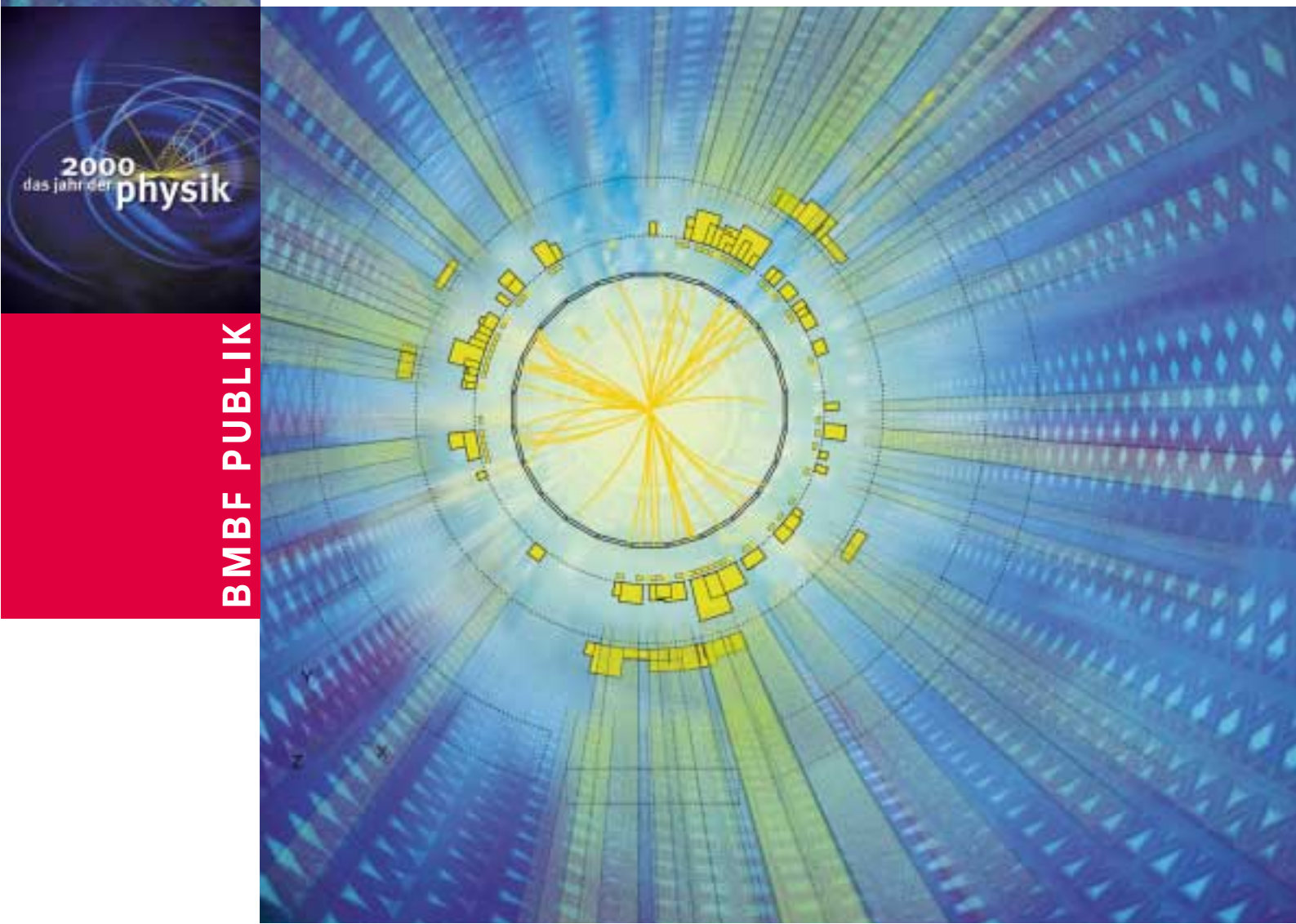
Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

bmb+f

Reise zum Urknall

Themenheft



BMBF PUBLIK

BMBF PUBLIK

Impressum

Herausgeber
Bundesministerium für Bildung und Forschung
(BMBF)
Referat Öffentlichkeitsarbeit
53170 Bonn
E-Mail: information@bmbf.bund.de
Internet: http://www.bmbf.de

