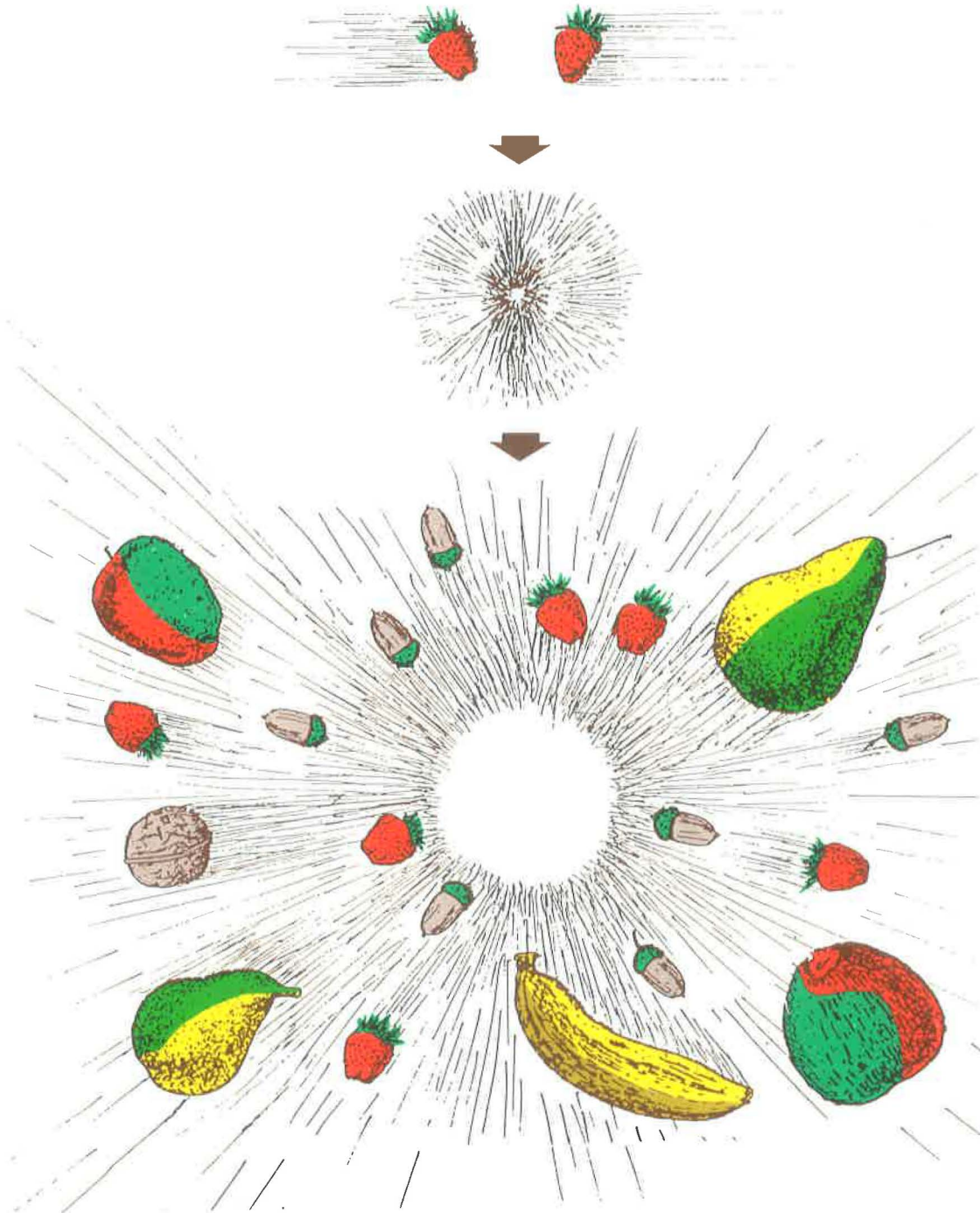


Energie wird zu Materie:

Ein Blick in die Welt der Elementarteilchen



Energie wird zu Materie :

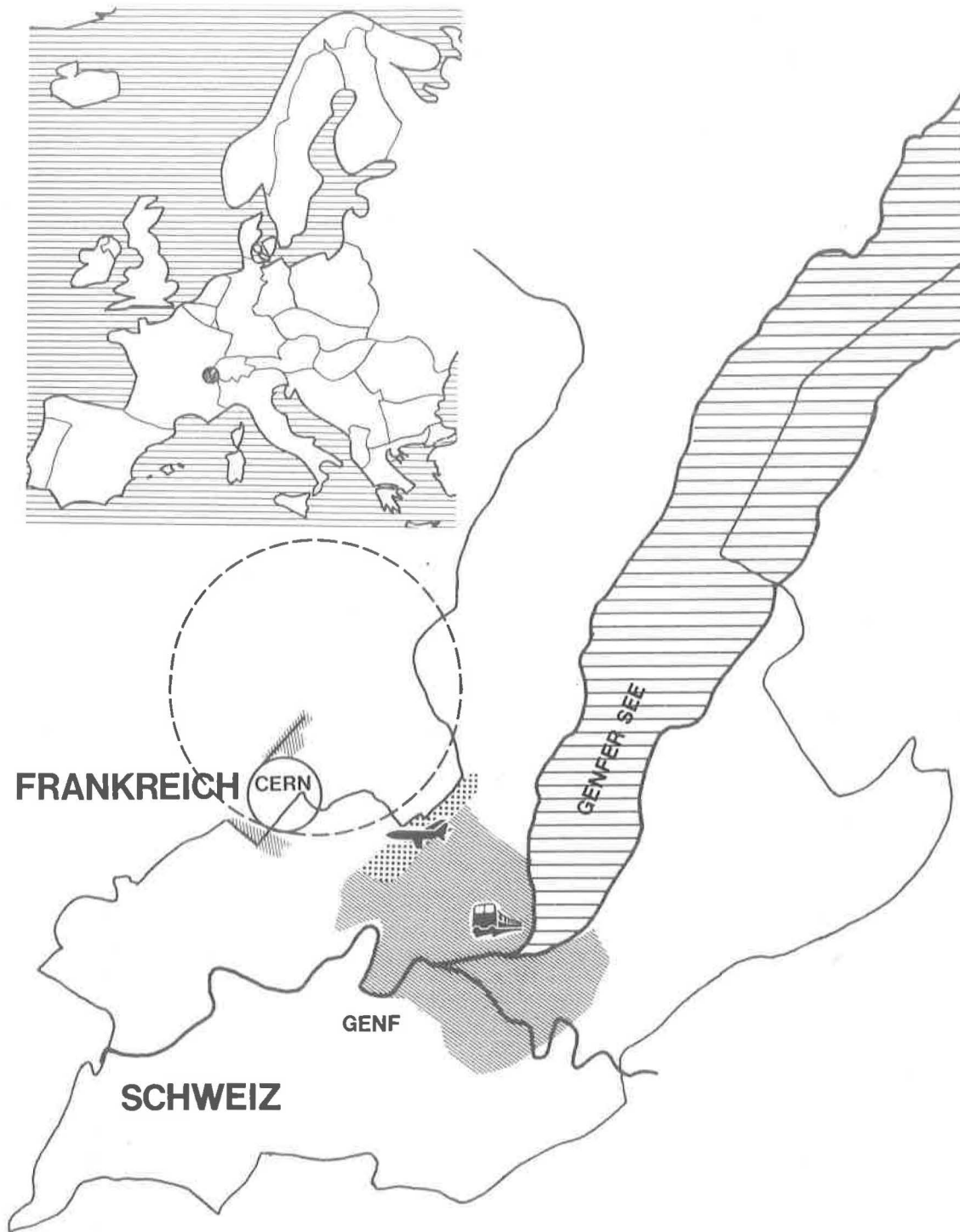
Ein Blick in die Welt der Elementarteilchen

(...mit einem Zusatz für die, die mehr wissen wollen)

Diese Broschüre wurde von Rafel Carreras in Zusammenarbeit mit Guy Hentsch entworfen und verfasst.



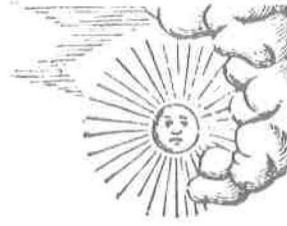
Europäisches Laboratorium für Teilchenphysik



Im Nordwesten von Genf, beidseits der schweizerisch-französischen Grenze, liegt ein europäisch-internationales Laboratorium für Grundlagenforschung, genannt CERN. Es dient der Elementarteilchenphysik: Man versucht dort zu verstehen, was vorgeht, wenn Energie zu Materie wird.

Das Verständnis dieser geheimnisvollen Umwandlung ist der Schlüssel zu vielen grundlegenden Fragen der Physik im weitesten Sinn, bis zur Astrophysik und zur Kosmologie, den Wissenschaften, die sich mit dem Aufbau der Sterne und des Weltalls beschäftigen.

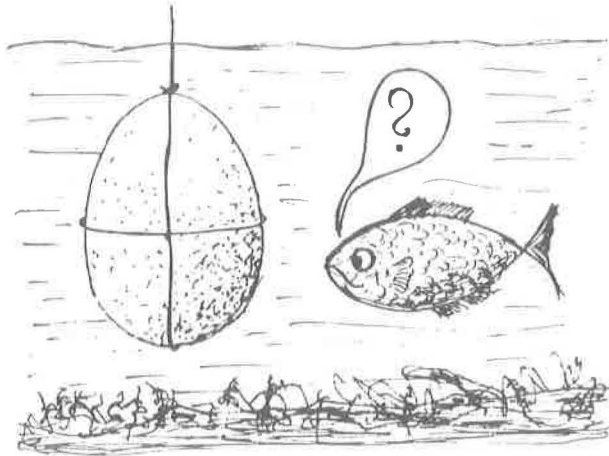
Die Arbeitsmethoden bei CERN sind sehr komplex. Will man sie und ihre Resultate exakt darstellen, dann wird es zwangsläufig schwierig und abstrakt. Aber das Wesentliche kann man auch einfach sagen. Das wird im folgenden versucht.



Wenn die Sonne auf einen See scheint, führt sie ihm Wärme zu. Sehr viel im Lauf eines Tages. Eine viel, viel grössere Menge Wärme als die, die eine Kerzenflamme erzeugt.



Trotzdem kann man kein Ei in dem See kochen, auch wenn man es den ganzen Tag darin liegen lässt. Mit der Kerze dagegen schafft man es in ein paar Minuten.

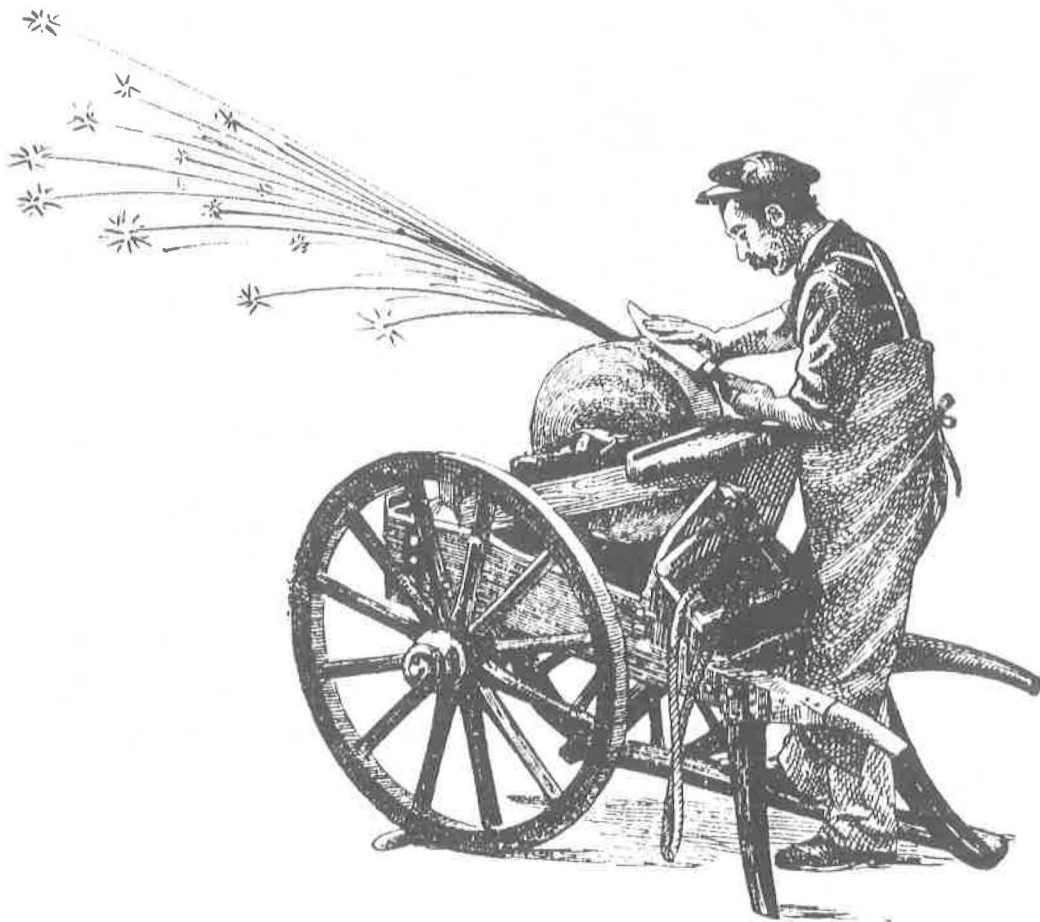


Warum?

