leser muss dabei im Auge behalten, dass die Mischung von Farben nur die Lichtstrahlen, nicht die Farben selbst betrifft. Vermischen wir rote und grüne Anstreicherfarbe, so erhalten wir einen schmutzigen Farbton. Bemalen wir dagegen die eine Hälfte eines Spielzeugkreisels rot und die andere Hälfte grün und drehen ihn dann schnell, so erscheint er uns weiß.)



Tröpfchens vollständig von der Kugel und fiel zu Boden. Die Kugel selbst war nun zur Gänze rot und unterschied sich in keiner Weise von den rot gefärbten Protonen in der ersten Truhe.
"Sie sehen, was passiert ist", sagte der Schnitzer, indem er den inzwischen ganz hart und rund gewordenen Tropfen grüner Farbe vom Boden aufhob. "Die weiße Farbe des Neutrons spaltete sich in Rot und Grün und das ganze Ding brach in zwei Teilchen auseinander, in ein Proton und ein negatives Elektron."
"Tja", fügte er hinzu, als er den erstaunten Ausdruck in Mr. Tompkins Gesicht sah, "dieses jadefarbene Teilchen hier ist nur ein gewöhnliches Elektron, eines, das sich von einem beliebigen anderen Elektron, ob es in einem Atom ist oder sonst wo, nicht unterscheidet, Donnerwetter!" rief Mr. Tompkins. "Das stellt die raffiniertesten Taschen Vierertricks, die ich bisher sah, zweifellos in den Schatten. Aber können Sie die Farben auch wieder zurückverwandeln?"
"Gewiss. Ich kann nämlich die grüne Farbe auf die Oberfläche der roten Kugel wieder zurückreiben und diese so wieder weiß machen. Doch das würde natürlich einige Energie erfordern. Ein anderer Weg wäre, die rote Farbe abzukratzen, was gleichfalls Energie kostet. In diesem Fall bildet die von der Oberfläche des Protons abgekratzte Farbe ein rotes Tröpfchen, mit anderen Worten, ein positives Elektron, wovon Sie wahrscheinlich schon einmal gehört haben."
"Und ob! Als ich nämlich selbst ein Elektron war ..." begann Mr. Tompkins - doch er verbesserte sich rasch: "Ich meine, ich habe gehört, dass positive und negative Elektronen einander vernichten. wann immer sie sich treffen. Können Sie mir auch diesen Trick vorführen?
"Warum nicht? Es ist sehr einfach," sagte der alte Mann, "doch möchte ich mir lieber nicht die Mühe machen, die Farbe von diesem Proton abzukratzen, da ich von meiner Arbeit heute morgen her noch ein Positronenpaar Übrighabe.
Aus einer der Schubladen zog er eine winzige, hellrote Kugel heraus, presste sie zwischen Zeigefinger und Daumen und legte sie neben die grüne Kugel auf den Tisch. Es gab ein schrilles Pfeifen, das an die Explosion eines Feuerwerkskörpers erinnerte. und mit einemmal waren beide Kugeln verschwunden.
"Sehen Sie?" sagte der Holzschnitzer und blies seine ein wenig verbrannten Finger. "Das ist der Grund dafür, warum man Elektronen für den Bau von Kernen nicht verwenden kann. Ein einziges Mal habe ich es versucht. Ich habe es aber gleich wieder aufgegeben. jetzt verwende ich nur noch Protonen und Neutronen. "Neutronen sind doch gleichfalls instabil, oder etwa nicht?" fragte Mr. Tompkins, zumal er sich an die vorhergehende Vorführung erinnerte.
"Wenn sie allein sind, ja. Aber sobald sie sich dicht gepackt im Kern befinden und von anderen Teilchen umgeben sind, sind sie ziemlich stabil. Wenn jedoch, relativ gesehen, zu viele Neutronen oder zu viele Protonen vorhanden sind, dann können sie sich von sich aus umwandeln, wobei der Kern die nebenher entstehende Farbe in Form eines negativen oder positiven Elektrons abgibt. Solch eine Umordnung nennt man Betatransformation. "
"Verwenden Sie zur Herstellung der Kerne eine Art Leim?" fragte Mr. Tompkins interessiert.
"Nicht nötig", erwiderte der Alte. "Die Teilchen, die Sie hier sehen, haften von allein aneinander, sobald man sie miteinander in Berührung bringt. Sie können es selbst versuchen,

wenn Sie wollen."
Auf diesen Vorschlag hin nahm Mr. Tompkins ein Proton in die eine und ein Neutron in die andere Hand und brachte sie behutsam einander näher. Mit einemmal empfand er eine starke Zugwirkung und bemerkte an den Teilchen ein höchst eigenartiges Phänomen. Die beiden Teilchen tauschten ständig ihre Farbe; bald waren sie rot, bald weiß. Es sah so aus, als würde die rote Farbe von der Kugel in der einen Hand auf die zweite Kugel hinüber und wieder zurückspringen. Das Aufblinken der Farbe erfolgte so schnell, dass die beiden Kugeln durch ein rötliches Band verbunden zu sein schienen, an dem die Farbe hin- und herpendelte.
"Meine Freunde von der Theorie bezeichnen das als Austauschphänomen", bemerkte der alte Meister mit einem Schmunzeln über Mr. Tompkins Verwunderung. "Beide Kugeln möchten gerne rot sein oder - wenn Sie es anders ausdrücken wollen - die elektrische Ladung haben. Aber da sie die Ladung nicht gleichzeitig besitzen können, ziehen sie sie abwechselnd hin und her. Keiner von den beiden will aufgeben und so kleben sie aneinander, bis man sie gewaltsam trennt. Wenn Sie wollen, zeige ich Ihnen, wie einfach es ist, jeden beliebigen Kern, den Sie haben wollen, herzustellen. Was darf's denn sein?"
"Gold", antwortete Mr. Tompkins, indem er sich an die ehrgeizigen Bemühungen der mittelalterlichen Alchemisten erinnerte.
"Gold? Na, sehen wir mal nach", murmelte der Meister und wandte sich einer großen Tabelle zu, die an der Wand hing. "Der Atomkern des Goldes wiegt einhundertrundsiebenundneunzig Einheiten und trägt neunundsiebzig positive Ladungen. Das heißt, ich muss, um die richtige Masse zu erhalten, neunundsiebzig Protonen nehmen und hundertachtzehn Neutronen hinzufügen. Er zählte die genannten Teilchen in ein hohes, zylindrisches Gefäß und bedeckte sie mit einem schweren, hölzernen Kolben. Dann drückte er den Kolben mit ganzer Kraft nieder.
"Das ist", erklärte er Mr. Tompkins, "wegen der starken elektrischen Abstoßung zwischen den positiv geladenen Protonen nötig. Sobald die Abstoßung infolge des Kolbendrucks überwunden ist, bleiben die Protonen und Neutronen wegen der zwischen ihnen wirksamen Austauschkräfte aneinander haften und bilden den gewünschten Kern."
Nachdem er den Kolben so weit wie möglich niedergedrückt hatte, zog er ihn wieder heraus und drehte das Gefäß rasch mit der Oberseite nach unten. Eine glänzende, rötliche Kugel rollte auf den Tisch heraus. Bei deren näherer Betrachtung stellte Mr. Tompkins fest, dass ihre rötliche Färbung darauf zurückzuführen war, dass die sich rasch hin- und herbewegenden Teilchen bald rot und bald weiß aufblinkten.
"Wie schön! " rief er. "Dies ist also ein goldenes Atom!"
"Kein Atom, erst der Atomkern", berichtigte ihn der alte Schnitzer. "Um das Atom komplett zu machen, muss man die zur Neutralisierung der positiven Kernladung erforderliche Anzahl von Elektroneid hinzufügen und daraus die übliche Elektronenhülle aufbauen. Dies ist leicht, zumal der Kern sich seine Elektronen selbst einfängt, sobald sich solche in seiner Nähe befinden. "
„Merkwürdig," sagte Mr. Tompkins, "dass mein Schwiegervater nie davon sprach, dass sich Gold so einfach erzeugen lässt."
"Erzählen Sie mir nichts von Ihrem Schwiegervater und den übrigen sogenannten Kernphysikern!" rief der Alte mit einem Anflug von Ärger in seiner Stimme. "Sie ziehen eine glänzende Show ab, bringen in Wirklichkeit aber wenig zustande. Sie erklären, sie könnten einzeln vorhandene Protonen nicht zu einem komplexen Kern komprimieren, da es

