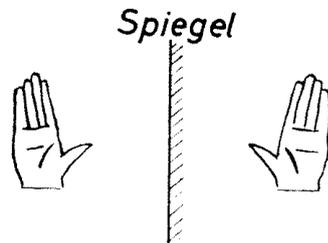


Rechts und Links in Welt und Anti-Welt

In diesem Vortrag *) möchte ich zunächst auf die Bedeutung der Unterscheidung von rechts und links für die physikalischen Naturgesetze eingehen. Danach werde ich erläutern, was man unter „Anti-Welt“ versteht und wie man zu diesem Begriff gekommen ist. Dabei wird es sich dann von selbst herausstellen, was die Unterscheidung von rechts und links mit der Anti-Welt zu tun hat.

Wie unterscheidet man rechts und links? Darüber gibt es viele scherzhafte Definitionen und manchem von Ihnen ist jetzt vielleicht die volkstümliche Redewendung eingefallen: „Rechts ist da, wo der Daumen links ist.“ In der Tat kann man mit Hilfe der Hände eine Unterscheidung von rechts und links erreichen, wenn man nämlich eine Methode angeben kann, mit der man das Bild einer rechten Hand in das Bild einer linken Hand überführen kann. Diese Methode ist sehr einfach, man braucht nämlich nur vom Bild der rechten Hand das Spiegelbild zu entwerfen (Figur 1). Mit einer Drehung



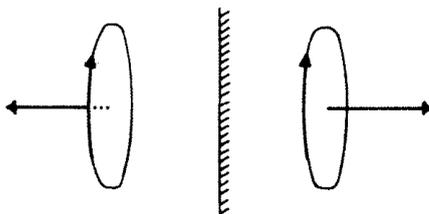
Figur 1

Das Bild einer rechten und einer linken Hand als Bild und Spiegelbild.

von 180° könnte man zwar auch die beiden Bilder zur Deckung bringen, jedoch würden dann die beiden Handflächen nicht in dieselbe Richtung zeigen. Die Methode der Spiegelung gibt uns ein Verfahren wie man rechts und links unterscheiden kann, jedoch haben wir damit — genau wie bei der eben zitierten volkstümlichen Redewendung — noch keine Definition, welches Bild wir als „rechtes“ und welches wir als „linkes“ ansehen wollen. Ich möchte es Ihnen überlassen, eine solche Definition zu finden. Sie werden sehr schnell feststellen, daß dies gar nicht so einfach ist. Im folgenden werde ich mich immer auf die viel einfachere Aufgabe beschränken, Rechts-Links-Unterschiede festzustellen. Dies will ich gleich an einem Beispiel tun, nämlich an einer Schraube. Diese ist ja gekennzeichnet durch einen Umdrehungssinn in Verbindung mit einer Fortschrittingsrichtung. Ich will hier den Umdrehungssinn, der entgegengesetzt dem Drehsinn eines Uhrzeigers — in Fortschrittingsrichtung

*) Öffentliche Antrittsvorlesung, gehalten am 26. Februar 1962.

gesehen — ist, als eine Rechtsschraube bezeichnen. Das Spiegelbild (Figur 2) einer Rechtsschraube ist eine Linksschraube. Es kommt

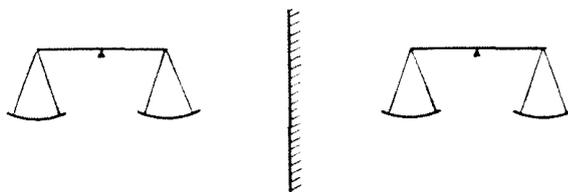


Figur 2
Rechts- und Linksschraube als Bild und Spiegelbild.

uns hier nur auf die Beziehung Bild — Spiegelbild für Rechts- und Linksschraube an. Wir hätten auch die Namensgebung vertauschen können *).

Nach diesen Vorbereitungen möchte ich nun die Folgerungen, die sich aus der Unterscheidung von rechts und links für die Physik ergeben, an Hand von konkreten Beispielen erläutern.