Autoren
Astrid Dähn (*ad*), Frank Grotelüschen (*fg*),
Wolfgang Richter (*wr*)

Informationen zum Inhalt
Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V.
Pressestelle
Hauptstrasse 20 a
53604 Bad Honnef
Telefon: (0 22 24) 9 51 95-18
Telefax: (0 22 24) 9 51 95-19
E-Mail: presse@dpg-physik.de

Redaktion, Konzept und Gestaltung
Iser & Putscher
Kreativagentur für PublicRelations GmbH,
Bad Honnef

Bildnachweis:
Bilderberg: Peter Ginter, CERN, DESY, ESO, GSI, MPI für Kernphysik, Torsten Schmidt, Manfred Schultze-Alex, Universität Mainz: Robertino Nikolic

Titel
Große Abbildung: Eine Teilchenreaktion am Elektron-Positron Beschleuniger LEP (künstlerisch bearbeitet, Vorlage CERN)
Kleine Abbildung: Logo „2000: das Jahr der Physik“

2000 das jahr der physik

Reise zum Urknall

Themenheft

Titelseite:
Eine Teilchenreaktion am Elektron-Positron Beschleuniger LEP (künstlerisch bearbeitet, Vorlage: CERN)

Bild rechts:
Spuren von Teilchen, die aus einem zentralen Zusammenstoß von zwei Bleikernen resultieren. Computerdaten aus dem Experiment „NA49“. (Foto: CERN)

„Physik ist lebendig, aufregend und immer wieder überraschend. Sie beantwortet Fragen unter anderem nach Ursprung und Schicksal des Universums, der Struktur der Materie und der Entstehung von Leben auf unserem Planeten. Gleichzeitig besitzt sie eine Schlüsselfunktion in der modernen Technik“, so Alexander M. Bradshaw, Präsident der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG).
Beim Jahr der Physik arbeitet das Bundesministerium für Bildung und Forschung (bmb+f) eng mit der DPG zusammen. Neben fünf zentralen Veranstaltungen in Berlin und Bonn finden überall in Deutschland an Universitäten, an Forschungseinrichtungen und an Schulen Aktionen zur Physik statt.

Das Jahr der Physik finden Sie im Internet unter www.physik-2000.de

wissenschaft : im dialog

Die Bundesministerin für Bildung und Forschung, Edelgard Bulmahn, hat zusammen mit den großen Forschungsorganisationen die bundesweite Initiative „Wissenschaft im Dialog“ gestartet. „Wir müssen deutlich machen, dass Forschung für die Menschen da ist und gleichzeitig Innovation und Arbeitsplätze schafft“, so beschreibt die Ministerin den Leitgedanken der Initiative. Die Wissenschaft öffnet sich der Gesellschaft, indem aktuelle Erkenntnisse vieler Fachgebiete spannend, kontrovers und publikumsnah präsentiert werden. Die Initiative startet im Jahr 2000 mit dem Jahr der Physik.

Deutsche Physikalische Gesellschaft DPG

5 Vor Abflug
6 Wie funktioniert eigentlich... ein Teilchenbeschleuniger?
8 Alles Quark: Das Standardmodell
10 Der Webfehler der Welt
14 Geisterteilchen in der Waagschale
17 Kosmische Spuren im ewigen Eis
18 Supermikroskope für Protonen
20 Das Rätsel der kosmischen Ursuppe
23 Suche nach der Insel der Stabilität
26 Rezepte aus dem Kochbuch der Sterne
29 Schwere Geschütze gegen den Krebs
32 Teilchenbeschleuniger der Superlative
34 „Starkstrom“ für Kernforscher
35 High-Tech und Völkerverständigung

Vor Abflug

Woraus besteht die Welt? Was hält sie zusammen? Wie hat alles angefangen? Wie wird es enden? Mit diesen Fragen beschäftigen sich die Kern- und die Teilchenphysiker. Ihre Forschungen im 20. Jahrhundert haben gezeigt, dass die Vielfalt der Erscheinungsformen der Natur letztlich zurückgeht auf eine kleine Zahl fundamentaler Materie-Bausteine und auf die Wirkungen weniger elementarer Kräfte zwischen ihnen. Den faszinierenden Ergebnissen dieser Forschungen und dem Ausblick in die Zukunft ist dieses Themenheft gewidmet.