ihnen unmöglich sei, einen für diese Aufgabe genügend großen Druck zu erzeugen. Einer von ihnen hat sogar -berechnet, dass man das ganze Gewicht des Mondes auflegen müsste, um zu erreichen, dass die Protonen aneinander kleben bleiben. Nun, warum holen sie sich nicht den Mond, wenn das ihre einzige Sorge ist?"
"Kernumwandlungen bringen sie jedoch immerhin hervor", bemerkte Mr. Tompkins kleinlaut.
"Ja gewiss, aber unbeholfen und linkisch und außerdem in sehr geringem Umfang. Die Mengen, die sie von den neuen Elementen erhalten, sind so winzig klein, dass sie sie kaum selbst sehen können. Ich werde Ihnen zeigen, wie sie das machen." Und er ergriff ein Proton und warf es mit beträchtlicher Kraft gegen den Goldkern, der auf dem Tisch lag. Sowie das Proton an die Kernoberfläche herankam, wurde es etwas langsamer, zögerte einen Augenblick lang und stürzte hierauf in den Kern hinein. Nachdem der Kern das Proton verschlungen hatte, erbebte er kurz, als hätte er hohes Fieber; dann brach ein kleiner Teil mit einem Knall von ihm ab.
"Sehen Sie", sagte der Alte, indem er das Bruchstück aufhob, "dies hier bezeichnen die Kernphysiker als Alphateilchen. Wenn Sie es aus der Nähe betrachten, werden Sie bemerken, dass es aus zwei Protonen und zwei Neutronen besteht. Teilchen dieser Art werden normalerweise von den schweren Kernen der sogenannten radioaktiven Elemente ausgestoßen, doch man kann sie auch aus gewöhnlichen, stabilen Kernen herausschlagen, sofern man sie kräftig genug trifft. Außerdem muss ich Sie darauf hinweisen, dass es sich bei dem noch auf dem Tisch befindlichen Bruchstück nicht mehr um einen Goldkern handelt; es hat eine positive Ladung verloren und ist jetzt ein Platinkern, also ein Kern des in der Periodentafel vorhergehenden Elements. In gewissen Fällen bewirkt jedoch das in den Kern eindringende Proton keine Spaltung. Als Ergebnis erhält man dann den Kern des in der Tabelle nachfolgenden Elements, in unserem Fall also einen Quecksilberkern. Kombiniert man diese und ähnliche Prozesse miteinander, so kann man tatsächlich jedes vorgegebene Element in ein beliebiges anderes umwandeln."
"Aha, nun ist klar, wozu die vom Zyklotron erzeugten schnellen Protonenstrahlen benötigt werden bemerkte Mr. Tompkins, der die Zusammenhänge zu begreifen begann. "Aber warum behaupten Sie dann, diese Methode sei nicht gut?"
"Weil ihre Effektivität außerordentlich gering ist. Erstens können sie mit ihren Projektilen nicht so gut zielen wie ich, so dass sie den Kern bei einigen tausend Schüssen nur einmal tatsächlich treffen. Zweitens ist es selbst im Falle eines Treffers sehr wahrscheinlich, dass das Projektil vom Kern zurückprallt, anstatt in sein Inneres einzudringen. Sie haben vielleicht bemerkt, dass das Proton, als ich es gegen den Goldkern schleuderte, kurz zögerte, bevor es in diesen eintrat, so dass ich einen Augenblick lang dachte, es könnte zurückgeworfen werden."
"Was hindert denn die Projektile am Eindringen?" fragte Mr. Tompkins interessiert.
"Das hätten Sie selbst herausbekommen können", sagte der Alte, "wenn Sie sich daran erinnert hätten, dass sowohl der Kern wie auch die ihn bombardierenden Protonen positive Ladungen tragen. Die abstoßenden Kräfte zwischen diesen Ladungen bilden eine Art Barriere, die man nicht ohne weiteres überwinden kann. Wenn die bombardierenden Protonen die nukleare Festung einzunehmen vermögen, so nur deshalb, weil sie mit etwas arbeiten, das der Technik des Trojanischen Pferdes ähnlich ist-. sie durchdringen die Kernwälle nicht als Teilchen, sondern als Wellen."

Jetzt haben Sie mich so weit", sagte Mr. Tompkins niedergeschlagen. "ich verstehe kein Wort mehr von dem, was Sie sagen."
"Das habe ich beinahe befürchtet", erwiderte der Schnitzer mit einem Lächeln. "Um der Wahrheit die Ehre zu geben-. Ich selbst bin nur ein einfacher Handwerker. Wenn ich diese Dinge auch mit meinen Händen herstellen kann, so bin ich in diesem theoretischen Abrakadabra doch nicht sehr beschlagen. Der entscheidende Punkt ist jedenfalls der, dass alle diese nuklearen Teilchen aus Quantenmaterie bestehen und daher stets durch Hindernisse, die gewöhnlich für undurchdringlich angesehen werden, hindurchtreten oder besser gesagt hindurchsickern können."
Jetzt verstehe ich, was Sie sagen wollen!" rief Mr. Tompkins. "Mir fällt ein, dass ich einst, kurz bevor ich Maud kennerlernte, ein seltsames Lokal aufsuchte, wo sich die Billardkugeln genauso verhielten, wie Sie es beschreiben. "
"Billardkugeln? Sie meinen Billardkugeln aus richtigem Elfenbein?" wiederholte der alte Schnitzer aufgeregt.
"Genau solche. Meines Wissens werden sie aus den Stoßzähnen der Quantenelefanten hergestellt", antwortete Mr. Tompkins.
"Tja, so ist das Leben", sagte der alte Mann traurig. "Solch teures Material verwendet man für Spielzeug, und ich - ich muss Protonen und Neutronen, die fundamentalsten Teilchen des gesamten Universums, aus einfacher Quanteneiche schnitzen!"
"Doch", fuhr er fort, indem er seine Enttäuschung zu verbergen suchte, "meine armseligen Holzspielzeuge sind genauso gut wie all jene teuren elfenbeinernen Erfindungen. Ich werde Ihnen vorführen, wie sie anstandslos jede Art von Hindernis zu durchqueren vermögen." Und er kletterte auf die Bank und entnahm dem obersten Regal eine sehr seltsam geformte Figur, die dem Modell eines Vulkans ähnlich sah.

Die Kugel verschwand in halber Höbe des Abgangs.

"Was Sie hier sehen", setzte er fort, wobei er behutsam den Staub wegwischte, "ist das Modell der Barriere aus Abstoßungskräften, die jeden Atomkern umgibt. Die äußere Böschung entspricht der elektrischen Abstoßung zwischen den Ladungen, der Krater den anziehenden Kräften, die bewirken, dass die nuklearen Teilchen aneinander kleben. Für den Fall, dass ich eine Kugel den Hang hinaufschubse, aber nicht kräftig genug, um sie über den Kraterrand zu befördern, werden Sie selbstverständlich vermuten, dass sie wieder zurückrollt. Doch sehen Sie selbst, was wirklich passiert ..... und er gab der Kugel einen leichten Stoß.
"Nun, ich sehe nichts Ungewöhnliches", sagte Mr. Tompkins, als die Kugel, nachdem sie etwa bis zur Hälfte des Hangs gelangt war, wieder auf den Tisch zurückrollte.
"Warten Sie!" sagte der Schnitzer ruhig. "Sie sollten sich nicht schon vom ersten Versuch etwas Außergewöhnliches versprechen", und er ließ die Kugel ein zweites Mal den Hang

hinaufrollen. Es klappte wieder nicht; doch beim dritten Anlauf verschwand die Kugel plötzlich in dem Augenblick, als sie sich etwa in halber Höhe des Abhangs befand.
"Na also. Wohin, glauben Sie, ist sie jetzt verschwunden?" sagte der alte Schnitzer mit der Miene eines Zauberers triumphierend.
"Sie meinen wohl, dass sie jetzt im Krater ist?" fragte Mr. Tompkins.
"Richtig, genau so ist es", sagte der Alte und holte die Kugel mit den Fingern daraus hervor.
"Nun wollen wir es umgekehrt machen", schlug er vor, "und sehen, ob die Kugel aus dem Krater wieder herauskann, ohne dabei über den Rand des Kraters rollen zu müssen". Und er warf die Kugel in das Loch zurück.
Eine Weile passierte nichts; Mr. Tompkins konnte nur das dumpfe Rumpeln der Kugel, die im Krater hin- und herrollte, vernehmen. Dann erschien die Kugel plötzlich wie durch ein Wunder auf der Mitte des Abhangs und rollte langsam auf den Tisch hinab.
"Was Sie hier gesehen haben, gibt sehr gut wieder, was bei einem radioaktiven Alpha-Zerfall vor sich geht", sagte der Schnitzer und stellte das Modell an seinen Platz zurück, "nur haben Sie in diesem Fall statt einer Barriere aus gewöhnlicher Quanteneiche eine Barriere aus elektrischer Abstoßungskraft vor sich. Doch grundsätzlich gibt es hier keinerlei Unterschied. Manchmal sind diese elektrischen Barrieren so durchlässig', dass das Teilchen innerhalb eines Bruchteils einer Sekunde entwischt; manchmal sind sie so ‚undurchlässig', dass hierzu viele Billionen von Jahren nötig sind, wie etwa im Falle des Urankerns."
"Warum sind denn nicht alle Kerne radioaktiv?" fragte Mr. Tompkins.
"Weil in den meisten Kernen der Boden des Kraters unter dem äußeren Niveau liegt. Nur bei den schwersten der bekannten Kerne liegt der Boden genügend hoch, so dass ein derartiges Entkommen möglich wird."
Es lässt sich schwer sagen, wie viele Stunden Mr. Tompkins in der Werkstatt des freundlichen alten Schnitzers verbracht hatte, der immer sehr darauf aus war, seine Kenntnisse Vorbeikommenden mitzuteilen. Mr. Tompkins sah noch viele andere ungewöhnliche Dinge, darunter vor allem ein sorgsam verschlossenes, doch offensichtlich leeres Kästchen mit der Aufschrift-. Neutrinos. Sorgfältig handhaben und nichts herauslassen.
"Ist etwas darin?" fragte Mr. Tompkins, indem er das Kästchen an seinem Ohr schüttelte.

"Ich weiß es nicht", sagte der Schnitzer. "Manche Leute sagen ja, manche nein. Sehen kann man jedenfalls nichts. Es ist zweifellos ein merkwürdiges Kästchen, das mir da einer meiner Freunde von der Theorie gegeben hat. Ich weiß nicht recht, was ich damit anfangen soll. Besser, ich las' es vorerst in Ruhe."
Als Mr. Tompkins seine Besichtigung fortsetzte, entdeckte er auch eine verstaubte Violine, die so alt aussah, dass man meinen konnte, Stradivaris Großvater habe sie gebaut.
"Spielen Sie Geige?" wandte er sich an den Schnitzer.
"Leider nur Gammastrahlenmelodien", antwortete der Alte. "Dies ist eine Quantenvioline; etwas anderes kann man auf ihr nicht spielen. Einst besaß ich sogar ein Quantencello für optische Töne, aber irgend jemand borgte es sich aus und brachte es nicht mehr zurück."
‚Ach, dann spielen Sie mir doch bitte eine Gammastrahlenmelodie vor", bat Mr. Tompkins. "Ich hab' so etwas noch nie gehört."
"Ich will Ihnen Nuclet in Th-Cis" vorspielen", sagte der Schnitzer und legte die Violine an die Schulter. "Sie müssen sich jedoch auf eine sehr traurige Melodie gefasst machen."

Die Musik klang in der Tat sehr seltsam; sie war völlig verschieden von allem, was Mr. Tompkins bisher gehört hatte. Es klang wie das eintönige Brausen der Brandung des Meers an einem sandigen Küstenstreifen; ein Brausen, das von Zeit zu Zeit von einem schrillen Ton unterbrochen wurde, der an das Pfeifen eines vorüberfliegenden Geschosses erinnerte. Mr. Tompkins war nicht gerade das, was man musikalisch nennt, dennoch übte diese Melodie eine eindringliche, ja geheimnisvolle Wirkung auf ihn aus. Er streckte sich behaglich in seinen alten Lehnstuhl zurück und schloss die Augen .