Das erste Beispiel stammt von dem Philosophen LEIBNIZ. Er hat sich mit der Frage beschäftigt, warum eine Waage im Gleichgewicht bleiben kann. Ich betrachte eine Waage mit vollkommen gleichen Waagebalken und Schalen (Figur 3). LEIBNIZ hat die Tatsache, daß



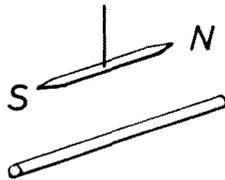
Figur 3
Schematische Darstellung einer Waage mit Spiegelbild.

eine solche Waage im Gleichgewicht verharrt, wenn sie mit gleichen Gewichten belastet wird, durch ein Prinzip zu erklären versucht, das „Prinzip vom zureichenden Grund“, in der Negation ausgesprochen, das „Prinzip des mangelnden Grundes“. Eben weil die Waage bei Beladung mit gleichen Gewichten keinen Grund hat auszuschlagen, tut sie es auch nicht. Vom physikalischen Standpunkt aus ist es völlig unnötig, ein besonderes Prinzip zu erfinden, um das Verhalten der Waage zu erklären. Die Physik der Waage ist höchst einfach. Sie befindet sich in einem homogenen Schwerfeld und bei gleichen Gewichten sind die an den Waagschalen angreifenden Schwerkräfte gleich, also bleibt die Waage in der Schwebe. Prinzipiell muß das natürlich nicht so sein, denn wenn wir uns die Waagebalken extrem

*) Der übliche Sprachgebrauch ist tatsächlich gerade umgekehrt.

verlängert denken, etwa auf einige tausend Kilometer, dann macht sich die Erdkrümmung bemerkbar und das Gravitationsfeld ist vielleicht nicht mehr homogen. Was uns nun besonders interessiert — und weswegen ich diese einfache Sache so ausführlich diskutiere — ist die Möglichkeit, mit der Waage rechts und links zu unterscheiden. Die Tatsache, daß die Waage im Gleichgewicht bleibt, habe ich ja dadurch erklärt, daß gleiche Kräfte an den Waagschalen angreifen. Gleich heißt jedoch, daß ich mir die Kräfte vertauscht denken darf, ohne daß sich dies bemerkbar macht. Und das heißt nun gerade, daß man mit einer solchen Waage rechts und links nicht unterscheiden kann, das Spiegelbild stimmt mit dem Bild überein (Figur 3). Man kann dies eine Rechts-Links-Symmetrie nennen. Ganz allgemein will ich einen physikalischen Gegenstand als rechts-links-symmetrisch bezeichnen, wenn ich mit seiner Hilfe rechts und links nicht unterscheiden kann.

Damit wende ich mich dem zweiten Beispiel zu, auf das von dem Philosophen und Physiker ERNST MACH hingewiesen wurde. Der physikalische Gegenstand ist eine Magnetnadel, die parallel zu einem Draht aufgehängt ist (Figur 4). Wenn wir in Richtung der Draht-



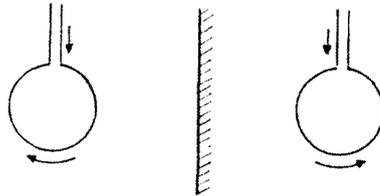
Figur 4

Eine Magnetnadel mit Nord- und Südpol, parallel zu einem Draht, drehbar aufgehängt.

achse sehen, dann scheint uns dieser Gegenstand rechts-links-symmetrisch zu sein. Jetzt denken wir uns folgenden Versuch ausgeführt: Durch den Draht werde ein Strom geschickt. Man beobachtet dann, daß in Stromrichtung gesehen der Nordpol der Magnetnadel nach rechts ausschlägt. Wenn also ein Strom durch den Draht fließt, dann kann die Magnetnadel plötzlich rechts und links unterscheiden. Die Situation hat sich grundlegend geändert. Mit Strom ist die Magnetnadel ein physikalischer Gegenstand, mit dessen Hilfe ich rechts und links unterscheiden kann. Bei einem solchen Gegenstand sage ich, er ist rechts-links-antisymmetrisch. Damit haben wir die beiden Begriffe der Rechts-Links-Symmetrie und der Rechts-Links-Antisymmetrie kennengelernt, je nachdem ob die physikalische Anordnung eine Unterscheidung zwischen rechts und links nicht gestattet oder gestattet.