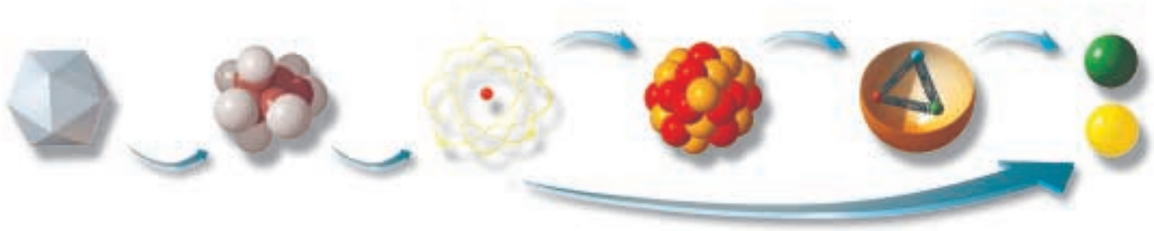
Die Teilchenphysiker untersuchen die Eigenschaften und Wechselwirkungen der feinsten Strukturen der Materie – der Elementarteilchen. Mit Experimenten bei sehr hohen Teilchenenergien stellen sie Bedingungen her, wie sie im ganz jungen Universum unmittelbar nach dem Urknall herrschten. Hier ergänzen sich die Forschungsziele der Teilchenphysiker mit denen der Kosmologen und Astrophysiker. Partikel, die die Erde von der Sonne oder aus fernen Winkeln des Universums erreichen, lassen sich mit Hilfe von teilchenphysikalischen Apparaturen aufspüren und untersuchen.

„Plastik-Ball“-Detektor zur Untersuchung relativistischer Kern-Kern-Kollisionen. (Illustration: GSI, Grafik oben: DESY)

Die Hadronen- und Kernphysiker untersuchen aus Elementarteilchen zusammengesetzte Systeme, die Atomkerne. Im Vordergrund der Forschung standen früher vor allem die stabilen Kerne, aus denen die uns umgebende Materie und wir selber bestehen. In jüngster Zeit beschäftigen sich die Wissenschaftler dieses Forschungszweiges vor allem mit instabilen Kernen, die schnell zerfallen. Sie spielen bei der Entstehung der Elemente, wie wir sie heute vorfinden, eine entscheidende Rolle. Zudem erschaffen die Forscher neue Elemente, die in der Natur nicht vorkommen. Die Hadronenphysiker beschäftigen sich mit Systemen, die aus Quarks zusammengesetzt sind und durch Mittlerteilchen, die sogenannten Gluonen, zusammengehalten werden. Beste Beispiele dafür sind das Proton, das Neutron sowie das aus Quarks und Gluonen bestehende Quark-Gluon-Plasma, die kosmische Ursuppe der Welt.

Kern- und Teilchenphysik sind Grundlagenforschung. Die Geschichte hat gezeigt, dass aus ihren Erkenntnissen ungeahnte, neuartige Anwendungen entstehen können. Das jüngste Beispiel ist das WorldWideWeb. Erfunden von einem Teilchenphysiker für den Informationsaustausch in der Forschung, hat es sich rasant auf fast alle Bereiche unseres Alltags ausgebreitet. Neben der Energieerzeugung durch Kernspaltung und Kernfusion kommen vor allem in der Medizintechnik weitere Anwendungen kernphysikalischer Forschung vor. Computer- und Kernspintomografie sind nur zwei Schlagworte aus diesem Bereich. Mit der Methode der Ionenimplantation bei Halbleitermaterialien werden neuartige, hochintegrierte Schaltelemente hergestellt.

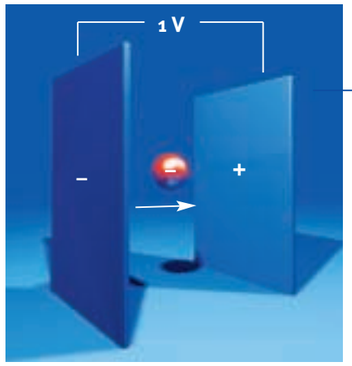
Die Arbeitsweise bei den Experimenten der Teilchenphysik und der Kernphysik verbindet den akademischen mit dem industriellen Arbeitsstil. Die Studierenden lernen hier in besonderem Maße, sich im internationalen Rahmen zu behaupten, nach einem vorgegebenen Budget wirtschaftlich zu planen und Termine einzuhalten. Ohne solchen Nachwuchs können die Zukunftsaufgaben einer modernen Gesellschaft nicht bewältigt werden.