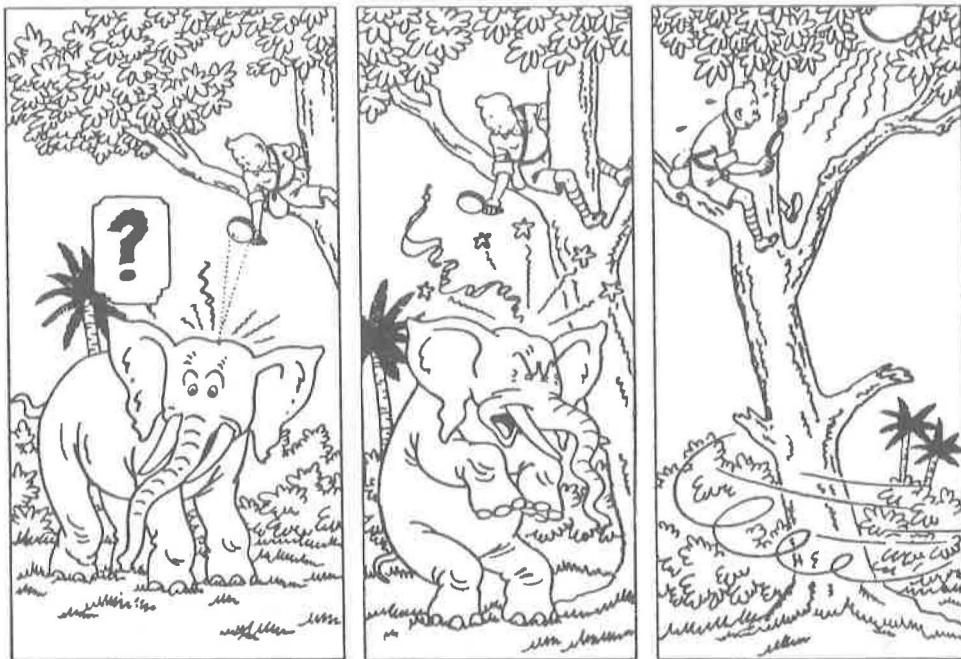


Weil die grosse Wärmemenge, die der See von der Sonne erhält, sich in dem vielen Wasser so verdünnt, dass nur eine kleine Wärme-Konzentration entsteht. Die kleine Wärmemenge der Kerze ist dagegen auf den sehr kleinen Raum der Flamme konzentriert. Konzentrierte Wärme aber lässt die Temperatur ansteigen, deshalb kocht das Ei. Nicht sehr gut vielleicht, aber immerhin - im See geht es gar nicht.

Hier ein anderes Beispiel. Wenn man ein Messer schleift, gibt es Funken. Die Funken sind winzige Metallstückchen, die der Schleifstein aus der Klinge schlägt. Durch den Schlag werden sie sehr heiss (bis zu tausend Grad), deshalb leuchten sie, denn bei so einer hohen Temperatur strahlt jeder Gegenstand Licht aus. Aber nicht, weil er so viel Wärme enthält (mit der Wärme-Menge eines Funkens könnte man keine Erbse kochen!), sondern weil diese Wärme so konzentriert ist.



FRAGE: Der Elefant hier wird von vielen Sonnenstrahlen beschienen; nur die wenigsten davon sind durch Tims Brennglas gegangen. Warum brennen ihn nur diese wenigen?



© 1947 Casterman, "Tim im Kongo" von Hergé

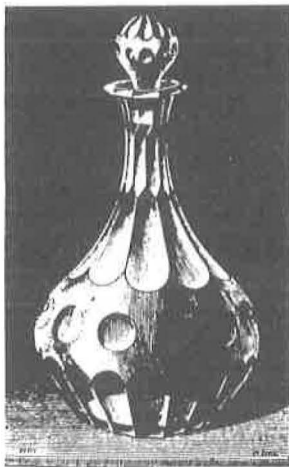
ANTWORT: Das Brennglas hat sein wenig Licht auf eine winzige Elefantenhautstelle konzentriert. Das konzentrierte Licht hat offensichtlich eine ganz andere Wirkung als das unkonzentrierte ...

Also: Es kommt alles auf die Konzentration an. Übrigens ist ja auch im Alltag oft die Konzentration wichtiger als die Menge:

- Man nehme zwanzig Leute und packe sie auf einen Küchentisch. Kommentar überflüssig. Die Leute führen sich ganz anders auf, wenn sie sich auf einem Quadratkilometer verteilen dürfen. Man braucht nicht zahlreich zu sein, um es eng zu haben.



- Man nehme einen Liter Wasser und ein Likörglas und presse das Wasser in das Glas ...



... dann geht das Glas kaputt. Gut. Aber wenn man es verstärkt und die nötige Kraft aufbringt, dann kann man den Versuch machen. Und dann verwandelt sich das zusammengesetzte Wasser in eine Art Eis, das bei 1000 Grad noch nicht schmilzt.



Kommen wir zurück zu unserem Funken, in dem die Wärme bereits so konzentriert war, dass er Licht ausstrahlt. (Man kann die Wärme auch Energie nennen.) Wir wollen die Sache ins Extrem treiben. Was würde passieren, wenn wir die Funkenenergie noch viel stärker konzentrieren würden? Sagen wir auf das Volumen eines Atoms. Die aufgezählten Beispiele haben gezeigt, dass viele Eigenschaften sich beim Konzentrieren gewaltig ändern. Hier handelt es sich um eine ganz unerhörte Konzentration; man darf also gespannt sein ...



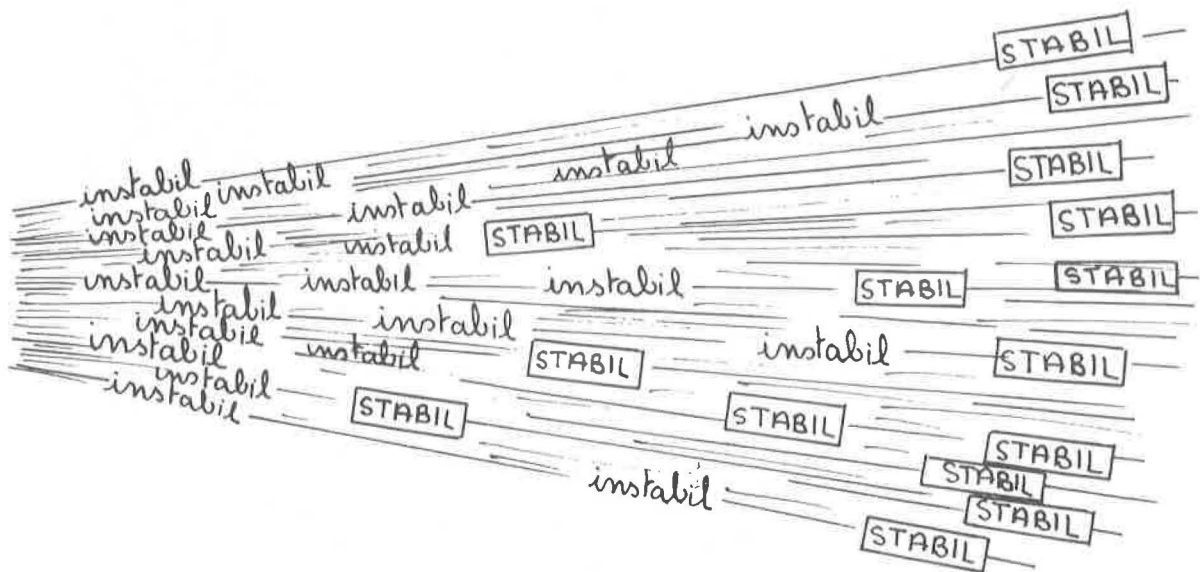
... Meine Damen und Herren, halten sie den Atem an, es geschieht jetzt etwas Merkwürdiges, ja Unglaubliches, ja Phantastisches: Die Energie dieses Funkens verwandelt sich in Materie!

- Wie bitte? Energie kann sich in Materie verwandeln?

- Jawohl. Nach unseren heutigen theoretischen Anschauungen, die durch viele Experimente bestätigt sind, muss man Materie als eine kompakte, verdichtete Form von Energie ansehen, kondensierte Energie sozusagen.

Aber diese Umwandlung sieht man nicht im Alltag. Kein Mensch hat je gesehen, wie Energie sich in sichtbare Materie, also in einigermaßen grosse Dinge, verwandelt hat. Dazu kann man dreierlei sagen:

1. In den alltäglichen Vorgängen ist die Energie viel zu wenig konzentriert, als dass Teilchen entstehen könnten.
2. Aber selbst wenn Teilchen entstehen könnten, wären sie viel zu klein, als dass man sie sehen könnte.
3. Und selbst wenn man sie sehen könnte, wären sie viel zu kurzlebig, als dass sie sich zusammentun und sichtbare Objekte bilden könnten. Fast alle entstehen in einer sehr unstabilen Form, und die meisten 'verduften' sofort und werden wieder zu Energie oder zerfallen in andere Teilchen, die dann oft ihrerseits auch zerfallen, bis schliesslich bestenfalls einige vereinzelt stabile Teilchen übrig bleiben.

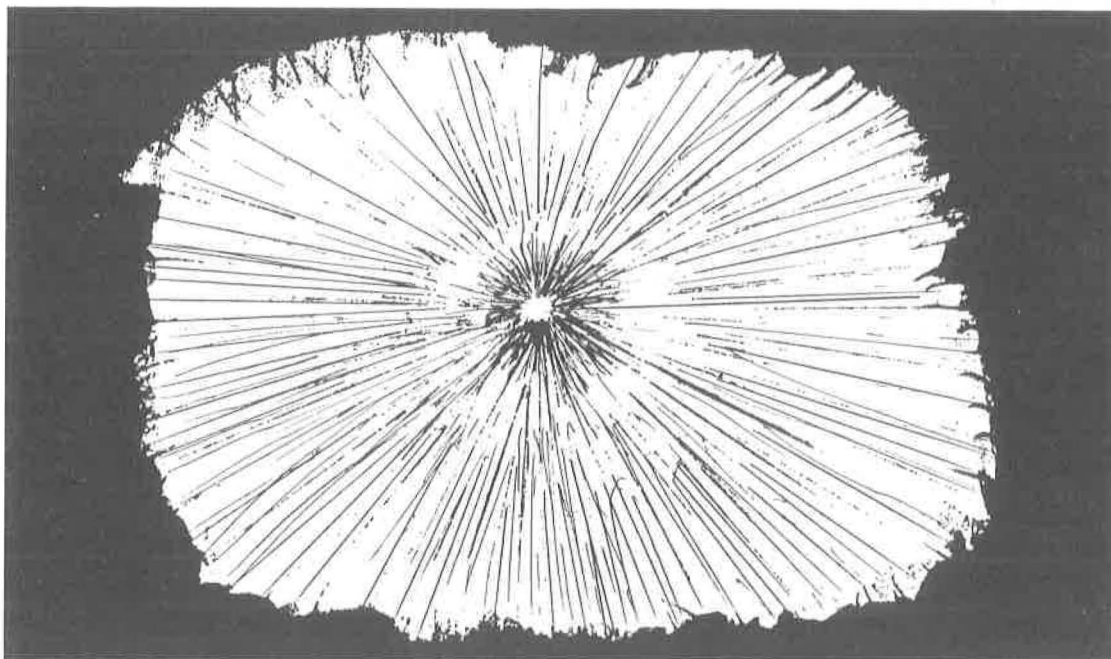


- Aber diese stabilen Teilchen können dann sichtbare Gegenstände bilden?
- Ja. Was wir Materie nennen, Mineralien, Pflanzen, auch Tiere und Menschen - alles besteht aus solchen Teilchen. Drei Teilchenarten genügen zum Bau der ungeheueren Vielfalt aller Wesen und Dinge. Es kommt nur darauf an, wie die Teilchen zusammengebaut sind. Ähnlich wie beim Morse-Alphabet, in dem drei Zeichen, der Punkt, der Strich und der Zwischenraum, genügen, um alles zu schreiben, was man will.