Diskutieren wir den Versuch mit der Magnetnadel noch etwas eingehender: Derselbe Gegenstand, die Magnetnadel, ist also entweder rechts-links-symmetrisch oder rechts-links-antisymmetrisch, je nachdem ob ein stromführender Draht in der Nähe ist oder nicht, heitsverachtung einhergeht wie beim Großinquisitor, grundverschie-

so möchte man meinen. Welche physikalischen Gesetze beschreiben die Wirkungen des Stromes auf die Nadel? Es sind dies die Maxwell'schen Gleichungen. Wir prüfen nun nach, ob die Maxwell'schen Gleichungen die Eigenschaft haben, aus einer rechts-links-symmetrischen Anordnung eine rechts-links-antisymmetrische Anordnung zu machen. Dabei stellt sich sehr schnell heraus, daß die Maxwell'schen Gleichungen diese Eigenschaft nicht haben. Sie sind so beschaffen, daß eine einmal vorhandene Rechts-Links-Symmetrie oder eine einmal vorhandene Rechts-Links-Antisymmetrie immer beibehalten wird. Wir müssen also schließen, daß entweder die Maxwell'schen Gleichungen nicht richtig sind, oder daß wir an einer anderen Stelle einen Fehler gemacht haben. Die erste Möglichkeit kommt nicht ernsthaft in Betracht. In der Tat läßt sich der Fehler leicht finden. Man darf sich nämlich durch die äußere geometrische Gestalt der Magnetnadel, die eine Rechts-Links-Symmetrie vortäuschen kann, nicht irreführen lassen. Die innere, verborgene physikalische Struktur der Nadel muß berücksichtigt werden. Sie besteht ja aus Materie und somit aus Atomen. Die Atomtherorie lehrt nun, daß die magnetischen Eigenschaften der Nadel durch innere, in den Atomen verlaufende Kreisströme bestimmt sind. Idealisiert kann man sich die Magnetnadel als einen einzigen solchen Kreisstrom vorstellen und ein solcher Kreisstrom wäre dann rechts-links-antisymmetrisch (Figur 5). Es ist also die Anordnung mit der Magnetnadel auch schon



Figur 5

Stromführende Schlinge (Kreisstrom) mit Spiegelbild.

vor dem Einschalten des Stromes rechts-links-antisymmetrisch und dieser Zustand bleibt bestehen.

Damit stehen wir ganz kurz vor der Entdeckung eines Gesetzes von sehr großer Allgemeinheit. Denn man fragt sich natürlich, ob nicht auch alle anderen physikalischen Gesetze und die durch sie beschriebenen physikalischen Prozesse so beschaffen sind, daß sie eine Erhaltung der Rechts-Links-Eigenschaft garantieren. Wenn dies wirklich so ist, und man hat das auch lange Zeit geglaubt, dann hat man damit ein sehr allgemeines physikalisches Gesetz. Dieses Gesetz würde lauten: Bei allen physikalischen Prozessen bleibt die Rechts-Links-Symmetrie oder die Rechts-Links-Antisymmetrie erhalten. Solche „Erhaltungssätze“ sind ja Naturgesetze in einer sehr einfachen Form. Um im folgenden nicht dauernd getrennt von Rechts-Links-Symmetrie und Rechts-Links-Antisymmetrie sprechen zu müssen, will ich einen gemeinsamen Namen für beides einführen; ich

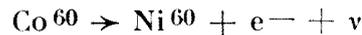
will sagen: „Rechts-Links-Parität.“ Die beiden Möglichkeiten halte ich auseinander, indem ich sage: Die Rechts-Links-Parität ist positiv bei Rechts-Links-Symmetrie und negativ bei Rechts-Links-Antisymmetrie. Der Erhaltungssatz lautet: „Bei allen physikalischen Vorgängen bleibt die Rechts-Links-Parität erhalten.“

Dieser Satz ist nun wiederum so allgemein, daß sich nur sehr wenig spezifische physikalische Folgerungen daraus ziehen lassen. Auf die wenigen Beispiele, wo er ausgenutzt worden ist, gehe ich erst gar nicht ein, sondern wende mich gleich dem Ereignis zu, das unsere Ansichten über diesen Satz grundlegend geändert hat. Im Jahre 1956 stellten nämlich die beiden jungen amerikanischen Physiker LEE und YANG die Behauptung auf: „Beim β -Zerfall bleibt die Parität nicht erhalten.“