14 Löcher im Nichts

Meine Damen und Herrn!
Heute Abend bitte ich Sie um Ihre besondere Aufmerksamkeit, denn die Probleme, die ich behandeln möchte, sind zwar faszinierend, aber auch schwierig. Ich werde heute über Teilchen sprechen, deren Eigenschaften mehr als ungewöhnlich sind; man kennt sie als Positionen. Besonderes Interesse verdient in diesem Zusammenhang der Umstand, dass die Existenz dieser Teilchen auf Grund rein theoretischer Überlegungen einige Jahre vor ihrer tatsächlichen Entdeckung prognostiziert wurde, wobei der empirische Nachweis durch die theoretische Vorhersage ihrer wichtigsten Eigenschaften wesentlich erleichtert wurde.
Das Verdienst für diese Voraussage kommt einem britischen Physiker zu, Paul Dirac nämlich, von dem Sie ja schon gehört haben. Er kam zu diesem Schluss auf Grund derart eigenartig, ja fantastisch klingender theoretischer Überlegungen, dass die meisten Physiker sich ziemlich lange weigerten, ihnen Glauben zu schenken. Der Grundgedanke der Diracschen Theorie kann in die folgenden einfachen Worte gefasst werden: "im leeren Raum muss es Löcher geben". Sie sind überrascht, wie ich sehe. Nun, das waren auch alle Physiker, als Dirac diese bemerkenswerten Worte äußerte. Wie kann es in einem leeren Raum ein Loch geben? Kann dieser Gedanke in irgendeiner Weise sinnvoll sein? Durchaus,

wenn man dabei annimmt, dass der sogenannte leere Raum in Wirklichkeit nicht so leer ist, wie wir es im allgemeinen glauben. Tatsächlich liegt der entscheidende Punkt der Diracschen Theorie in der Annahme, dass der sogenannte leere Raum oder das Vakuum in Wirklichkeit kontinuierlich mit einer unendlich großen Anzahl dicht gepackter gewöhnlicher negativer Elektronen gleichmäßig besetzt ist. Es erübrigt sich zu erwähnen, dass diese alte Hypothese nicht ein Produkt reiner Phantasie sein konnte, sondern dass Dirac zu dieser Annahme mehr oder minder durch eine Reihe von Überlegungen gezwungen wurde, die sich auf die Theorie gewöhnlicher negativer Elektronen bezogen. Denn die Theorie führt in der Tat unausweichlich zu dem Schluss, dass es im Atom neben den Quantenzuständen der Bewegung noch unendlich viele, dem reinen Vakuum zugeordnete "negative Quantenzustände" gibt und dass alle Elektronen, voraus
gesetzt, man hindert sie nicht, in diese "komfortableren" Bewegungszustände überzugehen, ihre Atome verlassen und sich sozusagen im leeren Raum auflösen werden. Der einzige Umstand also, der ein Elektron daran hindert, sich hinzubewegen, wohin es ihm beliebt, ist, dass der in Frage stehende Ort bereits von einem anderen Elektron "besetzt" ist (denken Sie an Pauli!). Daher muss man annehmen, dass alle Quantenzustände im Vakuum mit einer unendlichen Anzahl von Elektronen, die sich gleichförmig über den ganzen Raum verteilen, vollständig aufgefüllt sind.

Meine Worte klingen, fürchte ich, nach wissenschaftlichem Abrakadabra und Sie werden aus all dem wohl kaum klug. Die Thematik ist allerdings wirklich sehr schwierig. Ich kann nur hoffen, dass Sie bei weiterem aufmerksamem Zuhören schließlich doch eine gewisse Vorstellung vom Wesen der Diracschen Theorie gewinnen werden.

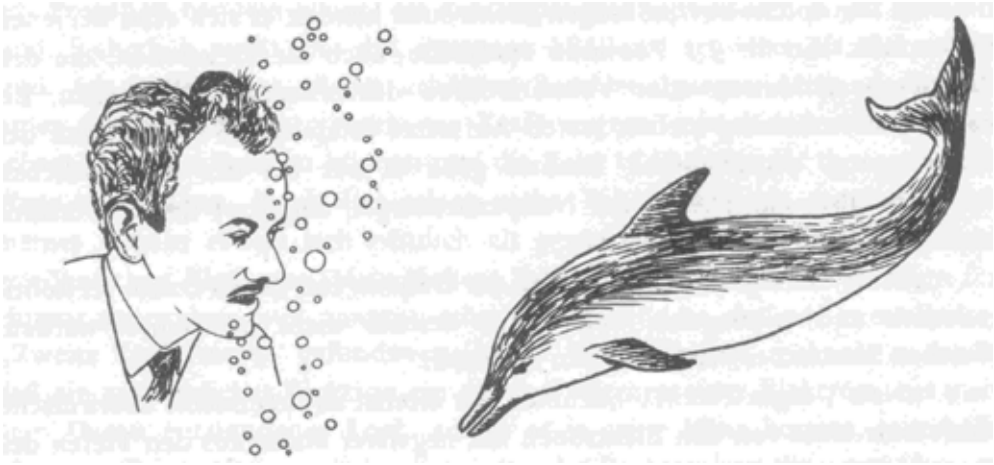
Wie dem auch sei - Dirac jedenfalls kam zu dem Schluss, dass der leere Raum vollständig mit Elektronen ausgefüllt ist, die sich in gleichmäßiger und unendlich großer Dichte über ihn verteilen. Wie ist es dann nur möglich, dass wir nichts davon merken und das Vakuum für absolut leeren Raum halten?

Vielleicht finden Sie die Antwort, wenn Sie sich in die Lage eines Fisches versetzen, der in den Tiefen des Ozeans lebt. Erkennt der Fisch - vorausgesetzt, er besäße die Intelligenz, solch eine Frage zu stellen - dass er von Wasser umgeben ist?

Diese Worte rissen Mr. Tompkins aus seinem sanften Schlummer, in den er zu Beginn des Vortrags gesunken war. Er hing als Köder an der Leine eines Anglers und spürte die frische Brise des Meeres und das sanfte Schaukeln der blauen Wogen. Doch obwohl er ein guter Schwimmer war, konnte er sich nicht an der Oberfläche halten und begann immer tiefer auf den Grund hin zu sinken. Doch seltsamerweise empfand er keinerlei Atemnot und es war ihm recht angenehm zumute. Möglicherweise, dachte er, handelt es sich hier um die Wirkung einer spezifischen rezessiven Mutation.

Wie die Paläontologen lehren, entstand das Leben im Wasser. Der Pionier unter den Fischen, der sich als erster auf trockenes Land wagte, war der sogenannte Lungenfisch, der, auf seinen Flossen watschelnd, an Land spazierte. Dem fügen die Biologen hinzu, dass diese ersten Lungenfische - in Australien nennt man sie Neoceratodi, in Afrika Protouteri und in Südamerika Lepidosiren - sich allmählich zu Landbewohnern entwickelten, also zu Mäusen, Katzen und Menschen. Doch einige von ihnen, Wale und Delphine zum Beispiel, hatten das mühselige Leben auf trockenem Lande bald satt und kehrten in den Ozean zurück. Wieder im Wasser, behielten
sie die Eigenschaften, die sie während ihres Daseinskampfes an Land erworben hatten, und

blieben Säugetiere. Die weiblichen Tiere tragen ihre Jungen daher in ihrem Bauch aus, statt einfach Kaviar zu werfen und diesen später von den Männchen befruchten zu lassen. Gab es nicht einen berühmten ungarischen Wissenschaftler namens Leo Szilard*, der erklärte, Delphine seien intelligenter als Menschen?
Seine Gedanken wurden von einem Gespräch unterbrochen, das irgendwo tief unter der Meeresoberfläche zwischen einem Delphin und einem typischen Vertreter des bomo sapiens geführt wurde. Mr. Tompkins erkannte ihn (von einer Photographie her, die er einmal gesehen hatte) als den Physiker Paul Audrien Maurice Dirac von der Universität Cambridge wieder.
"Schau mal," sagte der Delphin gerade, "Du behauptest, dass wir uns nicht im Vakuum, sondern in einem materiellen Medium befinden, das aus Teilchen mit negativen Massen besteht. Nun, was mich betrifft, ist Wasser von leerem Raum nicht zu unterscheiden; es ist völlig homogen und ich kann mich darin frei nach allen Richtungen bewegen. Eine auf meine Ur-Ur-Ur-UrUrahnen zurückgehende Erzählung berichtet, dass es auf dem trockenen Und ganz anders sei. Es soll dort Berge und Canons geben, die man nicht ohne weiteres durchqueren kann. Hier im Wasser kann ich mich dagegen überall hin bewegen, so wie es mir gerade beliebt."



D. A. M. Dirac unterhielt sich mit einem Delphin.

*(Leo Sailed, The Voice of the Dolphins and Other Stories (Simon and Schuster, New York 1961).