Kristall	Molekül	Atom	Atomkern	Proton/Neutron	Quark Elektron
$\lesssim$ 0,01 m = 10^{-2} m	10^{-9} m	10^{-10} m	10^{-14} m	10^{-15} m	$< 10^{-18}$ m

Wir laden Sie ein, mit diesem Heft auf die Reise zu gehen. Es zeigt die Teilchen- und Kernphysik auf dem aktuellen Stand der Forschung. Eine Reportage aus dem Bereich der medizinischen Physik, ein Blick in die Zukunft und ein Interview mit einem Physiker über das Arbeiten in großen internationalen Kollaborationen bilden den Schluss. Doch bevor wir über den „Webfehler der Welt“ oder „Kosmische Spuren im ewigen Eis“ berichten, erhalten Sie unser Survival-Pack: wir bringen Ordnung in den Teilchenzoo und stellen die riesigen Werkzeuge vor, mit denen die Kern- und Teilchenphysiker arbeiten. Steigen Sie ein...

Wie funktioniert eigentlich… ein Teilchenbeschleuniger?



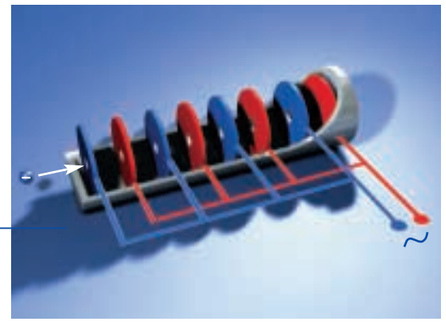
Ein Elektron wird im Feld zwischen zwei geladenen Metallplatten beschleunigt. Nach Durchlaufen der gesamten Strecke hat es gerade die Energie 1eV (ein „Elektronenvolt“). Diese etwas sonderbare Einheit für Energie verwenden die Kern- und Teilchenphysiker gerne, weil sie für ihre Rechnungen sehr bequem ist.

Der einfachste Teilchenbeschleuniger ist ein Fernseher. Dort werden die Elektronen, die das Fernsehbild auf die Mattscheibe schreiben, durch ein elektrisches Feld beschleunigt. Ein elektrisches Feld herrscht zum Beispiel zwischen zwei entgegengesetzt geladenen Metallplatten. Setzt man ein negativ geladenes Elektron zwischen die Platten, wird es von der positiv geladenen Platte angezogen und von der negativen abgestoßen.

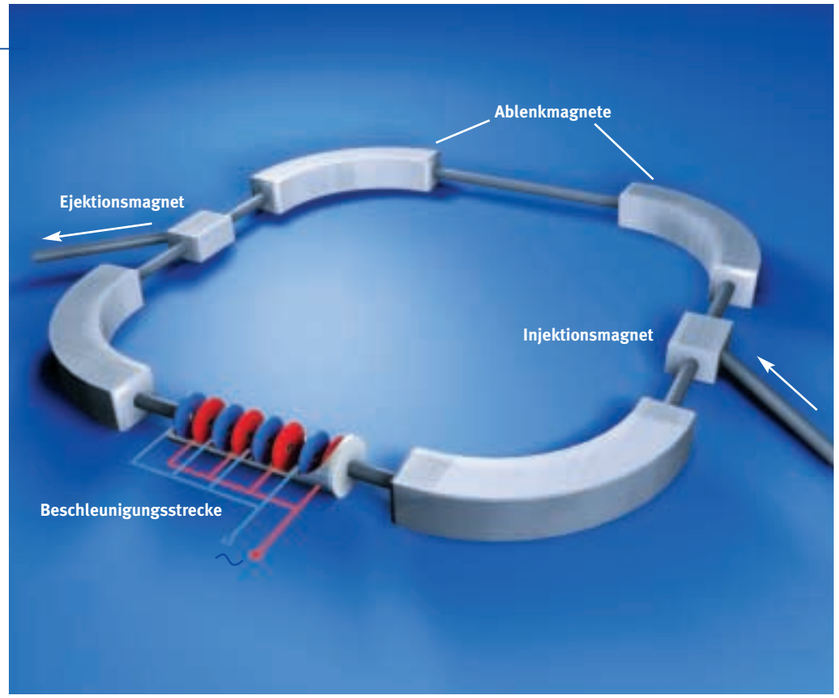
Will man ein Elektron auf höhere Energien bringen, bohrt man einfach Löcher in die Metallplatten und schaltet mehrere solcher Beschleunigungsstrecken hintereinander. Damit das Ganze funktioniert, muss man jetzt die Platten mit Hilfe einer Wechselspannung umpolen, sobald das Elektron in die nächste Beschleunigungsstrecke fliegt.