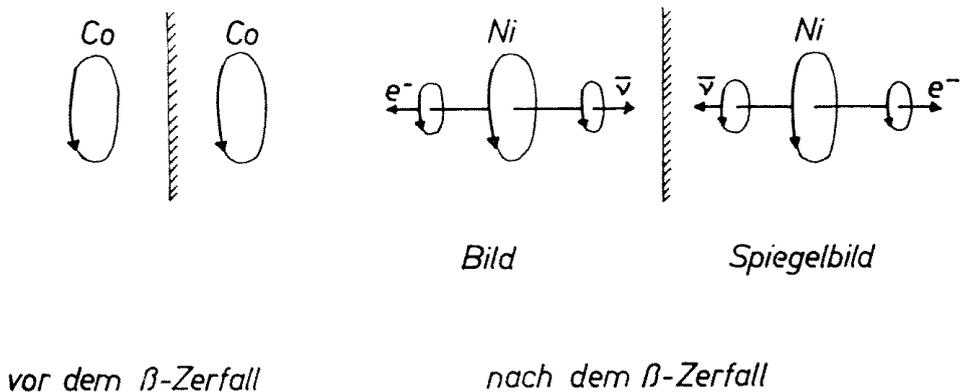
An diesem Satz müssen zunächst zwei Begriffe erklärt werden: Was ist ein β -Zerfall, und was ist die „Parität“? Bleiben wir beim Letzteren. Die „Parität“ ist eine einfache Verallgemeinerung der soeben definierten Rechts-Links-Parität. Der Raum, in dem sich alle physikalischen Prozesse abspielen, ist ja dreidimensional. Er enthält also drei zueinander senkrechte Ebenen. Nun kann ich natürlich jede dieser drei Ebenen als Spiegelebene benutzen, um meinen physikalischen Gegenstand auf seine Rechts-Links-Parität zu prüfen. Dann habe ich eine Aussage über die Rechts-Links-Parität in bezug auf gerade diese Ebene. Bei der Parität verallgemeinere ich die Prüfung auf rechts und links nun derart, daß ich nicht nur eine Ebene, sondern alle drei Ebenen nacheinander zur Spiegelung benutze. Man wählt also zunächst eine Ebene aus und entwirft ein Spiegelbild des Gegenstandes. Von diesem Spiegelbild wird dann wieder ein Spiegelbild in einer zur ersten senkrechten Ebene erzeugt. Dieser Prozeß wird noch einmal in einer zu den beiden vorhergehenden senkrechten Ebene wiederholt. Das nach dieser Prozedur entstandene Bild vergleicht man nun mit dem ursprünglichen Gegenstand. Ist es nicht unterscheidbar, so sagt man, der Gegenstand habe positive Parität, ist es unterscheidbar, so spricht man von negativer Parität.

Wir wollen einmal den Raum durch ein Achsendreibein beschreiben und jedem Punkt des Raumes die drei Koordinatenwerte (x, y, z) zuordnen. Die drei Spiegelungen führen dann den Punkt (x, y, z) in den Punkt $(-x, -y, -z)$ über. Das ist der zum Koordinatenursprung invers liegende Punkt von (x, y, z) . Man spricht von einer Raum-inversion, die durch die Operation der Parität oder der drei Spiegelungen bewirkt wird. Diese Rauminversion kann man immer auch erreichen mit nur einer Spiegelung (beispielsweise an der y - z -Ebene, wobei x in $-x$ übergeht) und einer anschließenden Drehung um 180° um die zur Spiegelebene senkrechte Achse (der x -Achse). Sehen wir diese Drehung als unwesentlich an, so kommt man an Stelle von drei Spiegelungen auch immer mit nur einer Spiegelung aus. Man kann also die Prüfung auf Parität immer durch Prüfung auf Rechts-Links-Parität ersetzen, vorausgesetzt, man sucht sich die „richtige“ Spiegelebene aus, was ich im folgenden immer tun werde.