"Was das Wasser des Ozeans betrifft, gebe ich Dir Recht, mein Freund", antwortete P.A.M. "Das Wasser übt auf die Oberfläche Deines Körpers eine gewisse Reibung aus. Wenn Du daher weder Deinen Schwanz noch Deine Flüssen bewegen würdest, wärst Du nicht imstande, Dich auch nur im geringsten fortzubewegen. Da sich zudem der Wasserdruck mit der Tiefe ändert, kannst Du durch Expansion oder Kontraktion Deines Körpers aufsteigen beziehungsweise sinken. Wenn es im Wasser weder Reibung noch Druck gäbe, wärst Du hilflos wie ein Astronaut, dem der Treibstoff für seine Rakete ausgegangen ist. Mein Ozean dagegen, der sich aus Elektronen negativer Massen zusammensetzt, ist völlig reibungslos und daher nicht beobachtbar. Nur das Feilen eines der Elektronen lässt sich mit physikalischen Instrumenten feststellen, da das Fehlen einer negativen elektrischen Ladung

ja gleichbedeutend mit dem Vorhandensein einer positiven ist, wovon sich übrigens sogar Coulomb schon überzeugen konnte.
Um es in unserer Analogie nicht zu weit zu treiben, müssen wir bei unserem Vergleich zwischen gewöhnlichem und Elektronenozean doch auf die folgende wichtige Abweichung hinweisen- Da die Elektronen meines Ozeans ja dem Pauli-Prinzip gehorchen, kann dem Ozean, wenn alle möglichen Quantenniveaus besetzt sind, kein einziges weiteres Elektron mehr hinzugefügt werden. Dieses Elektron müsste dann oberhalb der Oberfläche des Ozeans bleiben und die Experimentalphysiker könnten es leicht identifizieren. Um solche überschüssigen Elektronen handelt es sich etwa bei jenen Elektronen, die Sir J.j. Thomson entdeckte; auch die Elektronen, die den Atomkern umkreisen oder Vakuumröhren durchfliegen, zählen dazu. Bis zur Veröffentlichung meines ersten Aufsatzes im Jahre 1930 war man der Überzeugung, physikalische Realität gäbe es nur bei den gelegentlichen Spritzern über das Niveau der Nullpunktenergie; den Rest des Universums hielt man für leer."
"Aber Du sagst doch," wandte der Delphin ein, "Dein Ozean sei kontinuierlich und reibungsfrei und könne deshalb nicht beobachtet werden. Welchen Sinn hat es dann, über ihn zu reden?"
"Nun~~, sagte P.A.M., "nehmen wir einmal an, irgendeine überirdische Kraft hole eines von den Elektronen mit negativer Masse aus den Tiefen des Ozeans über die Oberfläche hinauf. In einem solchen Fall würde sich die Zahl der beobachtbaren Elektronen um eins vermehren und man würde dies als eine Verletzung des Satzes von der Erhaltung der Energie betrachten. Andererseits wäre dann das nunmehr leere Loch im Ozean beobachtbar, da das Fehlen von negativer Ladung bei sonst gleichförmiger Verteilung als Vorhandensein eines gleich großen Betrags an positiver Ladung bemerkt wird.
Dieses positiv geladene Teilchen würde dann auch positive Masse besitzen und sich in dieselbe Richtung bewegen, in die die Gravitationskraft wirkt."
"Du meinst, es würde emporsteigen anstatt zu sinken?" fragte der Delphin verwundert.
"Gewiss. Ich bin sicher, Du hast schon viele Gegenstände zu Boden sinken gesehen, weil sie von der Schwerkraft hinabgezogen wurden; beispielsweise Dinge, die man von Schiffen über Bord warf, und manchmal vielleicht auch die Schiffe selbst. Aber schau doch, dort!" unterbrach P.A.M. seine Rede, "Siehst Du diese kleinen, silbrigen Dinger, die zur Oberfläche emporsteigen? Ihre Bewegung ist durch die Schwerkraft verursacht, doch bewegen sie sich in entgegengesetzte Richtung."
‚Aber das sind doch nur Luftblasen", erwiderte der Delphin. "Wahrscheinlich strömen sie aus einem mit Luft gefüllten Behälter aus, der umkippte oder auf den felsigen Meeresboden aufschlug."
"Gar nicht schlecht. Im Vakuum würdest Du allerdings keine Luftblasen aufsteigen sehen. Folglich ist auch mein Ozean nicht leer."
"Sehr gescheit, Deine Theorie", nickte der Delphin.
"Ob sie auch wahr ist?"
"Als ich sie 1930 vorlegte", sagte P.A.M. "hat sich niemand darum gekümmert. Zu einem guten Teil war dies meine eigene Schuld, da ich ursprünglich der Meinung war, dass es sich bei diesen positiv geladenen Teilchen um Protonen handeln müsse, die den Experimentalphysikern ja gut bekannt sind. Sicherlich weißt Du, dass Protonen 1840 mal schwerer als Elektronen sind. Ich hoffte aber, diesen erhöhten Beschleunigungswiderstand,

den sie unter der Wirkung einer gegebenen Kraft zeigten, mittels eines mathematischen Tricks erklären zu können und die Zahl 1840 somit auf theoretischem Wege zu erhalten. Doch dies gelang nicht. Die träge Masse der Luftblasen meines Ozeans erwies sich nämlich als genau so groß wie die Masse eines gewöhnlichen Elektrons. Mein Kollege Pauli, dem ich ohne Zweifel Sinn für Humor zugestehen muss, rannte umher und verkündete, das, wie er es nannte, ‚Zweite Pauli-Prinzip' gefunden zu haben. Wie Du siehst, rechnete er damit, dass ein gewöhnliches Elektron ein durch Entfernen eines Elektrons aus meinem Ozean entstandenes Loch, sofern es in seine Nähe kommt, innerhalb kürzester Zeit auffüllen werde. Wenn also das Proton eines Wasserstoffatoms wirklich ein Loch' ist, dann würde dieses unverzüglich aufgefüllt und beide Teilchen würden sich dabei in einen Lichtblitz - oder richtiger-. in einen Gamma-Strahlen-Blitz - auflösen. Dasselbe würde natürlich auch mit den Atomen aller anderen Elemente geschehen. Das Zweite Pauli-Prinzip verlangt nun, dass jede von einem Physiker vorgelegte Theorie auch auf die Materliedes eigenen Körpers unmittelbar anzuwenden sei. Woraus sich in unserem Fall ergibt, dass ich mich in Nichts auflösen würde, noch bevor ich die Möglichkeit hätte, meine Idee sonst jemandem vorzutragen. Zum Beispiel so!" Und P.A.M. verlor sich in einem gleißenden Blitzstrahl.

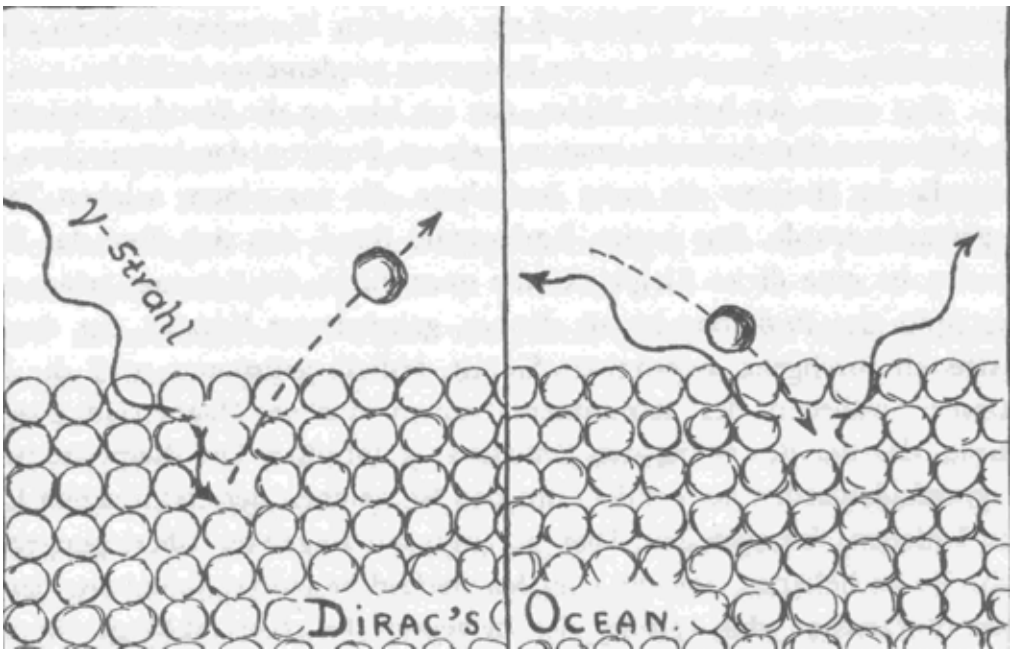
"Sir", hörte da Mr. Tompkins eine verärgerte Stimme an seinem Ohr. "Es ist Ihr gutes Recht, während des Vortrags zu schlafen, schnarchen jedoch sollten Sie hier nicht. Ich kann kein Wort von dem verstehen, was der Professor sagt."

Als Mr. Tompkins seine Augen auftat, sah er sich wieder im dicht gefüllten Hörsaal und vernahm, wie der alte Professor eben fortfuhr:

Wir wollen nun verfolgen, was geschieht, wenn ein wanderndes Loch auf ein überschüssiges Elektron trifft, das sich gerade auf der Suche nach einem gemütlichen Plätzchen im Diracschen Ozean befindet. Es ist klar, dass das überschüssige Elektron als Resultat einer solchen Begegnung unweigerlich in das Loch fallen und dieses ausfüllen wird. Der staunende Physiker wird diese Erscheinung als die wechselseitige Vernichtung eines positiven und eines negativen Elektrons registrieren. Die dabei freigesetzte Energie wird in Form kurzwelliger Strahlung emittiert. Diese Strahlung wird das einzige sein, was von den beiden Elektronen übrigbleibt, die sich gegenseitig auffressen, wie die beiden Wölfe in der allseits bekannten Kindergeschichte.

Man könnte sich den Vorgang aber auch umgekehrt denken: Ein aus einem negativen und aus einem positiven Elektron bestehendes Paar wird durch die Wirkung einer äußeren Strahlung "aus dem Nichts erzeugt". Die Diracsche Theorie betrachtet einen solchen Vorgang einfach hin als Ausschluss eines Elektrons aus der gleichförmigen Verteilung, die keineswegs als "Zeugung", sondern vielmehr als Trennung von zwei entgegengesetzt gerichteten elektrischen Ladungen angesehen werden sollte. Auf meiner Zeichnung hier werden diese beiden Prozesse der "Zeugung" und "Vernichtung" elektrischer Ladung grob schematisiert dargestellt. Sie sehen, dass an der Sache nichts Geheimnisvolles ist. Hinzuzufügen ist an dieser Stelle, dass die Paarzeugung im absoluten Vakuum zwar streng genommen möglich, dass aber die Wahrscheinlichkeit dafür äußerst gering ist. Man kann sagen: die Elektronenverteilung des Vakuums ist zu geschmeidig, als dass sie aufgebrochen werden könnte. Andererseits wird in Gegenwart schwerer Teilchen, die den in die Elektronenverteilung eindringenden Gammastrahlen als Stützpunkt dienen, die Wahrscheinlichkeit für eine Paarzeugung um vieles größer und diese kann daher leicht beobachtet werden.