Und seit die Welt besteht, sind es im wesentlichen immer dieselben Teilchen, die sich in stetem Wechsel zusammuntun, trennen und aufs Neue zusammuntun, und die so die Vielfalt der Dinge und der Wesen bilden.



- Dann sind also die Teilchen, die unseren Körper bilden, sehr alt?
- Allerdings, sie wurden vor etwa 15 Milliarden Jahren erzeugt, als unser Weltall entstand. Soviel man weiss, hat sich damals eine ungeheure Energiemenge in eine unvorstellbare Zahl von Teilchen umgewandelt. Nach kurzen, sehr turbulenten Anfängen haben sie sich dann stabilisiert, und schliesslich ist aus ihnen unsere Welt entstanden, so wie wir sie kennen, mit allem was darin ist.

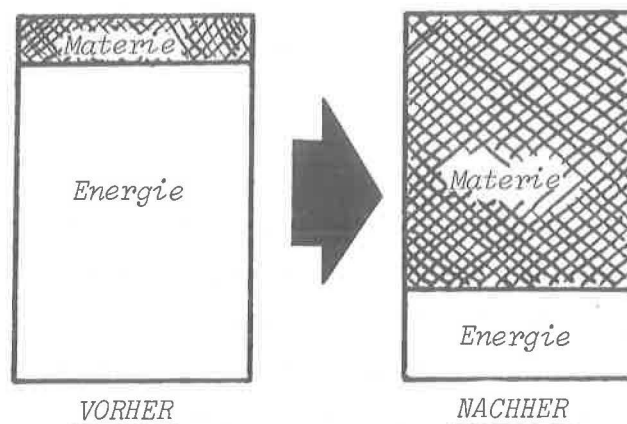


Niemand weiss, woher diese enorme Energiemenge kam und warum sie sich plötzlich konzentriert hat. In Laboratorien wie CERN erzeugt man künstlich, in ganz bescheidenem Masstab, Zustände wie damals, um sie verstehen zu lernen. Mit Hilfe von Beschleunigern (das sind sehr grosse Maschinen) kann man nämlich Teilchen mit hoher Energie aufeinander schiessen und so während eines winzigen Momentes eine so starke Energiekonzentration erzielen, dass Materie erzeugt wird.

- ... Moment!

... Wieso wird die Energie konzentriert, wenn man kleine Teilchen beschleunigt?

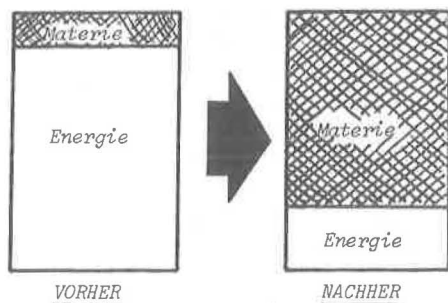
- Weil man sehr viel Bewegungsenergie in einen Gegenstand stecken kann, indem man ihn auf eine hohe Geschwindigkeit bringt. Genau das tut man in einem Beschleuniger. Man beschleunigt das Teilchen auf nahezu Lichtgeschwindigkeit. Die Bewegungsenergie, die man in ein so kleines Objekt gesteckt hat, hat dann eine ungeheure Konzentration. Wenn so ein Teilchen auf ein anderes trifft, wird die Energie freigesetzt und erzeugt Materie; sie wandelt sich in Materie um.
- Aber damit hat man doch keine Materie erzeugt! Das Teilchen, das man beschleunigt hat, war doch von Anfang an Materie. Man hat überhaupt nichts erzeugt!
- Eben doch, genau. Man hat Materie erzeugt, denn nach dem Zusammenstoß gibt es mehr Materie als vorher!





- Wieso?
- Ja, das ist der Kernpunkt, und es lohnt sich, den genau zu durchdenken. Der Stoss, der Aufprall, setzt auf einen Schlag die gesamte Energie frei, die man durch die hohe Geschwindigkeit angesammelt hat.
- Was heisst da freisetzen?
- Ja, das ist, wie wenn man vom sechsten Stockwerk herunterfällt. Die Energie des Falls wirkt sich erst aus, wenn man unten ankommt. Solange man fällt, ist die Energie auch da, aber man merkt nichts davon.
- Stimmt.

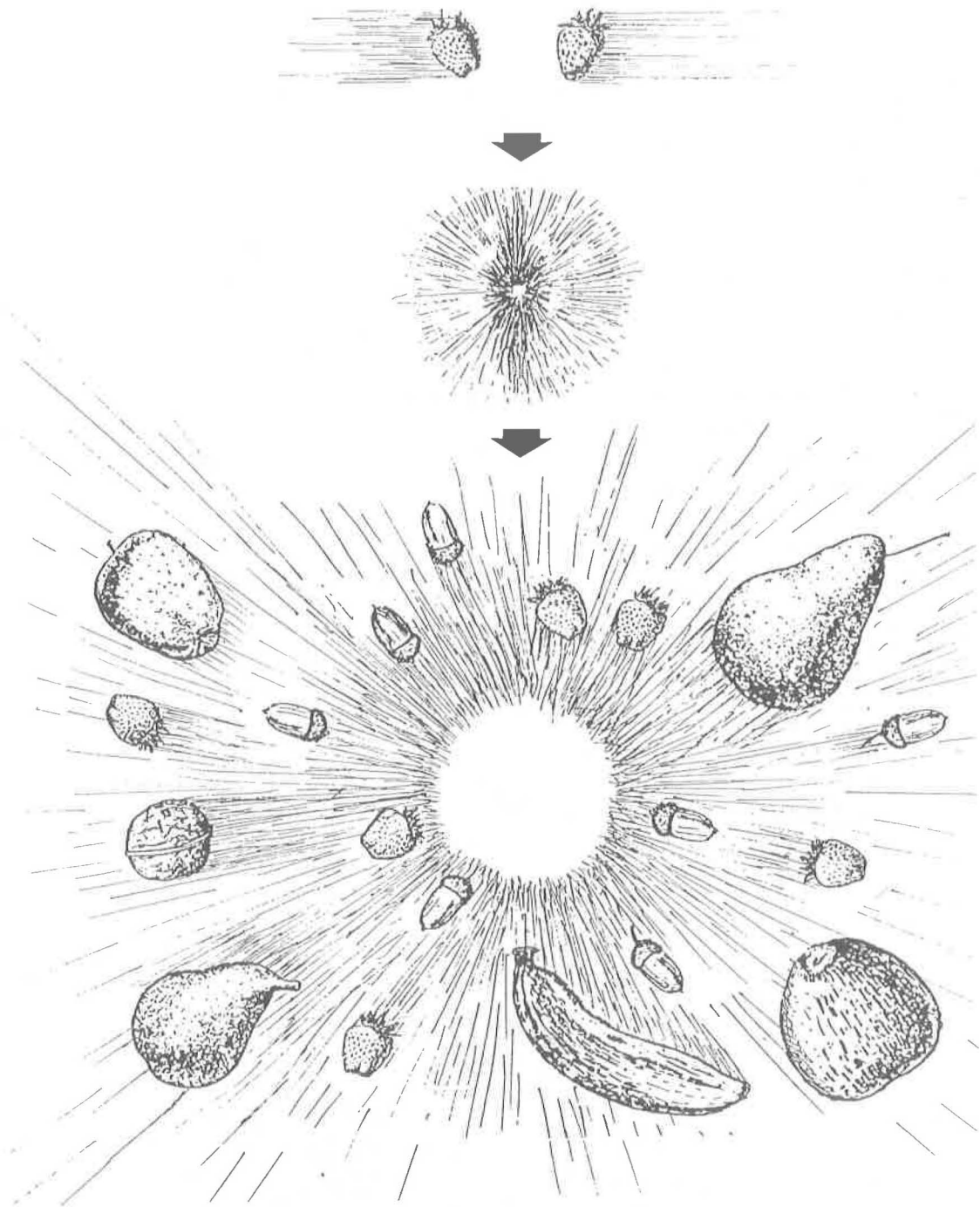
- Mit dem Teilchen ist das genau so: Seine Bewegungsenergie zeigt sich erst im Moment des Aufpralls.
- Verstehe.
- Also, es ist genau diese Energie, die beim Freiwerden sich in eine Anzahl von neuen Teilchen umwandelt, in Teilchen, die vor einem Moment noch nicht existierten.
- Gut, ich beginne zu begreifen.
- Man kann das mit einem Bild veranschaulichen, das ein bisschen verrückt, aber eigentlich gar nicht so verkehrt ist. Nehmen wir statt der beiden Teilchen zwei Erdbeeren. Denken wir uns, dass sie mit enormer Energie aufeinanderprallen. Und dann müssen wir uns vorstellen, dass schlagartig aus der Energie der Erdbeeren nicht nur neue Erdbeeren entstehen, sondern auch Äpfel, Birnen, Bananen, Nüsse und so weiter. Es wurde etwas erzeugt, das vorher nicht da war.



Um anschaulich zu begreifen, was bei diesem erdachten Erdbeer-Zusammenstoß passiert, kommen wir auf das Bild von Seite 14 zurück (links nochmals abgedruckt). Vorher, das heißt vor dem Zusammenstoß, hatten wir wenig Materie (Erdbeeren), aber viel Energie (wegen der hohen Geschwindigkeit). Nachher hat sich ein Teil der Energie in Materie (die verschiedenen Früchte) verwandelt ('kondensiert'). Ein Rest bleibt übrig: die Früchte haben alle eine Geschwindigkeit, allerdings eine viel kleinere als vorher die Erdbeeren. Wenn nach dem Zusammenstoß alle Früchte unbeweglich dagelegen hätten, dann hätten wir sagen können, die gesamte Energie der Erdbeeren hat sich in Materie verwandelt.

FRAGE: Könnte man eigentlich nicht Teilchen (wenn auch vielleicht keine Früchte) erzeugen, indem man echte Erdbeeren gegeneinander schießt?

ANTWORT: Im Prinzip ja, sagt die Theorie. Aber beim heutigen Stand der Technik können wir bei weitem nicht stark genug schießen. Wir müssen uns deshalb auf Gegenstände beschränken, die etliche Billionen mal kleiner sind!