Mit einem solchen Linearbeschleuniger lassen sich nicht nur Elektronen, sondern alle geladenen Teilchen auf Geschwindigkeit bringen. Also zum Beispiel auch positiv geladene Atome, sogenannte Ionen. Eine Methode, Teilchen zu beschleunigen, ohne lange Linearbeschleuniger zu bauen, ist der Ringbeschleuniger.

Hier werden die geladenen Teilchen durch Magnete auf eine Kreisbahn gezwungen. Auch im Fernseher, dem Minibeschleuniger zu Hause, sind Magnete eingebaut. Sie lenken dort den Elektronenstrahl Zeile für Zeile über die Mattscheibe. Die Teilchen durchlaufen die Beschleunigungsstrecke im Ring viele Tausend mal, bevor sie ihre Sollgeschwindigkeit erreicht haben. Ein Nachteil des Ringbeschleunigers ist, dass elektrisch geladene Teilchen, die sich im Kreis bewegen, Strahlung abgeben (die sogenannte „Synchrotronstrahlung“) und dadurch Energie verlieren. Auch zum bloßen Speichern eines Teilchenstrahls im Ring muss man also immer wieder etwas beschleunigen.



In einem solchen Linearbeschleuniger kann man Elektronen auf Energien von mehreren Milliarden Elektronenvolt bringen. Dazu muss man allerdings auch die Beschleunigungsspannungen auf einige Milliarden Volt erhöhen. Das Bild ist nicht maßstabsgetreu. Zunächst langsame Elektronen werden schneller und so muss der Abstand der Platten immer größer gemacht werden. Bei Elektronen mit nahezu Lichtgeschwindigkeit ist dies nicht mehr notwendig.

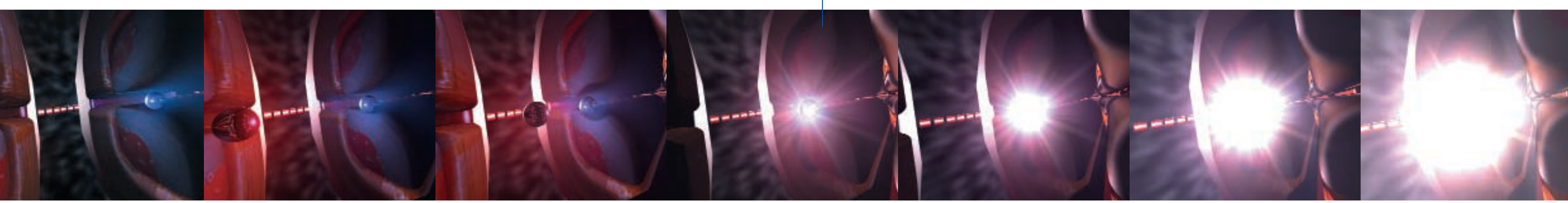


Prinzipskizze eines Ringbeschleunigers. Synchron mit der Zunahme der Teilchengeschwindigkeit muss man auch die Magnetfelder der Ablenkmagnete erhöhen. Je größer nämlich der Teilchenimpuls ist, um so mehr Magnetkraft braucht man, um die Teilchen „um die Ecke“ zu bringen. Aus diesem Grund nennt man diesen Ringbeschleuniger auch „Synchrotron“. (Grafiken: I&P)

Die schnellen, elektrisch geladenen Teilchen schießen die Forscher dann entweder auf ein festes Ziel oder sie lassen zwei Teilchenstrahlen aufeinander prallen. In den meisten Fällen wird dabei Materie in Energie umgewandelt – ein kleiner Energieblitz entsteht. Aus diesem können sich dann innerhalb von Sekundenbruchteilen neue, exotische Partikel bilden, die die Forscher interessieren. Für beide Umwandlungen ist die Einsteinsche Formel zuständig, die die Äquivalenz von Energie E und Masse m beschreibt: $E = m \cdot c^2$ (mit c = Lichtgeschwindigkeit). Die entstandenen Partikel, die nach allen Seiten wegfliegen, werden in großen Detektoren registriert, die die Physiker um die Kollisionsstelle herum gebaut haben.