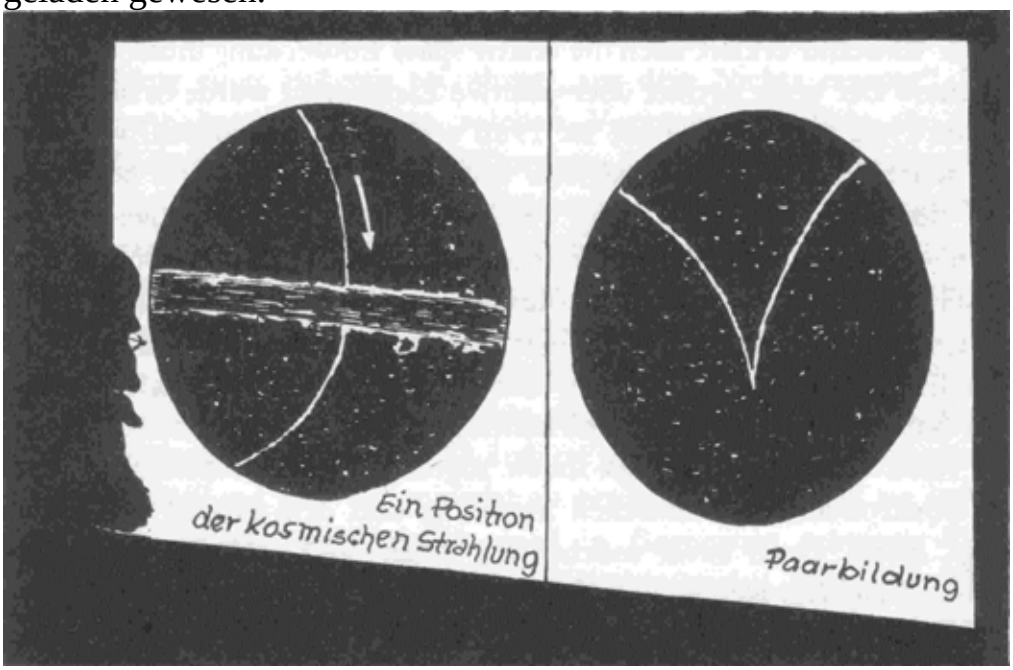
Es ist jedoch klar, dass die auf die eben besprochene Weise erzeugten Positionen keine sehr lange Lebensdauer haben. Begegnen sie nämlich einem der negativen Elektronen, die in unserem Winkel des Universums ja ein zahlenmäßig beträchtliches Übergewicht haben, werden sie sofort vernichtet



Erzeugung eines Paars Vernichtung eines Paars

. Dieser Umstand erklärt auch die relativ späte Entdeckung dieser interessanten Teilchen. Der erste Artikel über positive Elektronen wurde in der Tat erst im August 1932 (Diracs Theorie ist 1930 veröffentlicht worden) von dem kalifornischen Physiker Carl Anderson verfasst. Dieser entdeckte bei seinen Studien der kosmischen Strahlung Teilchen, die- in all ihren Eigenschaften gewöhnlichen Elektronen ähnelten, abgesehen vom wichtigen Unterschied, dass sie statt negativer elektrischer Ladung positive trugen. Bald darauf fanden wir ein einfaches Verfahren, Elektronenpaare unter Laborbedingungen zu erzeugen: indem wir einen kräftigen Strahl hoch frequenter Strahlung (radioaktiver Gammastrahlen) durch eine beliebige materielle Substanz schickten.
Das nächste Bild zeigt Ihnen sogenannte "Nebelkammeraufnahmen" von Positionen der kosmischen Strahlung und dem Prozess der "Paarerzeugung" selbst. Doch zuvor möchte ich Ihnen noch erklären, wie man solche Fotos erhält. Die Nebel- oder Wilsonkammer ist eines der nützlichsten Instrumente der modernen Experimentalphysik. Sie basiert auf dem Umstand, dass jedes elektrisch geladene Teilchen, das sich durch ein Gas bewegt, auf seiner Spur einergroße Anzahl Ionen erzeugt. Ist das Gas nun mit Wasserdampf gesättigt, kondensieren an diesen Ionen winzige Wassertröpfchen und bilden so eine dünne Nebelschicht, die sich über die ganze Spur erstreckt. Beleuchtet man dieses Nebelband vor dunklem Hintergrund, dann erhalten wir perfekte, alle Einzelheiten der Bewegung wiedergebende Bilder.
Das erste der beiden Bilder, das ich hier an die Wand projiziert habe, ist Andersons Originalaufnahme von einem Position der kosmischen Strahlung. Es ist übrigens die erste Aufnahme, die von einem solchen Teilchen je gemacht wurde. Das breite, horizontale Band, das sich über das Bild erstreckt, ist eine dicke Bleiplatte, die quer durch die Kammer gelegt

wurde. Die Spur des Positrons ist als dünner, gekrümmter Kratzer, der durch die Platte hindurchgeht, erkennbar. Sie ist deshalb gekrümmt, weil die Nebelkammer während des Experiments einem starken Magnetfeld ausgesetzt wurde, das die Bewegung des Teilchens beeinflusste. Die Bleiplatte und das Magnetfeld wurden verwendet, um das Vorzeichen der elektrischen Ladung des Teilchens festzustellen. Dies ist aufgrund folgender Überlegungen möglich: Es ist bekannt, dass die vom Magnetfeld bewirkte Ablenkung der Bahn vom Vorzeichen der Ladung des bewegten Teilchens abhängt. In diesem besonderen Fall wurde der Magnet so angebracht, dass negative Elektronen aus ihrer ursprünglichen Bewegungsrichtung nach links, positive Elektronen nach rechts abgelenkt werden mussten. Hätte sich daher das Teilchen auf unserem Bild nach oben bewegt, dann wäre es negativ geladen gewesen.



Ein Positron in der kosmischen Strahlung und der Vorgang der Paarerzeugung.

Aber wie konnte man feststellen, in welche Richtung es sich bewegen würde? Hier kommt die Bleiplatte ins Spiel. Nach Durchquerung der Platte musste das Teilchen etwas von seiner ursprünglichen Energie verloren haben und der Ablenkungseffekt des Magnetfeldes daher entsprechend größer sein. Auf unserer Photographie ist die Spur unterhalb der Platte stärker gekrümmt. (Auf den ersten Blick kann man das kaum erkennen, aber es lässt sich mit Hilfe von Messungen überprüfen.) Folglich bewegte sich das Teilchen nach unten und seine Ladung war positiv.

Die andere Aufnahme wurde von James Cbadwick an der Universität Cambridge gemacht und zeigt den Vorgang der Paarerzeugung in der Luft der Nebelkammer.

Ein starker, von unten kommender Gammastrahl, der keine sichtbare Spur auf dem Film hinterließ, erzeugte in der Mitte der Kammer ein Elektronenpaar. Die beiden Teilchen wurden infolge des starken Magnetfeldes in entgegengesetzte Richtungen abgelenkt und flogen auseinander. Bei Betrachtung der Photographie werden Sie sich vielleicht wundern, warum das Position (also das linke Teilchen) auf seinem Weg durch das Gas nicht vernichtet wurde. Auch die Beantwortung dieser Frage ergibt sich aus der Diracschen Theorie und wird von jedermann, der Golf spielt, leicht verstanden werden. Wenn man dem auf dem Rasen liegenden Ball einen zu kräftigen Schlag erteilt, wird er, selbst wenn man richtig gezielt hat,

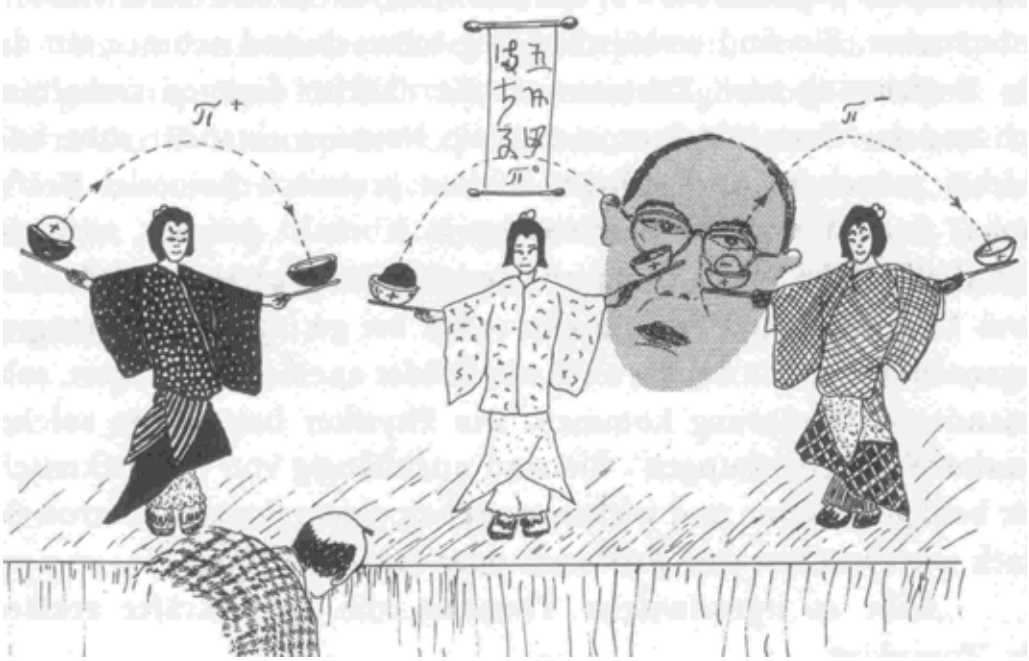
nicht ins Loch rollen. Ein sehr schneller Ball wird in diesem Fall einfach über das Loch springen und weiterrollen. Genauso wird auch ein schnelles Diracsches Elektron nicht in das Diracsche Loch fallen, solange seine Geschwindigkeit nicht beträchtlich herabgesetzt wird. Daher kann ein Position eher am Ende seiner Bahn, wo es durch Zusammenstöße langsamer geworden ist, vernichtet werden. Und tatsächlich ergaben sorgfältige Beobachtungen, dass die jeden Vernichtungsprozess begleitende Strahlung nachweislich erst am Ende der Bahn des Positrons auftritt. Auch das bestätigt neuerlich die Richtigkeit der Diracschen Theorie.
Zwei allgemeine Fragen sind nun noch zu erörtern. Erstens: Bisher habe ich von Elektronen als den Überflutungen des Diracschen Ozeans und von Positionen als den Löchern in diesem Ozean gesprochen. Man kann den Standpunkt jedoch auch umkehren und die gewöhnlichen Elektronen als Löcher betrachten und damit den Positionen die Rolle der hinausgeworfenen Teilchen zuweisen. Zu diesem Zweck müssen wir bloß annehmen, dass der Diracsche Ozean nicht überläuft, sondern, dass in ihm im Gegenteil stets ein Mangel an Teilchen herrscht. In diesem Fall können wir die Diracverteilung mit einem Stück Schweizer Käse vergleichen, der von vielen Löchern durch setzt ist. Wegen des allgemeinen Teilchenmangels werden stets Löcher vorhanden sein; wenn also eines der Teilchen aus der Verteilung hinausgeworfen wird, wird es bald darauf wieder in eins der Löcher zurückfallen. In diesem Zusammenhang ist festzuhalten, dass beide Darstellungen sowohl physikalisch als auch mathematisch gesehen völlig gleichwertig sind. Daher ist es in der Tat völlig einerlei, für welche von beiden wir uns entscheiden.
Unsere zweite Frage kann folgendermaßen formuliert werden-. Wenn in dem Teil des Alls, in dem wir leben, ein eindeutiges Übergewicht an negativen Elektronen herrscht, müssen wir dann annehmen, dass es in anderen Teilen des Universums umgekehrt ist? Mit anderen Worten: Werden die Oberflutungen des Diracschen Ozeans irgendwo in unserer Nachbarschaft durch einen Mangel an entsprechenden Teilchen kompensiert?
Diese außerordentlich interessante Frage ist sehr schwer zu beantworten. Da nämlich Atome mit positiven Elektronen, die um einen negativen Kern kreisen, genau dieselben optischen Eigenschaften wie gewöhnliche Atome besitzen, ist es unmöglich, diese Frage mit Hilfe spektroskopischer Untersuchungen zu entscheiden. Nach allem, was wir wissen, ist es durchaus möglich, dass zum Beispiel der Große Andromedanebel aus solcher Antimaterie besteht. Aber die einzige Möglichkeit, dies festzustellen, wäre, eines solchen Materiestückes habhaft zu werden und zu prüfen, ob es beim Kontakt mit irdischer Materie vernichtet würde. Die Explosion, die so entstünde, wäre natürlich gewaltig. Erst kürzlich hat man die Möglichkeit erwogen, ob Meteoriten, die an der Erdatmosphäre explodieren, aus Antimaterie bestehen. Doch meine ich, man sollte dem nicht zuviel Bedeutung beimessen. Es ist nämlich sehr leicht möglich, dass die Frage, wo in den verschiedenen Teilen des Universums Überschuss und wo Mangel im Diracschen Ozean herrscht, auf ewig unbeantwortet bleibt.