Wenden wir uns nun dem zweiten Begriff im Satz von LEE und YANG zu, dem β -Zerfall. Man spricht von einem β -Zerfall, wenn ein Atomkern sich unter Aussendung eines Elektrons und eines Antineutrinos umwandelt. Ein bekanntes Beispiel ist:



Diesen Prozeß prüfen wir nun auf seine Rechts-Links-Parität. Den Ausgangskern Co^{60} stellen wir durch eine rotierende Kugel dar, wobei in unserem Bild die Rotationsachse in der Horizontalen liegen soll (Figur 6). Bei der hier gewählten Spiegelebene liegt dann



Figur 6
Schematisierte Darstellung des β -Zerfalls von Co^{60} in Bild und Spiegelbild. Angedeutet ist der Umlaufsinn vom Co- und vom Ni-Kern um eine horizontal liegende Achse. Im rechten Bild ist der Endzustand mit der Flugrichtung vom Elektron e^{-} und Antineutrino $\bar{\nu}$, sowie der Umlaufsinn deren Drehimpulse dargestellt.

eine positive Rechts-Links-Parität vor (eine Nichtunterscheidbarkeit von Rechts und Links). Der Co-Kern verwandelt sich nun unter Aussendung eines Elektrons und eines Antineutrinos in einen Ni-Kern. Experimentell findet man, daß die Flugrichtung des Elektrons zusammen mit dem Umdrehungssinn des Co-Kerns eine Rechtsschraube bildet. In Figur 6 ist also das „Bild“ in der Natur realisiert, das „Spiegelbild“ nicht. Ferner sehen wir, daß die Behauptung von LEE und YANG richtig ist, denn nach dem β -Zerfall haben wir eine negative Rechts-Links-Parität, während wir vorher eine positive Rechts-Links-Parität hatten. Allerdings ist einige Vorsicht am Platze, denn es könnte ja sein, daß das geometrische Bild der Kugel für den Co-Kern gar nicht zutrifft. Beim genaueren Hinsehen stellen wir jedoch fest, daß es gar nicht so sehr auf das Bild des Co-Kerns selbst ankommt als vielmehr auf die Änderung des Zustandes zwischen Co-Kern und Ni-Kern. Der Satz von LEE und YANG bezieht sich ja auch auf die Änderung der Parität beim β -Zerfall. Die Differenz zwischen Co-Kern und Ni-Kern ist, so sagen die Kernphysiker, sehr genau feststellbar. Es ändert sich nämlich nur der Betrag des Dreh-

impulses, praktisch also die Rotationsgeschwindigkeit des Kerns. Der Drehimpuls ist — geometrisch — vollständig dargestellt durch einen Umlaufsinn. Wir können also auf die Kenntnis der Gestalt des Co-Kerns überhaupt verzichten.

In der genaueren mathematischen Fassung wird der β -Zerfall durch eine Kopplung beschrieben, die als skalares Produkt zwischen einem polaren Vektor, dem Impuls des Elektrons, und einem axialen Vektor, dem Drehimpuls des Kernes, dargestellt werden kann. Bei Rauminversion ändert der polare Vektor sein Vorzeichen, der axiale aber nicht.

Die These von LEE und YANG ist inzwischen bei so vielen anderen β -Zerfallsprozessen nachgeprüft worden, daß man sie als sicher bestätigt ansehen kann. Was bedeutet das nun? Ist diese eine Ausnahme unter den physikalischen Prozessen, bei denen sonst immer die Paritätserhaltung gilt, denn so schlimm? In der Tat muß man diese Ausnahme als sehr schwerwiegend ansehen, denn einerseits werden bei der Herleitung des Satzes von der Erhaltung der Parität ja nahezu keine Voraussetzungen gemacht, er wurzelt direkt in unserem Glauben, daß die physikalischen Gesetze nicht rechts oder links irgendwie bevorzugen, und andererseits hat der β -Zerfall eine recht große praktische Bedeutung. Ein Blick auf eine Nuklidkarte zeigt, daß die instabile Materie ganz überwiegend nach dem physikalischen Mechanismus des β -Zerfalls zerfällt.

Vielleicht darf ich hier noch erwähnen, daß die Untersuchungen der letzten Jahre — wobei diese Paritätsfragen eine entscheidende Rolle spielten — zur Entdeckung einer neuen universellen Naturkonstanten geführt haben. Diese hat mit den numerischen Werten des β -Zerfalls zu tun und führt den Namen „universelle Fermische Kopplungskonstante g “. Ihr Wert ist $g = (1,99 \pm 0,01) \cdot 10^{-49}$ erg. cm³. Wie Sie wissen, haben die universellen Naturkonstanten, wie Plancksches Wirkungsquantum, Lichtgeschwindigkeit oder elektrische Elementarladung, in der Physik eine außerordentliche große Bedeutung.