Verwenden die Forscher niedrigere Energien, wirken die beschleunigten Teilchen wie Lichtstrahlen, die in einem Mikroskop auf das zu untersuchende Objekt prallen, ohne es zu zerstören. Die von diesem Objekt gestreuten Teilchen werden dann ebenfalls in Detektoren analysiert.

wr



Alles Quark: Das Standardmodell

Das Standardmodell zählt zu den erfolgreichsten Theorien der Physik. Im Standardmodell manifestiert sich alles, was heute in der Teilchenforschung als gesichert gelten darf. Grob umrissen ruht das Standardmodell auf drei Säulen.

Säule 1: Die Materiebausteine
Sechs „Quarks“ und sechs „Leptonen“ – aus diesen Bausteinen besteht die Welt. Der Löwenanteil der uns umgebenden Masse ist den Quarks zuzuschreiben. Dagegen machen die Leptonen („Leichtgewichte“) weniger als 0,1 Gewichtsprozent aus. Zu ihnen zählt das Elektron sowie seine schwereren Geschwister, das Myon und das Tau, ferner drei Arten von Neutrinos. Jedes dieser Partikel hat ein Antiteilchen, deshalb basiert das Standardmodell auf insgesamt 24 Materiebausteinen.

Eine besondere Rolle spielen die beiden leichten Quarksorten, das „Up-“ und das „Down-Quark“. Aus ihnen sind die Bausteine der Atomkerne aufgebaut, das Proton und das Neutron. Ein Proton besteht aus zwei Up- und einem Down-Quark, das Neutron aus zwei Down- und einem Up-Quark. Atomkerne sind gewöhnlich von Elektronen umhüllt; demnach besteht die normale, uns umgebende Materie aus nur drei Grundteilchen: Up-Quark, Down-Quark und Elektron. Die anderen Quarksorten können nur im Labor unter extremen Bedingungen erzeugt werden.

Die Bausteine der Materie: Heute kennt man insgesamt 12 Materieteilchen – 6 Quarks und 6 Leptonen. Zu jedem dieser Teilchen existiert wiederum ein Antiteilchen. Atome bestehen aus Elektronen sowie aus zwei Sorten von Quarks (Up-Quark und Down-Quark), die die Atomkerne bilden. Die Massen sind hier über die Einsteinsche Formel $E = m \cdot c^2$ in Energieeinheiten (Elektronenvolt) angegeben.

Leptonen		Quarks	
Elektron Masse 0,0005 GeV	**Elektron-Neutrino** Masse unbekannt	**Up** Masse 0,004 GeV	**Down** Masse 0,007 GeV
Myon Masse 0,1 GeV	**Myon-Neutrino** Masse unbekannt	**Charm** Masse 1,5 GeV	**Strange** Masse 0,15 GeV
Tau Masse 1,8 GeV	**Tau-Neutrino** Masse unbekannt	**Top** Masse 174 GeV	**Bottom** Masse 4,7 GeV

Säule 2: Die Kräfte
Das Standardmodell kennt vier Kräfte, die zwischen den Teilchen herrschen.