15 Mr. Tompkins speist japanisch

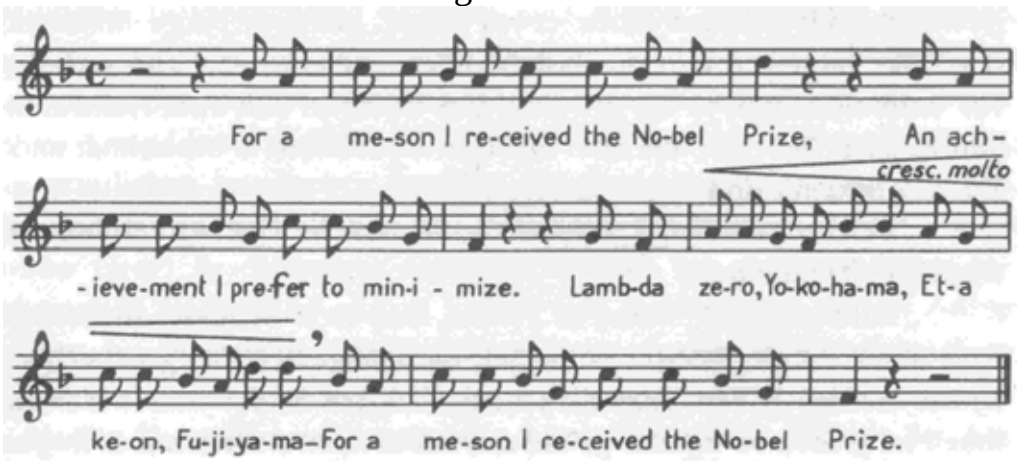
An einem Wochenende, an dem Maud zu ihrer Tante nach Yorkshire gefahren war, lud Mr. Tompkins den Professor zum Dinner ins berühmte Sukiyaki- Restaurant ein. Sie saßen auf weichen Kissen an einem niedrigen Tischchen, nippten aus kleinen Tassen an ihrem Saki und erfreuten sich an den vielfältigen Delikatessen der japanischen Küche.
"Übrigens", begann Mr. Tompkins, "neulich hörte ich Dr. Tallerkin in seinem Vortrag sagen,

dass Protonen und Neutronen im Kern durch bestimmte nukleare Kräfte zusammengehalten werden. Sind das dieselben Kräfte, die Elektronen an ein Atom binden?"
"Keineswegs", erwiderte der Professor. "Kernkräfte sind etwas ganz anderes. Atomare Elektronen werden vom Kern durch gewöhnliche elektrostatische Kräfte angezogen, die der französische Physiker Charles Augustin de Coulomb gegen Ende des achtzehnten Jahrhunderts zum ersten Mal genau untersuchte. Sie sind verhältnismäßig schwach und nehmen mit dem Quadrat der Entfernung vom Zentrum ab. Kernkräfte dagegen verhalten sich gänzlich anders. Wenn ein Proton und ein Neutron einander nahe kommen, sich hierbei jedoch nicht berühren, wirken praktisch keinerlei Kräfte zwischen ihnen. Sobald sie aber miteinander in Kontakt geraten, tritt eine außergewöhnlich starke Kraft in Erscheinung, die sie zusammenhält. Es ist wie bei zwei Leukoplaststreifen, die sich selbst bei geringer Entfernung voneinander gegenseitig nicht anziehen, aber wie Brüder aneinander hängen, sobald sie miteinander in Berührung kommen. Die Physiker bezeichnen solche Kräfte als ‚starke Wechselwirkungen'. Sie sind unabhängig von der elektrischen Ladung der beiden Teilchen und wirken zwischen einem Proton-Neutron-Paar genauso stark wie zwischen zwei Protonen oder zwei Neutronen."
"Gibt es irgendwelche Theorien, die diese Kräfte erklären?" fragte Mr. Tompkins.
"Doch. In den frühen Dreißigerjahren machte Hydekai Yukawa den Vorschlag, diese Kräfte auf den Austausch bisher noch unbekannter Teilchen zwischen den Nukleonen zurückzuführen; unter Nukleonen versteht man Protonen und Neutronen. Sobald zwei Nukleonen einander nahe kommen, beginnen diese geheimnisvollen Teilchen zwischen ihnen hin- und her zuspringen. Dies führt zu einer starken Bindungskraft, die die Teilchen zusammenhält. Yukawa gelang es, auf theoretischem Wege die Masse dieser Teilchen abzuschätzen. Er erhielt einen Wert, der ungefähr zweihundertmal größer war als die Masse eines Elektrons beziehungsweise etwa zehnmal geringer als die Masse eines Protons oder Neutrons. Deshalb nannte man sie ‚Mesotronen'. Gegen diese Verletzung der griechischen Sprache erhob allerdings der Vater Werner Heisenbergs, ein Professor für klassische Philologie, Einspruch. Die Bezeichnung Elektron' leitet sich nämlich vom griechischen 17XeKrpov, her, was soviel wie Bernstein heißt, während Proton' vom griechischen irpc3rov kommt, das erstes bedeutet. Die Bezeichnung des Yukawa-Teilchens hingegen geht auf das griechische Memov zurück, das in der Mitte heißt und kein r enthält. Heisenberg schlug daher auf einer internationalen Physikertagung vor, den Namen Mesotron in Meson' umzuändern. Einige französische Physiker protestierten, weil Meson, wie immer man es schreiben mag, wie Maisohn klingt, also wie das französische Wort für Heim oder Haus. Sie wurden jedoch überstimmt. Der Ausdruck Meson hat sich inzwischen eingebürgert. Doch halt, schau auf die Bühne! Soeben beginnt die Mesonen-Show! "

Die Geishas führten ein unübliches Ballspiel vor.



Und in der Tat: Sechs Geishas betraten die Bühne und begannen einen Tanz vorzuführen, bei dem sie einen Ball zwischen zwei Schalen, die sie rechts und links in ihren Händen hielten, hin- und herwarfen. Im Hintergrund erschien das Gesicht eines Mannes, der sang.



For a meson 1 received the Nobel Prize,
An achievement 1 prefer to minimize.
Lambda zero, Yokohama, Eat keno, Fujiyama
For a meson 1 received the Nobel Prize.
They proposed to call it Yukon in Japan.
1 demurred, for I’m a very modest man. Lambda zero, Yokohama, Eat keno, Fujiyama
They proposed to ell it Yukon in Japan.