Kommen wir auf unsere Teilchen zurück. Es ist jetzt ganz einfach, in grossen Linien den Aufbau aller CERN-Experimente zu beschreiben:

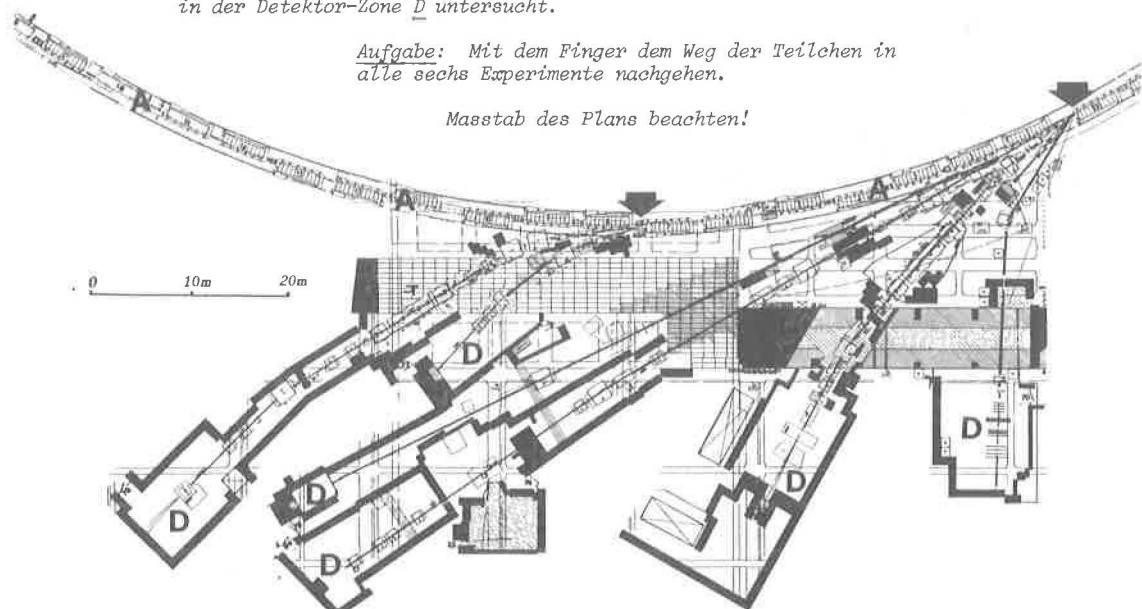
1. Man beschleunigt stabile Teilchen, die man leicht in gewöhnlicher Materie findet, zum Beispiel Protonen. Man benützt dazu elektrische und magnetische Kräfte. Die Beschleunigung findet in Maschinen statt, die in einem grossen Ring aufgebaut sind; ihr Durchmesser kann mehrere Kilometer betragen. Solche Maschinen nennt man **BESCHLEUNIGER**.
2. Man sorgt für Zusammenstösse dieser Teilchen. Dabei entstehen neue Teilchen.
3. Man beobachtet, so gut man kann, wie sich diese Teilchen benehmen. Die Apparate, die man dazu benützt, nennt man **DETEKTOREN**, das heisst Nachweisgeräte; sie liefern allerdings nur recht unvollständige Informationen. Man versucht deshalb, mit Hilfe von grossen **RECHENANLAGEN** (Computern), zu rekonstruieren, was die Teilchen wirklich gemacht haben. Das ist so ähnlich wie bei einer Kriminal-Untersuchung.
4. Und dann, wie im Krimi, muss man noch verstehen und erklären, warum sie das gemacht haben ...

Typische Anordnung des Gerätes in einer Experimentierhalle

Der Kreisbogen A ist ein Teil des "kleinen" CERN-Synchrotrons PS. Die vielen Rechteckchen längs dieses Rings sind Magnete. Die Protonen bewegen sich in einem luftleeren Rohr im Feld dieser Magnete. An zwei Stellen (Pfeile!) können sie auf Metallklötze gelenkt werden, und beim Aufprall entstehen neue Teilchen aus ihrer Energie. Von diesen sucht man sich die Arten heraus, die man gerade will, und leitet sie in "Korridore" für die einzelnen Experimente. Ihr Verhalten wird dann in der Detektor-Zone D untersucht.

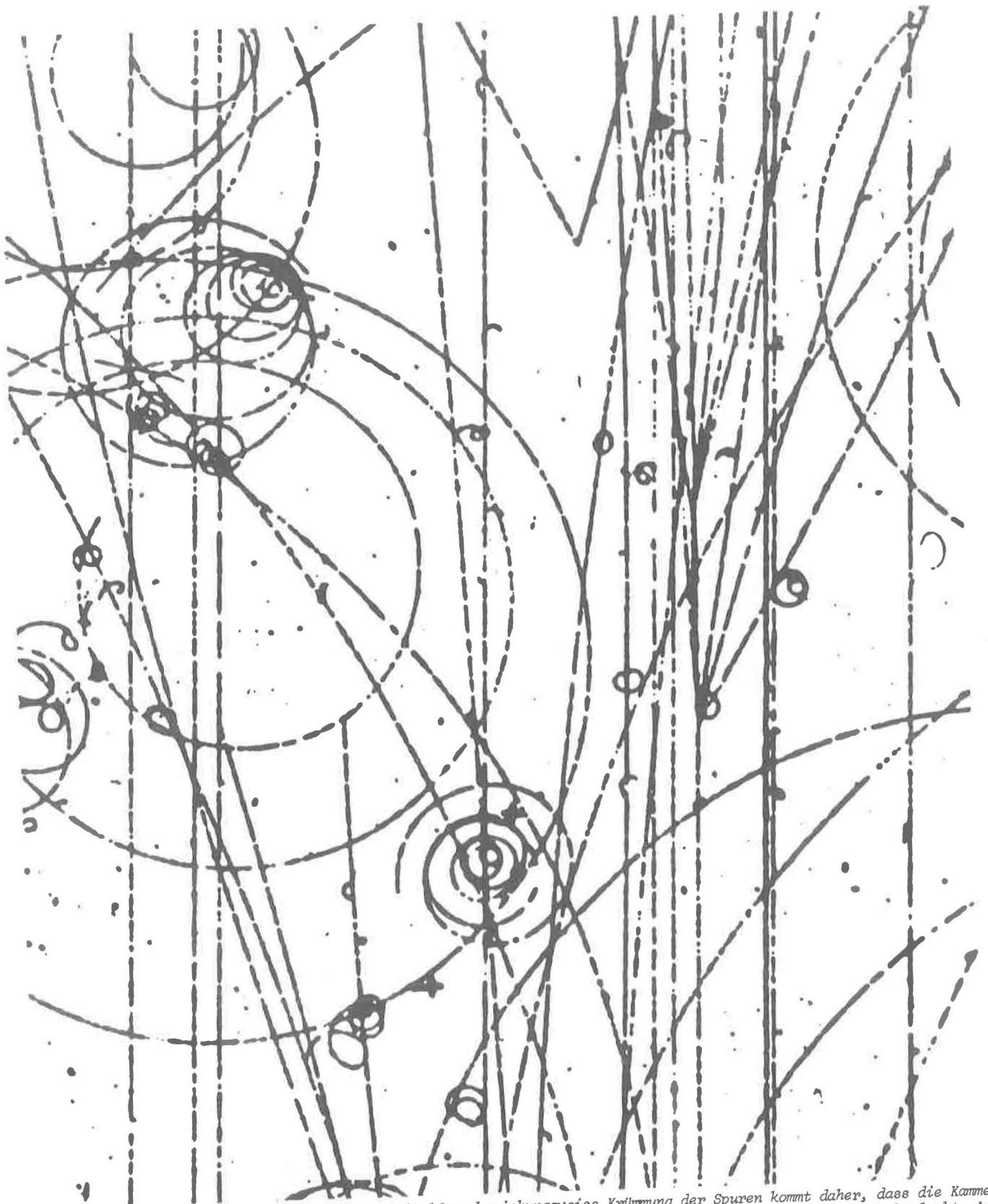
Aufgabe: Mit dem Finger dem Weg der Teilchen in alle sechs Experimente nachgehen.

Maßstab des Plans beachten!





Erzeugung von Materie: Die Energie eines Teilchens (Pfeil unten am Bild) hat sich in achtzehn andere Teilchen verwandelt, von denen man die Spuren sieht. Dieses Bild wurde in einem Detektor gemacht, den man BLASENKAMMER nennt. Eine Blasenkammer ist mit einer Flüssigkeit gefüllt, und die Teilchen, die hindurchfliegen, hinterlassen eine Spur von ganz feinen Bläschen.



Detail einer Blasenkammer-Aufnahme. Die Spiralform beziehungsweise Krümmung der Spuren kommt daher, dass die Kammer in einem Magnetfeld steht. Je mehr Wucht die Teilchen haben, desto weniger werden sie vom Magnetfeld abgelenkt. Aus der Krümmung der Spuren kann man Rückschlüsse auf die elektrische Ladung, die Masse und die Geschwindigkeit der Teilchen ziehen. Es gibt noch viele andere Detektorarten, vor allem elektronische Detektoren.

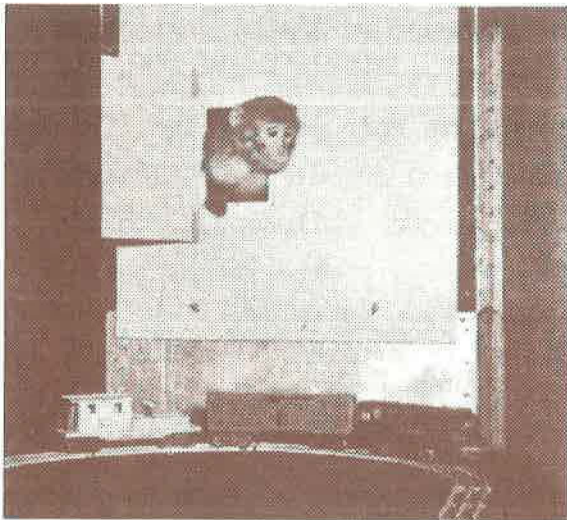
- Und wohin führt das alles?
- Das führt, auf manchmal recht verschlungenen Pfaden, dahin, dass wir besser verstehen, aus was die Welt aufgebaut ist, wie sie entstanden ist, wie ihre Struktur im Unendlich Kleinen (und, in gewissem Sinn auch im Unendlich Grossen) ist, wie die Grundgesetze der Natur lauten und vielleicht auch, wie das Universum eines Tages enden wird ...

Seit Jahrhunderten geht das Denken der Menschen dahin, den Aufbau der Materie und die Gesetze des Universums zu verstehen. Schon in der Antike fragten sich die Philosophen, woraus die Welt gemacht sei. Einige dachten, man könne alles Bestehende zurückführen auf die vier Elemente Luft, Erde, Feuer und Wasser ... Ein griechischer Philosoph, Demokrit, gab schon vor 2400 Jahren Gründe dafür an, dass die Materie aus ganz kleinen Teilchen verschiedener Art aufgebaut sein müsse.



Heute weiss man, grossenteils dank unserer Beschleuniger, Detektoren und Rechenanlagen, dass Demokrit nicht unrecht hatte. Die reine Forschung von heute arbeitet also an Fragen, die so alt sind wie die Welt.

Bei CERN forscht man, um zu wissen, aus reiner Neugier. Wir alle sind neugierig, alle Menschen, selbst die Tiere. Wenn uns etwas geheimnisvoll vorkommt, treibt es uns um. Wissen, Erkunden, Verstehen sind menschliche Grundbedürfnisse.

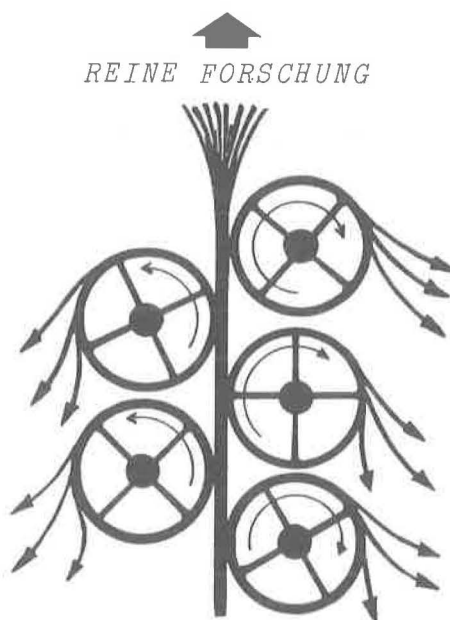


Schimpanse, fasziniert von einer Spielzeug-Eisenbahn. Auch die Tiere, selbst viel primitivere als Affen, kennen die Neugier. Um sie zu befriedigen, riskieren sie manchmal ihr Leben.