- Die **elektromagnetische Kraft** wird durch die elektrische Ladung eines Teilchens verursacht. Sie lässt den Strom aus der Steckdose kommen, hält sämtliche Kristalle zusammen und spielt bei allen chemischen und biochemischen Prozessen die führende Rolle.
- Die **starke Kraft** wirkt zwischen den Quarks. Ihr Effekt entspricht dem eines Expanders aus dem Fitnessstudio: Je weiter man zwei Quarks auseinanderzieht, desto mehr spannt sich das Gummi zwischen ihnen, und desto stärker hat man zu ziehen. Die starke Kraft wird also mit zunehmendem Abstand größer. Dieser Effekt ist so stark, dass das Band zwischen zwei Quarks nicht ohne weiteres reißen kann. Deshalb kommen Quarks nie alleine vor, sondern nur in Quark-Antiquark-Pärchen oder als „Dreigestirn“.
- Die **schwache Kraft** wirkt zwischen allen Materieteilchen. Sie löst radioaktive Zerfälle aus, indem sie bestimmte Elementarteilchen in andere verwandelt, etwa ein Down-Quark in ein Up-Quark plus ein Elektron plus ein Neutrino. Durch diese Teilchenumwandlung kommt der Zerfall von Atomkernen in Gang. Die Neutrinos können nur über die schwache Kraft mit ihrer Umgebung wechselwirken.
- Die **Gravitation**, die wohlvertraute Schwerkraft, spielt im Mikrokosmos praktisch keine Rolle. Im Vergleich zu den anderen Naturkräften ist sie extrem schwach und darf in aller Regel vernachlässigt werden.

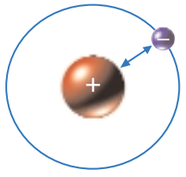
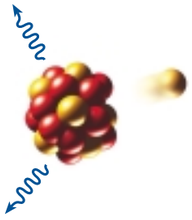
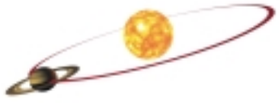
Bei allen Naturkräften gehen die Physiker davon aus, dass sie durch „Botenteilchen“ übermittelt werden, die in unmessbar kurzer Zeit zwischen den Materiepartikeln hin- und herflitzen. Bei der elektromagnetischen Kraft sind es Lichtteilchen (Photonen), bei der starken Kraft „Gluonen“, bei der schwachen Kraft sog. W- und Z-Teilchen. Die Vermittlerteilchen der Schwerkraft, die „Gravitonen“, konnten die Physiker bisher noch nicht experimentell nachweisen.

Säule 3: Die Masse
Der dritte Zweig des Standardmodells liefert einen Erklärungsversuch für das Phänomen „Masse“. Warum Teilchen überhaupt schwer sind – das beschreibt der Higgs-Mechanismus, benannt nach dem Physiker Peter Higgs. Der britische Theoretiker hatte ein neues, allgegenwärtiges Feld postuliert. Mit diesem Feld schließen sich alle massebehafteten Teilchen kurz, um sich mit Masse „vollsaugen“ zu können. Gebilde wie das Photon zeigen sich völlig unbeeindruckt vom Higgs-Feld und bleiben masselos. Noch fehlen die Beweise für die Gültigkeit der Higgs-Theorie. Der LHC-Beschleuniger in Genf soll ab 2005 das „Higgs-Teilchen“ aufspüren. Die Entdeckung dieses Teilchens wäre der gesuchte Beweis für die Richtigkeit der Theorie.

Bislang hat sich das Standardmodell bestens bewährt. Die meisten Ergebnisse der Teilchenforschung passen sehr gut zu den Vorhersagen. Dennoch: Das Modell weist Lücken auf und vermag grundlegende Probleme nicht zu erklären: Warum zum Beispiel gibt es ausgerechnet sechs Quarks, weshalb existieren vier Naturkräfte? Warum sind die Atome neutral? Um Fragen wie diese zu beantworten, wünschen sich die Experten eine neue, umfassendere Theorie. Sie soll letztlich die Naturkräfte zu einer Art Urkraft vereinheitlichen und die Zahl der heute bekannten Elementarteilchen auf einige wenige Urteilchen reduzieren. *fg*

Sie halten die Welt zusammen: Die vier elementaren Kräfte werden durch Austauschteilchen übertragen, die für jede Kraftart spezifisch sind: die elektromagnetische Kraft durch die als Lichtteilchen bekannten Photonen; die zwischen den Quarks wirkende Kraft durch die Gluonen; die schwache Kraft durch das neutrale Z-Teilchen sowie das negativ und das positiv geladene W-Teilchen; die Gravitation durch das masselose, allerdings noch nicht beobachtete Graviton. (Grafiken: I&P)

	Gluon	Photon	W- und Z-Boson	Graviton
Träger der:	starken Kraft	elektromagnetischen Kraft	schwachen Kraft	Gravitationskraft
wirkt auf:	Quarks und Gluonen	Quarks und geladene Leptonen	Quarks und Leptonen	alle Teilchen
verantwortlich für:	**Zusammenhalt der Hadronen und der Atomkerne**	**Chemie, Elastizität und Magnetismus**	**Radioaktivität**	**Zusammenhalt der Erde, der Sonne, des Planetensystems**

Ein Universum voller Licht und ohne den Menschen – das wäre die Folge gewesen, hätten sich Materie und Antimaterie gleich nach dem Urknall gegenseitig vernichtet.