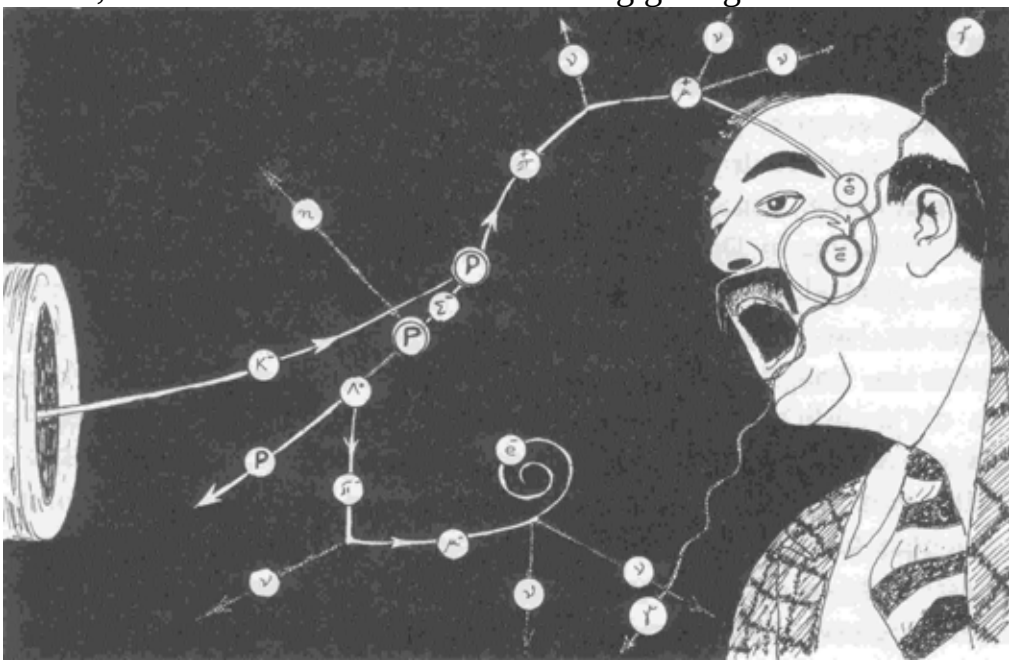
"Warum sind es denn drei Geishapaare?" fragte Mr. Tompkins.
"Sie stellen drei Möglichkeiten des Mesonenaustauschs dar", antwortete der Professor. "Es dürfte nämlich drei Arten von Mesonen geben: positiv und negativ geladene sowie elektrisch neutrale. Alle drei von ihnen könnten an der Entstehung von Kernkräften beteiligt sein."
"Dann gibt es also acht Elementarteilchen", sagte Mr. Tompkins und zählte an den Fingern mit, "Neutronen, Protonen (positive und negative), negative und positive Elektronen und die drei Arten von Mesonen. "

"Oho!" sagte der Professor, "Nicht acht, eher gegen achtzig. Zunächst hat man herausgefunden, dass es zwei Arten von Mesonen gibt- die schweren und die leichten Mesonen, die mit den griechischen Buchstaben π und μ bezeichnet werden und Pinnen und Myonen heißen. Pinnen werden am Atmosphärenrand erzeugt, wo hochenergetische Protonen auf die Atomkerne der Luft stoßen. Doch sie sind sehr instabil und zerfallen, noch bevor sie die Erdoberfläche erreichen, in Myonen und Neutrinos, die geheimnisvollsten unter allen Teilchen, die weder Masse noch Ladung besitzen und reine Energieträger sind. Myonen leben etwas länger, nämlich einige Mikrosekunden lang. Sie vermögen also die Erdoberfläche zu erreichen und zerfallen hier, vor unseren Augen, in ein gewöhnliches Elektron und zwei Neutrinos. Dann gibt es auch Teilchen, die man mit dem Buchstaben K bezeichnet und die als Klonen bekannt sind."
"Welche Arten von Teilchen benutzten die Geishas bei ihrem Spiel?" fragte Mr. Tompkins.
"Wahrscheinlich waren es Pinnen, und zwar neutrale, also die wichtigsten unter ihnen. Allerdings bin ich diesbezüglich nicht ganz sicher. Heutzutage werden ja fast monatlich neue Teilchen entdeckt. Die Mehrzahl von ihnen ist jedoch so kurzlebig, dass sie, selbst wenn sie sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, schon wenige Zentimeter von ihrem Entstehungsort entfernt zerfallen. Auch die technischen Geräte, die man mit Hilfe von Ballons in die Atmosphäre befördert, können sie nicht mehr registrieren.
Allerdings besitzen wir heute äußerst leistungsfähige Teilchenbeschleuniger, die Protonen auf so hohe Energien beschleunigen, wie sie sonst nur in kosmischen Strahlen auftreten, nämlich auf viele tausend Millionen Elektronenvolt. Eine dieser Maschinen, das sogenannte Lawrencetron, befindet sich in unserer Nähe, auf dem Hügel da oben. Wenn Du willst, zeige ich es Dir."
Eine kurze Autofahrt brachte sie zu einem riesigen Gebäudekomplex, in dem der Teilchenbeschleuniger untergebracht war. Gleich beim Betreten des Baus zeigte sich Mr. Tompkins von der Komplexität der Anlage sehr beeindruckt. Der Professor versicherte ihm jedoch, dass das Ganze im Prinzip nicht komplizierter sei als die Schleuder, mit der David Goliath tötete. Die geladenen Teilchen wurden in das Zentrum der riesigen Trommel eingeschossen. Von dort aus bewegten sie sich auf spiralförmigen Bahnen weiter, wobei sie durch wechselnde elektrische Impulse beschleunigt und durch ein starkes Magnetfeld in ihrer Bahn gehalten wurden.
"Ich glaube, etwas ähnliches habe ich vor etlichen Jahren irgendwo schon einmal gesehen", sagte Mr. Tompkins.
"Richtig", sagte der Professor, "die Maschine, die Du damals gesehen hast, wurde erstmals von Dr. Lawrence entwickelt. Die, die Du hier siehst, beruht auf demselben Prinzip, doch kann sie die Teilchen nicht nur auf einige Millionen Volt, sondern auf mehrere tausend Millionen Volt beschleunigen. Erst kürzlich wurden zwei Anlagen dieser Art in den Vereinigten Staaten gebaut. Eine davon befindet sich in Berkeley, Kalifornien. Man nennt sie das Betatron, da sie Teilchen mit Energien von Billionen Elektronenvolt erzeugt. Es handelt sich beim Ausdruck Billion um einen rein amerikanischen Wortgebrauch, denn in Amerika hat eine Billion' tausend Millionen, das ist eine Milliarde. In Deutschland bedeutet eine, Billion' eine Million Millionen, einen Wert also, den im guten alten Europa noch nie jemand anzupeilen versucht hat. Ein anderer amerikanischer Teilchenbeschleuniger (in Brookhaven in Long Island) nennt sich Cosmotron, was etwas übertrieben ist, da die natürlichen kosmischen Strahlen oft weit höhere Energien besitzen, als das Cosmotron sie

liefern kann. In Europa hat man im CERN (in der Nähe von Genf) Beschleuniger errichtet, die mit den amerikanischen vergleichbar sind. In Russland gibt es unweit von Moskau eine weitere Anlage dieser Art. In eingeweihten Kreisen bezeichnet man sie als Chruschtschowtron, doch vermutlich wird man sie jetzt auf Breschnjewtron umbenennen."
Als Mr. Tompkins sich umwandte, entdeckte er eine Tür mit der Aufschrift-.

ALVAREZ'FLÜSSIGER WASSERSTOFF
BADEANSTALT

"Was ist denn das da drüben?" fragte er.
"Ach so!" sagte der Professor. "Nun, das Lawrencetron hier erzeugt bei immer größer werdenden Energien eine immer größere Zahl verschiedenartiger Elementarteilchen. Man analysiert sie, indem man ihre Bahnen beobachtet und Masse, Lebenszeit, Wechselwirkungen sowie viele andere Eigenschaften (z. B. Strangeness, Parität usw.) bestimmt. Früher verwendete man hierzu die sogenannte Nebelkammer. Ihr Erfinder, C.T. Wilson, erhielt dafür 1927 den Nobelpreis. Damals wurden die zu untersuchenden schnellen elektrisch geladenen Teilchen, deren Energie einige Millionen Elektronenvolt betrug, durch eine mit einer Glasplatte abgeschlossene Kammer geschickt, die mit Wasserdampf nahezu gesättigte Luft enthielt. Sobald man den Boden der Kammer ruckartig nach unten stieß, kühlte die darin enthaltene Luft infolge der Expansion ab, wodurch der Wasserdampf übersättigt wurde. Ein Teil des Dampfes musste daher zu winzigen Wassertröpfchen kondensieren. Wilson entdeckte, dass eine solche Kondensation von Wasserdampf zu Wasser besonders rasch an Ionen, also elektrisch geladenen Gasteilchen, erfolgte. Nun ist aber das Gas entlang der Bahnen der elektrisch geladenen Geschosse, die die Kammer durchqueren, ionisiert. Daher wurden die Nebelstreifen, die von einer an der Seite der Kammer angebrachten Lichtquelle beleuchtet wurden, vor dem schwarz bemalten Boden der Kammer sichtbar. Erinnere Dich an die
Bilder, die ich bei meinem letzten Vortrag gezeigt habe.

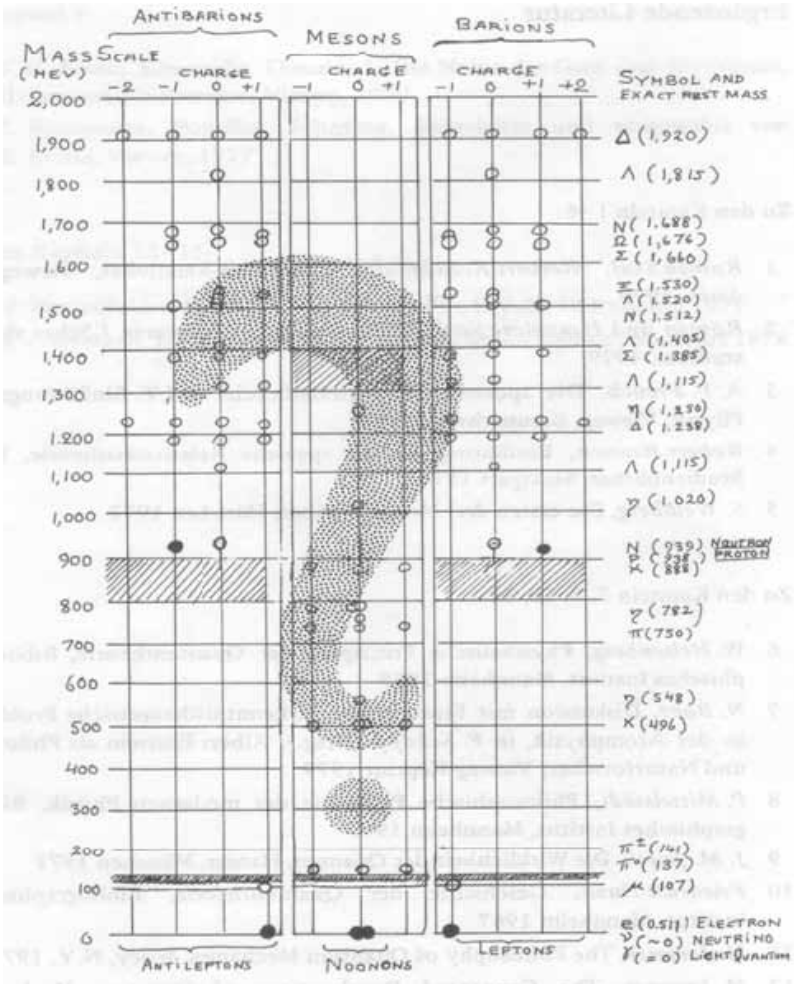


Die Teilcben vermehrten sich wie die Hasen.