Die Neugier führt zu Entdeckungen. Zunächst helfen uns wissenschaftliche Entdeckungen meist nur, die Welt besser zu verstehen und ein einheitlicheres Bild der Natur zu bekommen. Sie haben scheinbar keinen praktischen Nutzen, wenigstens in absehbarer Zukunft. Aber der Nutzen kommt manchmal nach. Ein Blick um uns zeigt uns viele Dinge, die wir täglich brauchen, ohne dass wir dabei an die Forschung denken, aus der sie hervorgegangen sind, etwa den Radioapparat, den Fernseher, den Taschenrechner und so weiter. Die Forschung dient also nicht nur der menschlichen Neugier, sie kann im Laufe der Zeit auch Resultate von praktischem Nutzen hervorbringen.

Ausserdem braucht die Forschung für ihren eigenen Fortschritt spezielles Gerät, das eigens für sie entwickelt und gebaut wird. Manchmal führen Erfindungen hier zu technischen Fortschritten, die ihrerseits der Industrie nützen und die sich schliesslich auch auf unser Alltagsleben auswirken.

- Zum Beispiel?
- Zum Beispiel etwa wurde bei CERN eine Positronen-Kamera entwickelt, mit der man dreidimensionale Bilder in der Art von Röntgen-Aufnahmen machen kann, und die in Biologie und Medizin auf grosses Interesse stösst ... aber wir müssen uns immer vor Augen halten, dass bei CERN das Wesentliche die reine Forschung ist.

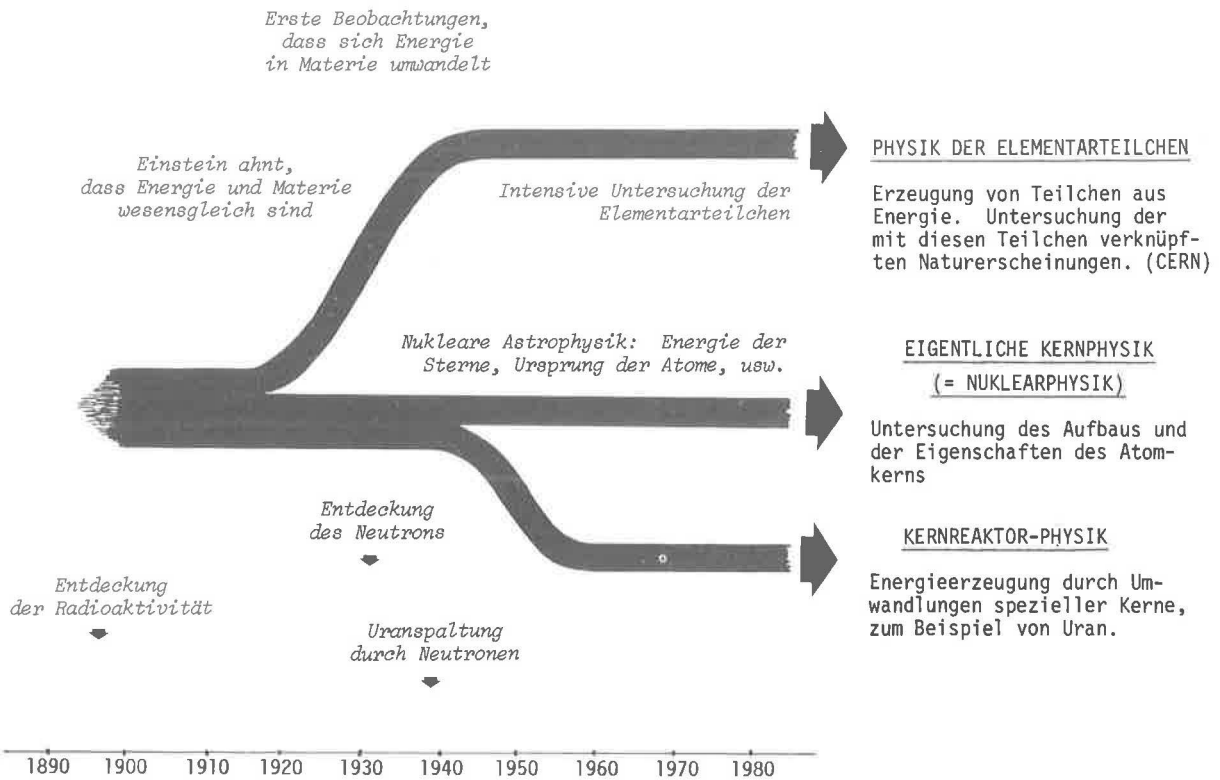


So könnte man den Fortschritt in der Elementarteilchen-Forschung darstellen. Auch wenn die reine Forschung selbst keine unmittelbaren technischen Anwendungen sucht, benützt sie doch viele Techniken (Räder), wird von ihnen angetrieben und treibt sie selbst an. Davon profitieren dann andere Gebiete (Pfeile nach rechts und links), zum Beispiel ultraschnelle Elektronik, Höchstvakuum, spezielle Magneten, neue Schweisstechniken, Tieftemperaturtechnik, und so weiter ...

- Steht nicht das N in CERN für Nuklearforschung? Haben die CERN-Experimente auch mit Kernkraftwerken zu tun?
- Nein, CERN hat mit Kernkraftwerken absolut nichts zu tun.
- Warum heisst es dann Nuklearforschung? Wo ist der Unterschied?
- Kernkraftwerke erzeugen Energie aus bestimmten Arten von Materie (Uran, Plutonium); sie produzieren so Wärme und Strom. CERN dagegen bringt kleine Energiemengen auf die höchstmögliche Konzentration, so dass Materie entsteht, allerdings in sehr bescheidenen Mengen, weit weniger als ein Milligramm in 25 Jahren Experimentierzeit.

Der Unterschied ist also: Kernkraftwerke erzeugen Energie aus Materie, CERN dagegen erzeugt Materie aus Energie.

- Dann ist CERN also ein umgekehrtes Kernkraftwerk?
- Ja, in vieler Hinsicht ist es genau das Gegenteil von einem Kernkraftwerk .. Damit es noch klarer wird, ist hier ein Bild, das die Entwicklung der Nuklearforschung seit dem Ende des letzten Jahrhunderts skizziert.



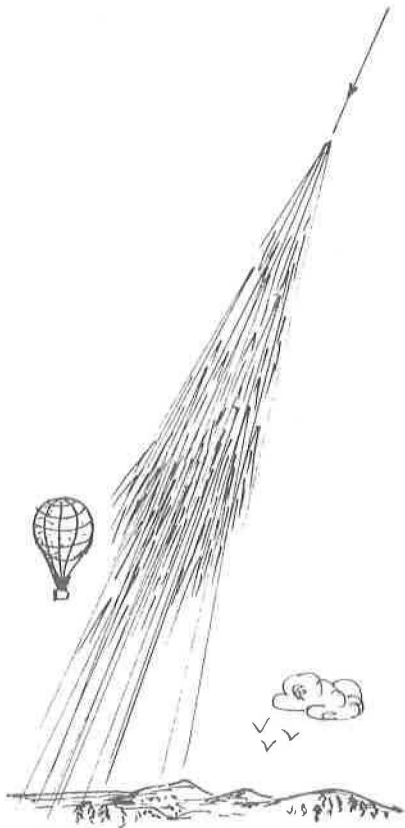
Sicher bleiben noch viele Fragen offen, wissenschaftliche, technische, ökonomische (etwa: lohnt es sich wirklich, all diese Forschung zu betreiben?), soziologische (wie funktioniert so eine internationale Organisation? was motiviert die Forscher, die darin arbeiten?) oder psychologische (kann unser Hirn überhaupt die Gesetze verstehen, die das Verhalten dieser bizarren Teilchen regieren?) und so weiter ...

Vielleicht finden einige dieser Fragen ihre Antwort auf den folgenden Seiten. Andere Fragen werden in Zeitschriften-Artikeln und Büchern behandelt, man muss fragen, suchen, nachdenken ... Forschen beginnt mit Nachforschen, und in irgendeiner Weise kann jeder daran teilnehmen. Fertige Antworten gibt es nicht oft. Das macht aber gerade den Reiz des Forschens aus.

FÜR DIE, DIE MEHR WISSEN WOLLEN

Es begann mit rätselhaften Strahlen aus dem Weltall

Zu Beginn unseres Jahrhunderts rätselte man über einer merkwürdigen Beobachtung. Luft hätte nach aller Theorie ein perfekter Isolator sein sollen; man fand jedoch, dass sie eine (wenn auch geringe) elektrische Leitfähigkeit besass. Einige Physiker vertraten die Meinung, die Leitfähigkeit entstünde infolge eines Bombardements unserer Atmosphäre durch Teilchen aus dem Weltall; es gab aber auch andere Erklärungsversuche. Ein österreichischer Physiker, Victor F. Hess, unternahm Ballonflüge und zeigte, dass Luft in grosser Höhe in der Tat viel besser leitet als am Boden, was die Weltraumstrahlen-Hypothese stützte. Aber erst in den Zwanziger Jahren setzte sie sich allgemein durch. Man sprach nun von 'kosmischen Strahlen' oder 'kosmischen Teilchen'.



Ein Teilchen'schauer', ausgelöst von einem kosmischen Teilchen (Proton), das mit Luftteilchen der Erdatmosphäre zusammengestossen ist. Er macht die Luft elektrisch leitend. Je höher man in der Atmosphäre geht, desto mehr Schauerteilchen findet man. Am Boden sind es nur wenige, da die meisten auf dem Weg durch die Atmosphäre zerfallen.

Heute wissen wir, dass es sich um Teilchen (vor allem Protonen) von sehr hoher Geschwindigkeit handelt. Das Geheimnis ihres Ursprungs ist noch immer nicht völlig geklärt. Diese Teilchen haben es uns ermöglicht, bereits in den Dreissiger-Jahren erstmals Umwandlungen von Energie in Materie zu beobachten.

Man kann CERN als ein Laboratorium bezeichnen, das mit Hilfe von Beschleunigern kosmische Strahlen künstlich erzeugt, um sie dann zu untersuchen. Beschleuniger liefern Teilchen in grosser Zahl (viel mehr als man aus dem Kosmos bekommen kann) gebündelt nach exaktem Programm und unter optimalen Beobachtungsbedingungen. Die echten kosmischen Strahlen muss man nehmen, wie die Natur sie liefert. Aber noch heutzutage wird auch mit echten kosmischen Strahlen experimentiert, denn deren Energie übersteigt noch bei weitem die Energie, die man mit irdischen Maschinen erzielen kann.

Die Theorie war schneller als das Experiment

Um die Mitte des 19. Jahrhunderts hatte man bereits recht klare Ansichten über den Begriff der Energie, aber niemand hätte sich träumen lassen, dass Materie aus Energie entstehen könnte. Erst Einstein näherte sich im Jahre 1905 diesem Gedanken. Er entdeckte, dass unter bestimmten Bedingungen Energie sich verhält, als hätte sie eine Masse. Nach und nach fand man, dass nicht nur Energie immer eine Masse hat, sondern dass überhaupt jede Masse (das heisst letztlich alle Materie) als eine Form kondensierter Energie betrachtet werden kann.



Einstein 1905

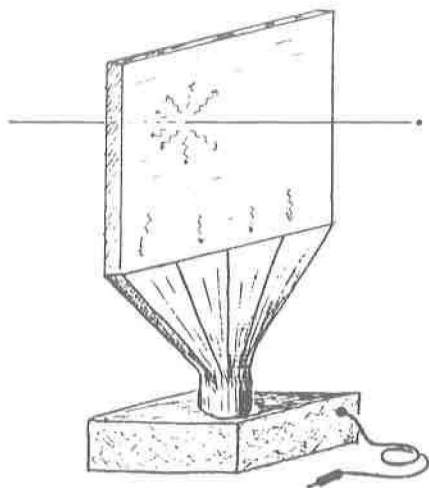
Die berühmte Einsteinsche Formel $E = mc^2$ drückt genau das aus: 25 Millionen Kilowattstunden 'wiegen' 1 Gramm; umgekehrt braucht man zur Herstellung von 1 Gramm Materie 25 Millionen Kilowattstunden, das ist mehr Energie als alle Elektrizitätswerke der Schweiz innerhalb von 6 Stunden erzeugen. (Man brauchte ausserdem noch ein Verfahren, diese Energie entsprechend zu komprimieren, aber das wäre ein noch viel schwierigeres Problem als die Energiebeschaffung; deshalb beschränken wir uns auf das Gedankenexperiment.)