An dieser Stelle darf ich nun die Diskussion der Bedeutung der Unterscheidung von rechts und links unterbrechen und mich dem Begriff der Anti-Welt zuwenden. Sie alle wissen, daß die Materie, die unsere Welt bildet, aus Atomen besteht. Über diese Atome wissen wir auch schon recht genau Bescheid, sie bestehen nämlich aus einem sehr kleinen Kern, der nahezu die gesamte Masse enthält, und einer demgegenüber recht großen Hülle. Die Hülle wird aus elektrisch negativ geladenen Elektronen gebildet, während der Kern elektrisch positiv geladen ist und seinerseits aus elementaren Teilchen zusammengesetzt ist, den elektrisch positiv geladenen Protonen und den Neutronen. Unsere materielle Welt besteht demnach im wesentlichen aus drei elementaren Teilchen: Dem Elektron, dem Proton und dem Neutron.

Schon 1932 ist ein weiteres Teilchen entdeckt worden, das beinahe ein Zwilling zum Elektron ist. Von diesem unterscheidet es sich nur durch das Vorzeichen seiner elektrischen Ladung. Dieses „Positron“

ist jedoch ein sehr feindlicher Zwilling Bruder, denn sobald es mit einem Elektron zusammentrifft, „zerstrahlt“ es mit diesem zusammen in energiereiche Lichtteilchen. Da diese keine Masse haben („immaterielle“ Teilchen), haben wir somit eine Vernichtung von Materie. Vor einigen Jahren hat man nun entdeckt, daß es auch zu dem Proton und dem Neutron jeweils einen feindlichen Zwilling Bruder gibt, die die Namen Antiproton und Antineutron tragen. Auch sie „zerstrahlen“, wenn sie mit ihrem Zwilling Bruder zusammentreffen, jedoch erst auf Umwegen, denn sie zerfallen zunächst in materielle Teilchen, in π -Mesonen, und erst diese zerfallen weiter so, daß schließlich auch nur immaterielle Teilchen übrig bleiben.

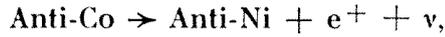
Das Bemerkenswerte ist nun, daß die „Antiteilchen“ denselben physikalischen Gesetzen gehorchen wie die Teilchen. Das bedeutet, daß sie sich auch zu Atomen zusammensetzen können, und diese Atome wiederum können zusammenhängende stabile Materie bilden. Aber wenn diese „Materie“ mit der gewöhnlichen Materie unserer Welt zusammenträfe, gäbe es sofort eine Katastrophe, denn sie würden sich gegenseitig vernichten. Deswegen möchte ich dieser aus Antiteilchen gebildeten Materie den Namen Anti-Materie geben. Bis jetzt kann man nur die Überzeugung aussprechen, daß nach den physikalischen Gesetzen diese Anti-Materie existieren kann. Ob sie wirklich existiert, wissen wir nicht. Es ist noch nicht gelungen, Antiteilchen zu Atomen zusammenzusetzen. Denn ehe man sie zusammenbringen kann, geraten sie ja bestimmt einmal mit einem der überaus zahlreichen Zwilling Brüder der Teilchenwelt zusammen, und schon ist es um sie geschehen.

Man stellt sich natürlich nun die Frage, ob es vielleicht irgendwo im Kosmos ein Sternensystem gibt, das nicht aus gewöhnlicher Materie, sondern aus Anti-Materie besteht. Eine solche aus Anti-Materie bestehende Welt wäre dann in unserem Sinne eine Anti-Welt. Die Existenz einer solchen Anti-Welt können wir jedoch noch nicht feststellen, denn die einzigen Signale aus dem All, die wir bisher entziffern können, sind Lichtsignale, und diese verraten nicht, ob sie von Materie oder von Anti-Materie stammen. Nach dem was wir bisher kennen, müssen wir annehmen, daß es im Kosmos nur Materie gibt. Den physikalischen Gesetzen nach könnte es auch Anti-Materie geben, aber diese scheint in der Natur nicht realisiert zu sein, abgesehen von den künstlich erzeugten winzigen Bruchstückchen.