Im Falle der kosmischen Strahlung, bei der die Energien der Teilchen tausendfach größer sind als die vorher genannten, ist die Situation allerdings verschieden: die Spuren der Teilchen sind nämlich so lang, dass die Nebelkammer zu klein wird, als dass man ihren Weg

vom Anfang bis zum Ende verfolgen könnte. Mit der Nebelkammer ließ sich also nur ein kleiner Ausschnitt aus dem Gesamtbild beobachten.
Einen guten Schritt weiter kam in jüngster Zeit der junge amerikanische Physiker Donald A. Glaser, wofür er 1960 auch den Nobelpreis erhielt. Wie er erzählte, saß er einst missmutig gestimmt in einer Bar und starrte auf die Bläschen, die in dem vor ihm stehenden Glas Bier aufstiegen. Wenn - schoss es ihm da plötzlich durch den Kopf - C.T.R. Wilson Flüssigkeitströpfchen in Gas untersuchen konnte, warum soll ich nicht einen Schritt weitergehen und Gasbläschen in Flüssigkeit untersuchen? Ich möchte hier nicht", fuhr der Professor fort, "von den technischen Details und den Schwierigkeiten reden, die mit der Konstruktion einer entsprechenden Anlage zusammenhängen; es würde wohl auch ein bisschen über Deinen Horizont gehen. Jedenfalls kam es darauf hinaus, dass, sollte das Ganze funktionieren, die Flüssigkeit in der sogenannten Blasenkammer flüssiger Wasserstoff sein musste, dessen Temperatur etwa bei zweihundertfünfzig Grad Celsius unter dem Gefrierpunkt lag. Im Raum nebenan befindet sich ein großer, von Louis Alvarez konstruierter Behälter, der mit flüssigem Wasserstoff gefüllt ist; man nennt ihn gern Alvarezsche Badewanne'."
" Br, das ist mir aber etwas zu kalt!" rief Mr. Tompkins.
"So? Du brauchst ja nicht hineinzusteigen. Du kannst Dich damit begnügen, die Teilchenbahnen durch die transparenten Wände hindurch zu beobachten. "
Die Badewanne war, wie immer, in Betrieb, und die um sie herum postierten, mit Blitzlicht ausgestatteten Kameras nahmen eine kontinuierliche Folge von Schnappschüssen auf. Die Wanne befand sich zwischen den Polen eines großen Elektromagneten, der die Teilchen ablenkte, woraus sich dann die Geschwindigkeit ihrer Bewegung abschätzen ließ.
"Für die Herstellung eines Bildes braucht man nur wenige Minuten", erklärte Alvarez. "Das ergibt pro Tag mehrere hundert Bilder, vorausgesetzt, die Apparatur funktioniert und ist nicht gerade in Reparatur. Jede Photographie muss sorgfältig geprüft, jede Spur analysiert und deren Krümmung genau ausgemessen werden. Das kann einige Minuten, aber auch eine Stunde dauern, je nachdem, wie interessant das Bild und wie flink das Mädchen ist, das es auswertet. "
"Warum sprechen Sie von Mädchen-, unterbrach ihn Mr. Tompkins. "ist denn das eine Beschäftigung nur für Frauen?"
"Aber nein", sagte Alvarez, "viele dieser Mädchen sind in Wirklichkeit Burschen. Doch bei dieser Art von Beschäftigung benutzt man das Wort Mädchen ohne Rücksicht auf das Geschlecht, einfach hin als Ausdruck für Leistung und Präzision. Wenn ein Brite typist' oder secretary' sagt, denkt er schließlich auch an eine Frau und nicht an einen Mann. Wie dem auch sei: Um alle in unseren Laboratorien gemachten Aufnahmen an Ort und Stelle zu analysieren, würden wir Hunderte von Mädchen benötigen, was ein Problem wäre. Deshalb senden wir viele unserer Photographien an andere Universitäten, die zwar nicht das Geld haben, sich Lawrencetrons und Bläschenkammern zu bauen, sich aber doch die technische Ausrüstung für die Analyse unserer Photos leisten können."
"Seid ihr die einzige Stelle, die so etwas macht?" fragte Mr. Tompkins.
"Ach wo! Ähnliche Anlagen gibt es im Brookhaven National Laboratory auf Long Island im Staate New York; im CERN (Corporation Europenne de Recherche Nuclaire) bei Genf in der Schweiz und im Shchelkunchik (Nussknacker)-Laboratorium in der Nähe von Moskau in Russland. Sie alle suchen nach einer Stecknadel im Heuhaufen und, bei Gott - sie finden

sogar hin und wieder eine!"
"Aber warum tut man sich denn dies alles an?" fragte Mr. Tompkins verwundert. "Um neue Elementarteilchen zu finden (eine Aufgabe übrigens, die schwieriger ist, als eine Nadel in einem Heuhaufen zu entdecken) und um die Wechselwirkung zwischen ihnen zu untersuchen. Hier an der Wand hängt eine Tabelle der Teilchen. Sie enthält schon jetzt mehr Teilchen, als es im Mendelejeffschen System Elemente gibt."
"Wieso nimmt man solch ungeheure Anstrengungen auf sich, bloß um weitere neue Teilchen zu finden?" fragte Mr. Tompkins.
"So ist die Wissenschaft eben", antwortete der Professor, der Versuch des menschlichen Geistes nämlich, alles um uns herum zu begreifen, mag es sich dabei um riesige Galaxien, mikroskopisch kleine Bakterien oder die soeben angesprochenen Elementarteilchen handeln. Es ist interessant und aufregend zugleich, darum machen wir es."
‚Aber dient denn der Fortschritt der Wissenschaft nicht eigentlich praktischen Zwecken? Er macht das Leben für den Menschen ja angenehmer und lebenswerter."
"Natürlich, das auch. Es steht jedoch erst an zweiter Stelle. Meinst Du wirklich, es sei Hauptzweck der Musik, Bläsern beizubringen, wie man Soldaten morgens weckt, sie zum Essen ruft oder in den Kampf schickt? Ein englisches Sprichwort lautet: Neugierde kostet so mancher Katze das Leben'. Dem setze ich hinzu. Neugierde erst ist’s, die einen zum Wissenschaftler machts- Und mit diesen Worten wünschte der Professor Mr. Tompkins gute Nacht.



Im Jahre 1964 war das System der Elementarteilchen noch komplizierter als das Periodensystem der Elemente! (Nach G.F. Chew, M. Gell-Mann and A.H. Rosenfeld, in Scientific American, Februar 1964)

Ergänzende Literatur:

Zu den Kapiteln 1–6:

1 *Roman Sexl, Herbert K. Schmidt*, Raum-Zeit-Relativität, vieweg studium, 1979
2 *Roman* und *Hannelore Sexl*, Weiße Zwerge – Schwarze Löcher vieweg studium, 1979
3 *A. P. French*, Die spezielle Relativitätstheorie, M.I.T. Einführungskurs Physik, Vieweg, Braunschweig 1971
4 *Robert Resnick*, Einführung in die spezielle Relativitätstheorie, Klett Studienbücher, Stuttgart 1976
5 *S. Weinberg*, Die ersten drei Minuten, Piper, München 1977

Zu den Kapiteln 7, 8, 10, 11:

6 *W. Heisenberg*, Physikalische Prinzipien der Quantentheorie, Bibliographisches Institut, Mannheim 1958
7 *N. Bohr*, Diskussion mit Einstein über erkenntnistheoretische Probleme in der Atomphysik, in *P. Schilpp* (Hrsg.), Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher, Vieweg Reprint 1979
8 *P. Mittelstädt*, Philosophische Probleme der modernen Physik, Bibliographisches Institut, Mannheim 19
9 *J. M. Jauch*, Die Wirklichkeit der Quanten, Hanser, München 1973
10 *Friedrich Hund*, Geschichte der Quantentheorie, Bibliographisches Institut, Mannheim 1967
11 *M. Jammer*, The Philosophy of Quantum Mechanics, Wiley, N.Y. 1974
12 *M. Jammer*, The Concepted Development of Quantum Mechanics, Mc Graw Hill, N.Y. 1966

Zu Kapitel 9:

13 *S. G. Brush*, Kinetische Theorie, I: Die Natur der Gase und der Wärme, II: Irreversible Prozesse, Vieweg, 1970
14 *L. Boltzmann*, Populäre Schriften, Eingeleitet und ausgewählt von *E. Broda*, Vieweg, 1979

Zu den Kapiteln 12–15:

15 *H. Frauenfelder, E. M. Henley*, Subatomare Physik, Oldenbourg 1979
16 *E. Lohrmann*, Hochenergiephysik, Teubner Studienbücher, Stuttgart 1978

„Die Abenteuer des Mr. Tompkins'

Ein Klassiker der Wissenschaftsliteratur

Es kommt nicht gerade häufig vor, daß erfolgreiche Wissenschaftler den Versuch unternehmen, die Erkenntnisse ihres Fachgebiets einem breiten Publikum darzulegen. Daß solche Versuche auch noch gelingen, ist die Ausnahme. Zu diesen seltenen Glücksfällen zählen ohne Zweifel die Bücher des Physikers George Gamow. Die vor 40 Jahren erschienenen Bände „Mr. Tompkins in Wonderland" und „Mr. Tompkins Explores the Atom" gehören zu den Klassikern der populären Wissenschaftsliteratur. Sie schildern auf amüsante Weise, wie sich der kleine Bankangestellte C. G. H. Tompkins mit den Erkenntnissen von Relativitätstheorie, Atomphysik und Kosmologie auseinandersetzt. In der verdienstvollen Reihe „Facetten der Physik" hat Roman Sexl diese Schriften Gamows wieder herausgebracht und, wo neue Erkenntnisse es nötig machten, ergänzt."

F.A.Z. vom 20.8.1980

ISSN 0937-8995

ISBN 5-528-08419-7