Die ersten Detektoren

Bei der Erforschung des Wesens der Energie und der kosmischen Strahlung erfanden und entwickelten die Wissenschaftler neue Beobachtungsmethoden.

Bis etwa 1912 beruhten alle Untersuchungen der kosmischen Strahlung auf Messungen der Leitfähigkeit der Luft. Über das Verhalten der kosmischen Teilchen im einzelnen war daraus wenig zu entnehmen. In der Tat stand damals nicht fest, dass es sich um Teilchen handelte.

Später kamen die Zähler auf, die ein elektrisches Signal geben, wenn sie von einem Teilchen getroffen werden. Damit kann man wesentlich genauer bestimmen, wann und wo ein Teilchen durchgegangen ist.



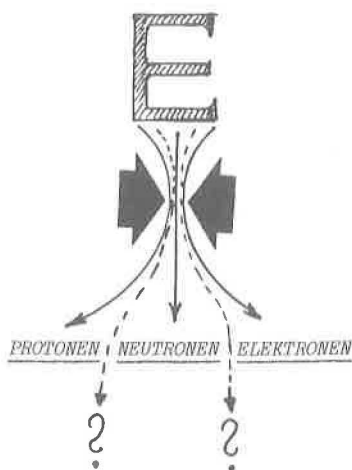
Beispiel eines elektronischen Detektors: Szintillator in Verbindung mit einem Photovervielfacher. Wenn ein Teilchen durch den Szintillator (im allgemeinen ein geeignetes durchsichtiges Plastikmaterial) hindurchgeht, erzeugt es einen (schwachen) Lichtimpuls, der vom Photovervielfacher in ein elektrisches Signal umgewandelt wird.

Zwei neue Hilfsmittel führten zu vielen wichtigen Entdeckungen: die photographische Emulsion, die die Flugbahn der Teilchen, die sie durchqueren, in Form von kettenartigen Spuren aus winzigen Silberkörnchen festhält, und die berühmte Nebelkammer, entwickelt von C.T.R. Wilson, in der die Teilchenspur als ein feiner Nebelstreifen sichtbar wird, ähnlich dem Kondensstreifen eines Flugzeugs in grosser Höhe.

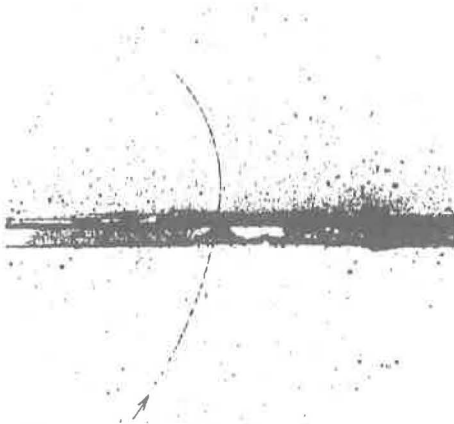
Zähler, photographische Emulsionen und Nebelkammern (oft kombinierte Apparate aus einer Nebelkammer und vielen Zählern) waren von den Zwanziger- bis zum Beginn der Sechziger-Jahre die wichtigsten Werkzeuge der Teilchenphysik.

Die Teilchenliste verlängert sich

Um 1930 kannte man zwei fundamentale Teilchen: das elektrisch positiv geladene Proton und das elektrisch negativ geladene Elektron. (Sie waren anderweitig entdeckt worden, nicht im Zusammenhang mit kosmischer Strahlung oder Energieumwandlung in Materie.) Man versuchte, den Aufbau der Materie aus diesen beiden Teilchen zu verstehen, aber man stiess auf beträchtliche Schwierigkeiten. Heute wundert uns das nicht. Es fehlte noch ein entscheidendes Teilchen, das Neutron, das erst 1932 entdeckt wurde. Mit Protonen, Neutronen und Elektronen aber wurde es möglich, fast alle Eigenschaften der Atome zu erklären.



Bedeutete das nun aber, dass Energie, wenn sie kondensiert, sich nur in diese drei Teilchen verwandelt?



Diese Spurenaufnahme machte Physikgeschichte: Nebulakammeraufnahme des ersten je beobachteten Positrons (1932).

Keineswegs. 1928 stellte ein englischer Theoretiker, Paul A.M. Dirac, eine Gleichung auf, derzufolge es auch 'umgekehrte' Elektronen, 'Anti-Elektronen' oder 'Positronen', geben sollte; im Gegensatz zum normalen Elektron sollte das Positron elektrisch positiv geladen sein. Die Bestätigung liess nicht auf sich warten: 1932 fand man auf einer Nebulakammer-Aufnahme die unverkennbare Spur eines Positrons. Es folgten Voraussagen und Entdeckungen neuer Teilchen und neuer Vorgänge am laufenden Band, in einem Tempo, das niemand für möglich gehalten hätte.

So sagte ein Schweizer, Wolfgang Pauli, 1930 ein neues neutrales Teilchen, das Neutrino, voraus. Dieses Teilchen sollte unter anderem die bemerkenswerte Eigenschaft haben, praktisch unentdeckbar zu sein. Es wurde 1956 dennoch entdeckt. Nebenbei: CERN besitzt derzeit die leistungsfähigste Neutrino-Versuchsanlage der Welt.



Ein kosmisches Proton hoher Geschwindigkeit ist mit einem ruhenden Proton in einer photographischen Emulsion kollidiert. Die Bewegungsenergie des einfallenden Protons wandelt sich in einen Schauer von 28 Teilchen, hauptsächlich Pi-Mesonen, um.

1935 sagte ein Japaner, Hideki Yukawa, ein instabiles Teilchen voraus, das Pi-Meson oder Pion, das 1947 entdeckt wurde. Und auf der Suche nach diesem Teilchen entdeckte man beiläufig ein anderes instabiles, recht eigenartiges Teilchen, eine Art schweres Elektron: das Myon.

Eine ganze Familie von 'Hyperonen', das sind schwere, instabile, protonenartige Teilchen, wurde zwischen 1947 und 1964 entdeckt: Teilchen, denen man Namen wie Lambda, Sigma, Xi und Omega gab, ferner andere, neue Mesonen ähnlich dem von Yukawa vorhergesagten Pi-Meson, alle instabil und alle entstanden durch Umwandlung von Energie in Materie.

Das Aufkommen der Beschleuniger

Bereits in der ersten Hälfte unseres Jahrhunderts gab es kleine Protonen- und Elektronen-Beschleuniger. Aber die Protonen bzw. Elektronen erreichten nicht die Energien, die nötig gewesen wären, um bei Zusammenstößen Materie zu erzeugen.

Erst in den Fünfziger-Jahren erreichte ein Beschleuniger diese Grenze: das 'Bevatron' in Berkeley (USA), ein sogenanntes Synchrotron, das Protonen durch elektrische Kräfte beschleunigt und durch starke Elektromagnete auf einer Kreisbahn führt, erzeugte 1955 erstmals Anti-Protonen und später auch Anti-Neutronen.



Einer der ersten grossen Beschleuniger der Nachkriegszeit.

Diese Teilchen waren bereits in den Dreissiger-Jahren vorhergesagt worden. Aber auch in der Forschung geht es nicht ohne Geduld und Ausdauer; man musste erst Beschleuniger der nötigen Grösse entwickeln. Die ersten Beschleuniger waren einige Zentimeter gross, dann einige Dezimeter; bald überschritt man die Meter- und Zehnmetergrenze (und die Masse von tausend Tonnen). Das 'kleine' CERN-Synchrotron, das PS, hat einen Durchmesser von 200 Metern, das grosse, das SPS, einen von 2,2 Kilometern; das im Bau befindliche Synchrotron LEP, in dem Elektronen mit Positronen kollidieren, wird einen Durchmesser von über 8 Kilometern haben.

Warum sind Beschleuniger so gross?

Zunächst sei bemerkt, dass man für einen Beschleuniger von 8 km Durchmesser keine ebensogrosse Halle braucht; der Beschleuniger wird in einem Tunnel installiert, der als Ring von 8 km Durchmesser in unterirdischen Fels gebohrt wird. Die Tunnelröhre wird eine lichte Weite von etwa vier Metern haben.

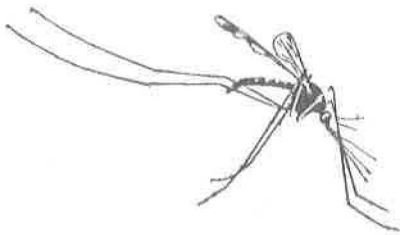


Blick in den Tunnel des grossen CERN-Synchrotrons (SPS). Ringdurchmesser 2,2 km; Protonenenergie über 400 GeV.

Der Hauptgrund für die riesigen Abmessungen solcher Protonen- bzw. Elektronenschleudern ist, dass man die Elektromagnete, die die Teilchen auf ihrer Bahn halten und so die Rolle der Schleuderschnur übernehmen, nicht beliebig stark machen kann. Je kleiner aber der Durchmesser des Beschleunigers ist, desto mehr Kraft braucht man, um die Teilchenbahn entsprechend zu krümmen. Wenn man diese Kraft nicht hat, weil die Magnete zu schwach sind, muss man den Kreis grösser machen, so, wie man die Kurvenradien bei Autobahnen vergrössert, damit Fahrzeuge auch bei 130 km/h nicht ausbrechen.

Bei Elektronen liegt das Problem noch etwas anders. Wenn man Elektronenbahnen zu stark krümmt, strahlen die Elektronen Licht ab und verlieren entsprechend Energie, die dann für die Kollisionsreaktion fehlt. Deshalb muss der Durchmesser des LEP-Ringes, in dem Elektronen beschleunigt werden, so gross sein.

Energiemasstäbe bei Hochenergiephysikern und bei Mücken



Wer nun aber annimmt, dass Teilchen, die kaum langsamer als das Licht durch solch eine Riesenmaschine rasen, eine gigantische Energie besitzen, der irrt sich. Die Teilchen in unseren grössten Beschleunigern haben kaum die Bewegungsenergie von Mücken. Darauf kommt es aber nicht an. Entscheidend ist, dass Elementarteilchen viel kleiner sind als Mücken, und dass deshalb ihre Energie ausserordentlich konzentriert ist. Deshalb entstehen beim Zusammenstoss zweier Mücken weder neue Mücken noch neue Elementarteilchen, (die Vermehrung der Mücken erfolgt, wie man weiss, auf ganz andere Weise!), wohl aber beim Zusammenstoss zweier Protonen oder Elektronen gleicher Energie.

Hier muss der Ausdruck GeV ('Giga-Elektron-Volt') erklärt werden, der oft Verwirrung stiftet. Man sagt, ein Beschleuniger 'macht' so-und-so viel GeV. Was heisst das?

Das GeV ist die Energieeinheit der Teilchenphysik. Man kann es in 'normale' Einheiten umrechnen: $1 \text{ GeV} = 0.000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 05$ Kilowattstunden. 1 GeV ist ungefähr die Energie, die man kondensieren muss, um ein Proton zu erzeugen. Der grosse CERN-Beschleuniger SPS bringt Protonen auf eine Energie von etwa 400 GeV.

**1 GeV =
eine Milliarde Elektron-Volt,**

**das heisst
ungefähr**

**die Energie, die man kondensieren
muss, um ein Proton zu erzeugen,**

das heisst

**ein Millionstel der kinetischen
Energie einer fliegenden Mücke**

'Giga' bedeutet Milliarde; bei typischen Elementarteilchen-Reaktionen werden also Milliarden von Elektron-Volt umgesetzt! Da staunt der Laie - und lässt sich bluffen; er denkt an Hochspannungsanlagen im Milliarden-Volt-Bereich und an Science Fiction, anstatt schlicht auf weniger inflationäre Einheiten umzurechnen.

Ein Elektron-Volt ist nämlich eine so winzige Energie, dass selbst eine Milliarde davon noch fast nichts ist. Ein vom Tisch fallender Bleistift hat eine Energie von einer halben Milliarde Giga-Elektron-Volt - etwa eine Million mal so viel wie die Protonen im grossen CERN-Beschleuniger SPS! Es sei dem geneigten Leser überlassen, den Ausdruck 'Hochenergie-Physik' zu kommentieren! (Literaturhinweis: Das Märchen vom tapferen Schneiderlein: Sieben auf einen Streich - aber Fliegen, nicht Menschen!)