Die physikalischen Gesetze zeigen eine höhere Symmetrie als die Natur selbst. Solche Unsymmetrien in der Realisierung physikalischer Möglichkeiten sind gar nicht so selten. Ein weithin bekanntes Beispiel dafür ist das Auftreten von linksdrehendem Zucker. Organischer Zucker in wässriger Lösung dreht die Polarisations ebene von Licht nach links. Das liegt am atomaren Aufbau der Zuckermoleküle. Wir haben hier wieder eine innere Rechts-Links-Antisymmetrie ähnlich wie bei der Magnetnadel. Physikalisch ist auch ein Aufbau der Zuckermoleküle derart möglich, daß die Polarisations ebene von Licht nach rechts gedreht wird. Solche Zuckermoleküle lassen sich

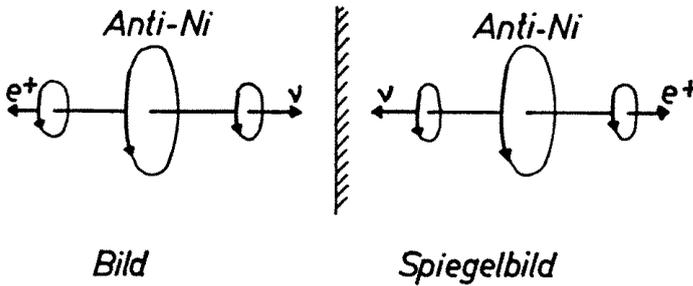
auf physikalischem Wege auch herstellen, sie treten jedoch nicht in der organischen Natur auf. Diese Unsymmetrie der belebten Natur können wir also nicht auf physikalische Gesetze zurückführen. Die Erklärung muß in den biologischen Gesetzen liegen, etwa denen der Vererbung verbunden mit einer passenden Hypothese über die Entstehung des Lebens.

Wenden wir uns nun zur Diskussion der Unterscheidung von rechts und links in unserer — theoretisch möglichen — Anti-Welt. Insbesondere interessiert uns hier wieder der β -Zerfall. Unser Beispiel mit dem Co^{60} müssen wir so übersetzen:



d. h. Anti-Co zerfällt in Anti-Ni unter Aussendung eines Positrons und eines Neutrinos.

Wir werden vermuten, daß auch in der Anti-Welt die Parität beim β -Zerfall nicht erhalten bleibt. Wir bekommen also wieder Bild und Spiegelbild, die sich unterscheiden (Figur 7). Beim gewöhn-

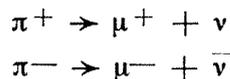


Figur 7

Der Endzustand des β -Zerfalls von Anti-Co (siehe auch Figur 6).

lichen β -Zerfall hatten wir festgestellt, daß nur eins von beiden, das „Bild“, wirklich vorkam. Wir müssen nun zu entscheiden versuchen, welches der beiden Bilder in der Anti-Welt realisiert sein würde. Das läßt sich in der Tat entscheiden und hängt eng zusammen mit dem Unterschied zwischen den beiden neutralen Teilchen, dem Anti-neutrino und dem Neutrino. Das müssen wir nun etwas genauer untersuchen.

Dazu betrachten wir ein weiteres Beispiel, welches das letzte sein wird. Dieses Beispiel betrifft den Zerfall von gewissen Elementarteilchen, und zwar von sogenannten π -Mesonen. Diese zerfallen spontan, wobei ein weiteres materielles Teilchen entsteht, das μ -Meson, und ferner ein Neutrino. Sowohl π - als auch μ -Meson gibt es als positiv und negativ geladene Partner. Die Zerfallsreaktionen von diesen beiden sind