Wiederholen wir:

- Es ist keine Kunst, einem Objekt eine Energie von Milliarden von Elektron-Volt zu geben; die Kunst besteht darin, diese Energie einem so kleinen Objekt wie einem Proton zu erteilen.
- Wenn 'normalkleine' Objekte, zum Beispiel Mücken, mit Energien von Milliarden von Elektron-Volt zusammenstossen, passiert ihnen gar nichts (wohl kaum eine Beule!). Wenn bei einer Kollision Energie in Materie umgewandelt werden soll, muss sie auf kleinere Dinge, z.B. auf einzelne Protonen, konzentriert werden.

Wir bestehen aus punktförmigen Körnchen, die im leeren Raum um Dreiergruppen ähnlicher Körnchen kreisen

Die wirklich elementaren Teilchen kann man sich anschaulich kaum vorstellen: Es handelt sich um Materiekörnchen, die eine ganz bestimmte Masse haben, aber unmessbar klein sind, sozusagen Pünktchen von kondensierter Energie. Es gibt davon zwei Sorten: Die eine, zu der die Elektronen, Myonen und Neutrinos gehören, tritt stets als Einzelgänger auf; die andere, man nennt sie 'Quarks', bildet stets Zweier- oder Dreiergruppen.

Wenn Quarks Zweiergruppen bilden, entstehen die auf Seite 30 erwähnten Mesonen, die sämtlich instabil sind. Wenn sie Dreiergruppen bilden, entstehen teils mehr oder weniger stabile Teilchen, wie das Proton und das Neutron, zum Teil auch instabile Teilchen, wie die ebenfalls auf Seite 30 erwähnte Familie von Hyperonen.

*Der Himmel
die Erde
der Wind
das Meer
die Bäume
die Tiere
die Menschen
all das
und alles sonst
besteht aus
u-Quarks
d-Quarks
Elektronen
und leerem Raum*

Beschränken wir uns auf stabile Teilchen, die nämlich, die unseren Körper und die uns umgebende Materie bilden, dann ergibt sich eine sehr kurze Liste von 'Bausteinen':

- In der Kategorie der Einzelgänger das Elektron,
- In der Kategorie der Gruppenbildner das u-Quark und das d-Quark,

fertig!

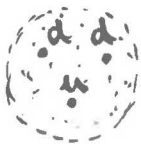
Vom Elementar-Baustein zur Kuh

Wir wollen nun eine Kuh zusammenbauen aus Elektronen sowie u- und d-Quarks. (Wenigstens im Gedankenexperiment; die Realität ist natürlich etwas problematischer.)

1. Herstellung von Protonen: Man nehme jeweils zwei u-Quarks und ein d-Quark und verschmelze sie, dann erhält man ein Proton.
2. Herstellung von Neutronen: Man nehme jeweils ein u-Quark und zwei d-Quarks und verschmelze sie, dann erhält man ein Neutron.
3. Nachdem man einen ausreichenden Vorrat von Protonen und Neutronen hergestellt hat, lege man sich eine entsprechende Anzahl von Elektronen bereit: genausoviel Elektronen wie Protonen.
4. Herstellung der Atome. Arbeitsplan: Für eine Kuh braucht man vor allem Kohlenstoff, Sauerstoff, Wasserstoff und Stickstoff.



PROTON



NEUTRON



Rezept für Wasserstoff: Man nehme ein Proton und bringe ein Elektron in seine Nähe. Das positive Proton zieht das negative Elektron an und hält es bei sich fest.



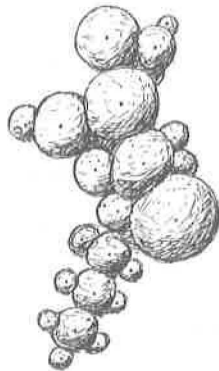
KOHLENSTOFF-ATOM

Dargestellt ist der Kern, der aus sechs Protonen und sechs Neutronen besteht. Bei massstabgerechter Darstellung würden sich die Elektronen in einigen hundert Meter Entfernung befinden. Dazwischen ist leerer Raum ...

Rezept für Kohlenstoff: Man nehme sechs Protonen sowie sechs oder sieben Neutronen und bringe sie so dicht zusammen, dass sie zu einer festen Kugel, dem Kohlenstoffkern, verschmelzen. Dann lasse man in der Nähe dieses Kerns sechs Elektronen los: sie werden wie beim Wasserstoff von dem positiv geladenen Kern elektrisch festgehalten.

Rezept für Stickstoff und Sauerstoff: Wie Kohlenstoff, aber 7 Protonen, 7 oder 8 Neutronen und 7 Elektronen für Stickstoff, 8 Protonen, 8 bis 10 Neutronen und 8 Elektronen für Sauerstoff.

Rezept für andere Elemente, z.B. Kalzium und Phosphor für die Knochen, Eisen für das Hämoglobin des Blutes: Man verfare analog; die Protonen- und Neutronenzahlen der benötigten Atomkerne sind der Fachliteratur zu entnehmen.



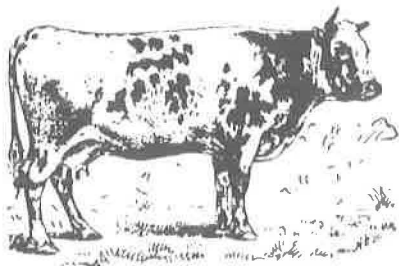
MOLEKÜL

Ein Gebilde aus Atomen.

5. Zusammenbau der Atome zu Molekülen:
Rezept für Wasser: Man nehme zwei Wasserstoffatome und ein Sauerstoffatom und befestige sie aneinander. Rezept für andere Substanzen: analog. Beachte: für komplizierte Moleküle braucht man manchmal hunderte oder tausende von Atomen!

6. Zusammenbau der Moleküle zu lebenden Zellen (viele Milliarden!): Kommentar überflüssig.

7. Sorgfältiger Zusammenbau der Zellen zur fertigen Kuh.



Nun wissen wir also, woraus die Kühe (und auch wir Menschen und die anderen Wesen) bestehen. Allerdings haben wir ein wenig geschummelt: Erstens haben wir gesagt 'Man nehme so-und-so viele Quarks', als ob die Quarks in der Natur herumlägen. Davon kann aber keine Rede sein. In der Tat, bis heute hat noch kein Mensch je ein einzelnes, isoliertes Quark beobachtet, und es sieht so aus, als ob man Quarks im Prinzip niemals wird anders haben können als in Zweier- oder Dreiergruppen. Wieso das so ist, ist eine der brennenden Fragen der modernen Forschung.



Ein kleiner Teil unserer Galaxie, die selbst nur ein winziger Teil des Universums ist. Jeder helle Punkt ist eine Sonne, die uns als schwacher Stern erscheint, weil sie so weit weg ist. In der Alltagssprache nennt man dieses Sternenband die Milchstrasse.

Zweitens haben wir über Baupläne nichts gesagt. Wer einmal zusammenbauen wollte, was ein anderer zerlegt hat, weiss, dass der Bauplan ebenso wichtig ist wie die Bauteile. Der Bauplan der Lebewesen ist in milliarden-jähriger Evolution entstanden. Jedes Lebewesen trägt seinen Bauplan, den ihm die Natur mitgegeben hat, in sich selbst, und zwar in einer Form, die es ihm erlaubt, Kopien davon für seine Nachkommen herzustellen. Wie ein Computer, der nach seinem Programm seinesgleichen zusammenbauen kann. Verstanden haben wir allerdings die Baupläne noch längst nicht; das ist ein anderes grosses und sehr interessantes Forschungsgebiet. Wie alle anderen Lebewesen empfangen wir blind unseren Plan und geben ihn blind an unsere Nachkommen weiter.

Was aber trotz all dieser Schummelei stimmt, ist dies: Alles besteht aus punktförmigen Körnchen, Elektronen, u-Quarks und d-Quarks, und diese Körnchen, alle Körnchen, die unseren Planeten und seine Bewohner bilden, sind vor zehn oder zwanzig Milliarden Jahren durch Kondensation von Energie entstanden.

Und doch existiert die Welt

Nach allem, was wir aus Theorien und Experimenten, wie sie bei CERN und anderswo gemacht werden, wissen, gibt es zu jedem Teilchen ein Gegenstück, ein 'spiegelbildliches' Teilchen, das wir Anti-Teilchen nennen. So gibt es Anti-Elektronen, die man üblicherweise Positronen nennt, und Anti-Quarks.

Anti-Teilchen haben merkwürdige Eigenschaften:

1. Wenn ein Teilchen auf das ihm entsprechende Anti-Teilchen trifft, vernichten sich die beiden gegenseitig; ihre Masse wandelt sich in reine Energie um, etwa in Licht bzw. Strahlung wie Röntgenstrahlung.
2. Wenn Energie kondensiert, entstehen sowohl Teilchen als auch Anti-Teilchen, und zwar in genau gleicher Anzahl.
3. Im übrigen haben die sich entsprechenden Teilchen und Anti-Teilchen zwar entgegengesetzte elektrische Ladung, aber sonst ganz analoge Eigenschaften.

Es ist anzunehmen, dass man aus Anti-Protonen (bestehend aus zwei Anti-u-Quarks und einem Anti-d-Quark), Anti-Neutronen (aus einem Anti-u-Quark und zwei Anti-d-Quarks) und Anti-Elektronen (= Positronen) Anti-Atome bilden kann, daraus Anti-Moleküle, Anti-Zellen und Anti-Kühe, natürlich auch Anti-Sterne und Anti-Planeten. Kurz, aus Anti-Teilchen, die sich organisieren, müsste Anti-Materie entstehen. Und man muss sich fragen, ob es im Weltall vielleicht tatsächlich Ansammlungen solcher Anti-Materie gibt.

Die Lösung dieses Rätsels, das letztlich die Frage enthält, wieso wir existieren können, ist Gegenstand der gegenwärtigen Forschung - dies allein ist Grund genug, sie fortzusetzen.

Wo stehen wir heute?

Die moderne Teilchenphysik gibt ein im Prinzip recht einfaches Bild der Welt. Schwieriger zu beschreiben als die Teilchen selbst sind allerdings die 'Wechselwirkungen' oder 'Kräfte' zwischen ihnen. Manche dieser Kräfte machen sich im Alltag bemerkbar: die Gravitation oder Schwerkraft, durch die die Sternsysteme zusammengehalten werden, und die elektrischen und magnetischen ('elektromagnetischen') Kräfte, die wir aus der Elektrotechnik kennen.

Andere Kräfte machen sich im Alltag nicht direkt bemerkbar, weil ihre Reichweite selbst im Vergleich zu atomaren Abmessungen winzig ist. So gibt es die 'starke Kraft', die die Protonen und Neutronen im Atomkern (Seiten 33 u. 34) und die Quarks in den Protonen und Neutronen zusammenhält (Seite 35). Und es gibt die 'schwache Kraft', die für die Instabilität vieler Teilchen verantwortlich ist (Seite 11).

Wie aber können solche Kräfte aus der Ferne wirken, durch den leeren Raum hindurch, der die Teilchen umgibt? Moderne Theorien führen die Kräfte auf sogenannte "Botenteilchen" zurück, die von den Elementarteilchen ausgesandt und dann wieder eingefangen werden. Eigentlich sollte man nicht Teilchen sagen, denn die Boten haben wesentlich andere Eigenschaften als die Materieteilchen, von denen bisher die Rede war. Hier aber versagt die Sprache des Alltags.