Man glaubt also, daß hier beim Zerfall entweder ein Neutrino oder ein Antineutrino auftritt. Welcher Unterschied besteht zwischen beiden? Beide sind „pathologische“ Teilchen insofern, also sie nur wenige physikalische Eigenschaften haben: Sie transportieren Energie, Impuls und Drehimpuls, und sie fliegen mit Lichtgeschwindigkeit. Sie besitzen jedoch weder Masse noch Ladung noch magnetisches Moment. Auf einen Unterschied zwischen Neutrino und Antineutrino ist man nun folgendermaßen gekommen: Man versucht den Drehimpuls dieser Teilchen zu bestimmen. Das ist zwar bei dem Neutrino und Antineutrino nicht direkt möglich, läßt sich aber aus der Zerfallsreaktion der π -Mesonen, beispielsweise, indirekt erschließen. Man hat gefunden, daß bei dem Zerfall eines ruhenden π^+ -Mesons der Drehimpuls des entstehenden μ^+ -Mesons eine Rechtsschraube mit seinem Impuls bildet. Da das π^+ -Meson keinen eigenen Drehimpuls hat, muß aus Gründen der Erhaltung des Gesamtdrehimpulses der Drehimpuls des Neutrinos mit seiner Fortschrittrichtung ebenfalls eine Rechtsschraube bilden und außerdem den gleichen Betrag haben wie der Drehimpuls des μ^+ -Mesons. Zieht man nun zum Vergleich auch den Zerfall des π^- -Mesons heran, so findet man, daß beim Neutrino Impuls und Drehimpuls eine Rechtsschraube bilden, während sie beim Antineutrino eine Linksschraube bilden (siehe Figur 2). Der Drehimpuls ist also entweder parallel oder antiparallel zur Fortschrittrichtung. Man könnte Neutrino und Antineutrino als die „natürlichen Schrauben“ ansehen und in der angelsächsischen Literatur tragen sie manchmal auch scherzhafterweise den Namen „screwon“.

Ehe ich nun zur Diskussion des β -Zerfalls zurückkehre, muß ich auf eine Schwierigkeit aufmerksam machen, die sich so ganz anschaulich leider nicht lösen läßt. Es gibt nämlich neben den pathologischen Teilchen Neutrino und Antineutrino noch ein Teilchen, das in demselben Maße pathologisch ist, d. h. es besitzt auch nur Energie, Impuls und Drehimpuls, und es fliegt mit Lichtgeschwindigkeit. Dieses Teilchen ist das bekannte Lichtteilchen oder Photon. Auch beim Photon ist es so, daß der Drehimpuls entweder parallel oder antiparallel zur Fortschrittrichtung ist. Nach der speziellen Relativitätstheorie muß das ganz allgemein bei allen Teilchen, die sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, so sein. Jedoch unterscheidet man diese beiden Fälle nicht als Teilchen und Antiteilchen. Um das wenigstens plausibel zu machen, möchte ich auf drei Unterschiede zu den Neutrinos aufmerksam machen. Erstens ist beim Photon der Betrag des Drehimpulses größer (genau doppelt so groß). Zweitens treten die Neutrinos niemals ohne einen Partner auf, während bei einem Zerfall auch einmal ein Photon alleine auftreten kann, beispielsweise beim Übergang eines angeregten Atoms in den Grundzustand. Wenn wir die Zerfallsreaktionen, bei denen Neutrinos vorkommen, nachsehen, dann finden wir, daß zum Beispiel das Antineutrino immer nur zusammen mit einem Neutrino oder einem Elektron oder einem μ^- -Meson auftritt. Umgekehrt erscheint das Neutrino immer nur zusammen mit einem Antineutrino oder einem

Positron oder einem μ^+ -Meson. Auf den dritten Unterschied weise ich für die Physiker unter Ihnen hin: Neutrino und Antineutrino genügen dem Pauli'schen Ausschließungsprinzip, das Photon nicht.

Die Bemerkung, daß Neutrino und Antineutrino immer nur mit Partnern auftreten, hilft uns nun am leichtesten weiter, wenn wir den β -Zerfall in der Anti-Welt betrachten. Das Antineutrino war beim β -Zerfall an das Elektron als Partner gebunden, das Neutrino an das Positron. Also, so können wir jetzt schließen, tritt beim β -Zerfall des Antikobalts zusammen mit dem Positron ein Neutrino auf. Da nun Neutrino und Antineutrino sich wie Bild und Spiegelbild verhalten und beim β -Zerfall von Co das „Bild“ realisiert war, muß beim β -Zerfall des AntiCo das Spiegelbild (Figur 7) realisiert sein.

Damit kommen wir nun zum Schluß. Nach den physikalischen Gesetzen ist die Existenz einer Anti-Welt, bestehend aus Anti-Materie, möglich. Es gelten alle physikalischen Gesetze der Welt aus Materie, einschließlich der Gesetze des β -Zerfalls, auch in der Anti-Welt, wenn wir diese in der Weise konstruieren, daß wir Materie durch Anti-Materie und Bild durch Spiegelbild ersetzen. In dem Sinne, in dem ich das am Anfang erklärt habe, heißt das, beim Übergang zur Anti-Welt bleiben alle physikalischen Gesetze richtig, wenn ich rechts und links vertausche.