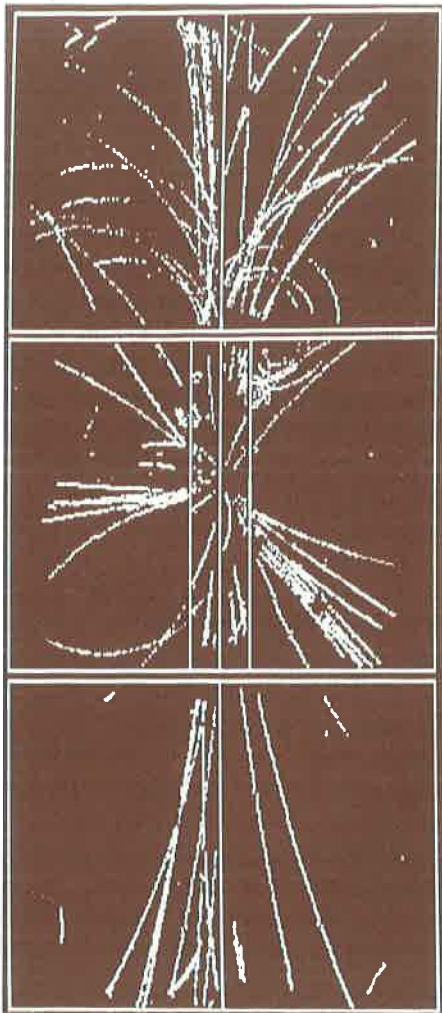
Worum geht es: Die immense Vielfalt der Dinge, der Strukturen und der Erscheinungen im Universum als Ausdruck einer ganz kleinen Zahl von Naturgesetzen zu verstehen, denen die Elementarteilchen unterliegen, die aus der Kondensation von Energie entstanden sind.

Und wie weit wird man kommen?

Wie wir gesehen haben, verfolgt die Elementarteilchen-Physik das Ziel, die Welt als eine Struktur von Teilchen, Körnchen und Boten, wie wir sie genannt haben, zu verstehen und sie als solche klar, zusammenhängend und einheitlich zu beschreiben. Wird man dieses Ziel erreichen? Auch unter Physikern sind die Meinungen geteilt.

- Die einen glauben, dass man eines Tages am Ziel sein wird, und dass dann die Forschung sich zu den komplexeren Geschehen in Astronomie, Physik, Biologie (etwa den Funktionen des menschlichen Gehirns) zuwenden wird.
- Andere glauben dagegen, dass es immer neue grundlegende elementare Entdeckungen in der Welt des Kleinsten geben wird.
- Einige schliesslich glauben, dass die notwendigen Forschungsanlagen eines Tages endgültig die den Menschen verfügbaren technischen (und intellektuellen?) Möglichkeiten überschreiten werden.

Wer hat recht? Nur die Zukunft kann es sagen.
Die Forschung geht weiter.



Durch sorgfältige Analyse von Millionen von Teilchenspuren wie diesen, die aus einer sogenannten Driftkammer stammen, gelangt man zu Evidenz über den lang gesuchten Boten der schwachen Wechselwirkung, das W-Boson.

Beispiel einer Entdeckung aus jüngster Zeit: die Boten-Bosonen der schwachen Kraft

Wohl eine der wichtigsten Entdeckungen, die bei CERN gemacht wurden, wurde im Januar 1983 bekanntgegeben. Es wurden Ereignisse beobachtet, die sich als erste direkte Evidenz für die Botenteilchen der schwachen Kräfte deuten lassen. Man spricht auch von "Bosonen" (abgeleitet vom Namen eines indischen Physikers, S.N. Bose). Sie waren seit Jahren theoretisch gefordert und experimentell gesucht worden.

Die Theorie, die die Bosonen richtig vorausgesagt hatte, die nun also eine wichtige Bestätigung gefunden hat, macht aber noch viel weitergehende Aussagen. So wie man im 19. Jahrhundert gelernt hat, dass man elektrische und magnetische Kräfte durch ein einheitliches Gleichungssystem beschreiben kann, versucht sie, die elektromagnetischen und die schwachen Kräfte durch gemeinsame Gleichungen zu beschreiben. Die Entdeckung des Bosons könnte darauf hindeuten, dass man auf dem richtigen Weg zur grossen Einheit ist. Vielleicht lassen sich einmal alle Kräfte verstehen, die es gibt, alle Formen, die die Energie annehmen kann, wenn sie sich zu Materie verdichtet. Für diesen Nachweis erhielten zwei der am CERN arbeitenden Wissenschaftler, Carlo Rubbia und Simon von der Meer, den Physik-Nobelpreis 1984.

Als Abschluss dieser kurzen Einführung in die Elementarteilchenphysik wollen wir zum Konkreten zurückkommen und einen kurzen Blick (nicht ohne Blinzeln) auf eines der grössten Forschungslaboratorien auf diesem Gebiet werfen: auf CERN.

CERN ALS ORGANISATION:

EIN BISSCHEN GESCHICHTE (UND AUCH EIN BISSCHEN STOLZ)

CERN, mit Sitz in Meyrin bei Genf, gelegen auf der Grenze zwischen Frankreich und der Schweiz, ist eines der grössten Forschungslabors der Welt auf dem Gebiet der Elementarteilchen-Physik. Grössen- und bedeutungsmässig vergleichbare Einrichtungen gibt es nur noch in den Vereinigten Staaten und in der Sowjetunion. CERN wurde 1954 von zwölf westeuropäischen Staaten gegründet und vereinigt den Grossteil des europäischen Forschungspotentials auf diesem Gebiet (*). Die Konzentration war ein Hauptargument für seine Gründung:

1945 lag Europa nach sechs Kriegsjahren geschwächt und verarmt am Boden. Allen Staaten fehlte es an Mitteln, individuell die kostspieligen Einrichtungen zu finanzieren, die die moderne Forschung braucht. Deshalb wanderten viele europäische Wissenschaftler in die Vereinigten Staaten aus, wo es hochmoderne, vorzüglich ausgestattete Laboratorien gab. Im wesentlichen, um sie zurückzuhalten, beschlossen die zwölf Staaten, ihre Mittel zusammenzulegen und CERN als gemeinsames Forschungslaboratorium zu gründen, um das zu fördern, was man damals 'Kernforschung' oder 'Nuklearforschung' nannte.

Genaugenommen handelt es sich um Elementarteilchen-Physik, also um die Erforschung der elementaren Struktur der Materie, eine Forschungsrichtung, die nur weitläufig mit der Physik der Kernspaltung (die untersucht, wie man durch Spaltung etwa von Uranatomen Energie gewinnen kann) zusammenhängt. Die Gründungskonvention definiert übrigens die Aufgaben von CERN sehr genau; sie untersagt ausdrücklich jede militärische Forschung und schliesst auch das Missverständnis von CERN als einer Einrichtung zur Produktion von Kernenergie aus. Einzige Aufgabe von CERN ist die Erforschung der Umwandlung von Energie in Materie und all dessen, was damit zusammenhängt: wie also Materie entsteht und aufgebaut ist und wie die fundamentalen Naturgesetze aussehen, die diesen Aufbau regeln.

(*) 1986 zählt CERN vierzehn Mitgliedstaaten, nämlich : Belgien, Bundesrepublik Deutschland, Dänemark, Frankreich, Griechenland, Italien, Niederlande, Norwegen, Österreich, Portugal, Schweden, Schweiz, Spanien und Vereinigtes Königreich.

Die Gründung von CERN ermöglichte den europäischen Physikern die Fortführung ihrer Forschung auf dem hohen Niveau, das vor dem Krieg erreicht worden war; der Rückstand gegenüber den USA wurde aufgeholt. CERN knüpfte damit an alte europäische Traditionen internationalen wissenschaftlichen und kulturellen Austauschs an und trug so zu erneuten freundschaftlichen und fruchtbaren Kontakten zwischen den ehemals verfeindeten Ländern bei.

Heute arbeiten über 3000 Forscher aus Europa und aus aller Welt bei CERN. Gewöhnlich 'laufen' einige Dutzend Experimente gleichzeitig. Sie werden durchgeführt von international gemischten Teams ('Kollaborationen'); in der Regel sind verschiedene nationale Forschungslaboratorien an diesen Experimenten beteiligt.

Die Forschungsergebnisse lassen sich nicht leicht in einfachen Worten aufzählen. Aber es ist bekannt, dass während der gut drei Jahrzehnte des Bestehens von CERN eine Reihe von wichtigen Entdeckungen gemacht wurden. Dazu trugen die hochgezüchteten 'Maschinen' (Beschleuniger und Nachweisgeräte), die bei CERN von Spezialisten, Physikern, Ingenieuren und Technikern, gebaut wurden, wesentlich bei. Die äusserst fruchtbare Verbindung von Wissenschaft und Technik hat es in jüngster Zeit zum Beispiel ermöglicht, Antiprotonen zu speichern und auf hohe Energie zu beschleunigen, was ganz neuartige Experimente erlaubt, bei denen Materie mit Antimaterie kollidiert.

Die internationale wissenschaftliche Zusammenarbeit bei CERN hat einmaligen Charakter; es gibt kein anderes internationales Forschungslaboratorium dieser Grössenordnung. Dabei kommen nicht allein die Wissenschaftler aus den verschiedensten Ländern; auch die Maschinen selbst werden in gemeinsamer Anstrengung von der europäischen Spitzenindustrie in verschiedenen Ländern gebaut. Nicht selten besteht ein Instrument, das auf den tausendstel Millimeter genau justiert sein muss, aus Komponenten, die tausende von Kilometern voneinander entfernt gebaut wurden.

CERN ist 'transparent' in dem Sinn, dass alle erzielten Forschungsergebnisse veröffentlicht und somit allen Forschern der Welt zugänglich gemacht werden. Auch technische Erfindungen, die bei CERN gemacht werden, sind öffentliches Eigentum; sie werden nicht patentiert, und jeder darf sie benutzen.

Oberstes Aufsichtsorgan von CERN ist der Rat der Organisation (Council), in dem alle Mitgliedstaaten vertreten sind. Er tritt jährlich zweimal zusammen. Ein Komitee europäischer und aussereuropäischer Physiker berät regelmässig über die grundsätzliche Orientierung der Forschung und unterbreitet seine Vorschläge dem Rat. Unter der Leitung eines Generaldirektors setzt die Verwaltung die Richtlinien des Rates in die Tat um; finanzielle Projekte grosser Tragweite werden dem Finanzkomitee zur Genehmigung vorgelegt, in dem wiederum alle Mitgliedstaaten vertreten sind. Das Jahresbudget von CERN beträgt im Jahre 1986 rund 755 Millionen Schweizerfranken. Pro Kopf der Bevölkerung der Mitgliedstaaten bedeutet das etwa drei Schweizerfranken.

Diese bescheidene Ausgabe hat es ermöglicht, mit CERN eines der Spitzenlaboratorien der Welt auf dem Gebiet der Grundlagenforschung aufzubauen. Der Wert dieses Laboratoriums besteht aber nicht nur in seinen Resultaten auf dem Gebiet der Physik. Die Konzentration erstklassiger Talente um die Forschung bei CERN hat für Europa einen kulturellen Wert, der sich nicht in Geld ausdrücken lässt.

INHALT

CERN ist ein Laboratorium für Elementarteilchen-Physik (3). Diese Teilchen entstehen durch Verdichtung von Energie zu Materie. Begriff der Wärme-Konzentration (5). Unabhängig von der Quantität verändert sich durch die Konzentration die Qualität (9). Was passiert, wenn die Energie sehr konzentriert ist (10). Die Entstehung der Teilchen (11). Der Ursprung der Materie (12). Näheres zur Umwandlung von Energie in Materie (14). Zusammenstösse von Erdbeeren und das Programm von CERN (17). Fahrplan für Experimente (18). Nachweisen und rekonstruieren, was passiert ist (19). CERN und die historische Entwicklung der Vorstellungen vom Aufbau der Materie (21). Neugier, reine Forschung und technologische Folgeprodukte (22). Die Elementarteilchen-Physik hat nichts mit Kernkraftwerken zu tun (24). Es gibt noch viel zu fragen ... (25).

* * *

Es begann mit rätselhaften Strahlen aus dem Weltall	27
Die Theorie war schneller als das Experiment	28
Die ersten Detektoren	28
Die Teilchenliste verlängert sich	29
Das Aufkommen der Beschleuniger	30
Warum sind Beschleuniger so gross?	31
Energiemassstäbe bei Hochenergie-Physikern und bei Mücken	32
Wir bestehen aus punktförmigen Körnchen	33
Vom Elementar-Baustein zur Kuh	34
Und doch existiert die Welt	36
Wo stehen wir heute?	37
Und wie weit wird man kommen?	38
Beispiel einer Entdeckung aus jüngster Zeit: die Boten-Bosonen der schwachen Kraft	39
CERN als Organisation	40

* * *