Der Webfehler der Welt

In einer kleinen Asymmetrie des Universums sehen Physiker den Schlüssel zu unserer Existenz

Sie ist überall. Die ganze Welt besteht aus Materie. Allein der Körper eines Menschen enthält viele Milliarden Teilchen. Es gibt da nur ein Problem: Eigentlich dürfte all diese Materie überhaupt nicht existieren. Denn den Theorien der Kosmologen zufolge entstand beim Urknall zu jedem Materieteilchen auch das Gegenstück, ein Antimaterie-Teilchen. Solche Zwillinge haben genau entgegengesetzte Ladung und ähneln einander wie Bild und Spiegelbild. Berühren sie sich, zuckt ein Energieblitz auf und beide Partner zerstieben zu Strahlung. Dicht zusammengedrängt in der kosmischen Ursuppe hätten sich die Zwillingspartikel also eine heftige Vernichtungsschlacht liefern müssen, bis kein Rest mehr von ihnen übrig geblieben wäre. Überdauert hätte ein Universum voller Licht, ohne Sterne, Planeten und ohne den Menschen.

Weil dieses Szenario natürlich nicht richtig sein kann, muss sich in den ersten Sekundenbruchteilen nach dem Urknall ein kleiner Materieüberschuss gebildet haben. Während die Antimaterie ausstarb, überlebte jenes überzählige Milliardstel der Materie das Inferno und verdichtete sich später zu den Gestirnen. Wie das Ungleichgewicht zwischen Materie und Antimaterie zu Stande kam, weiß bislang niemand genau. Die Physiker haben aber eine Vermutung, wo sie nach der Lösung des Rätsels suchen müssen.
Bis Mitte des 20. Jahrhunderts herrschte im Reich der Physik vollkommene Symmetrie. Man nahm unter anderem an, dass sich fundamentale physikalische Prozesse nicht verändern, wenn sie spiegelverkehrt betrachtet werden und gleichzeitig alle Materie durch Antimaterie ersetzt wird – die CP-Symmetrie bleibt erhalten, wie Fachleute sagen. Zwei amerikanische Forscher, James Cronin und Val Fitch, entdeckten jedoch 1964, dass eine bestimmte Sorte kurzlebiger Teilchen, sogenannte K^0-Mesonen, die Spielregeln der CP-Symmetrie missachten: Diese Teilchen und ihre Antibrüder zerfallen manchmal auf etwas unterschiedliche Weise; und zwar so, dass ein klein wenig mehr Materie als Antimaterie entsteht – für Kosmologen und Teilchenphysiker ein deutlicher Fingerzeig: Ähnliche Mechanismen könnten auch bei Zerfallsprozessen der ersten Partikel kurz nach dem Urknall für den notwendigen Materieüberschuss gesorgt haben.

Sprünge im Spiegel

Drei Symmetrien spielen in der Elementarteilchenphysik eine besondere Rolle: Zeitumkehr, Spiegelsymmetrie und Symmetrie zwischen Teilchen und Antiteilchen. Invariant unter Zeitumkehr oder T-symmetrisch (T = Time, Zeit) nennt man einen physikalischen Prozess, bei dem der Beobachter nicht erkennen kann, ob der Film vorwärts oder rückwärts abläuft. Behalten die physikalischen Gesetze unter Raumspiegelung ihre Gültigkeit, heißt das im Fachjargon, die Parität oder P-Symmetrie bleibt erhalten. Ändert sich an den Gesetzmäßigkeiten nichts, wenn man alle Teilchen durch Antiteilchen ersetzt und somit sämtliche elektrische Ladungen umpolt, dann sprechen Experten von Ladungs- oder C-Symmetrie (C = Charge, Ladung).

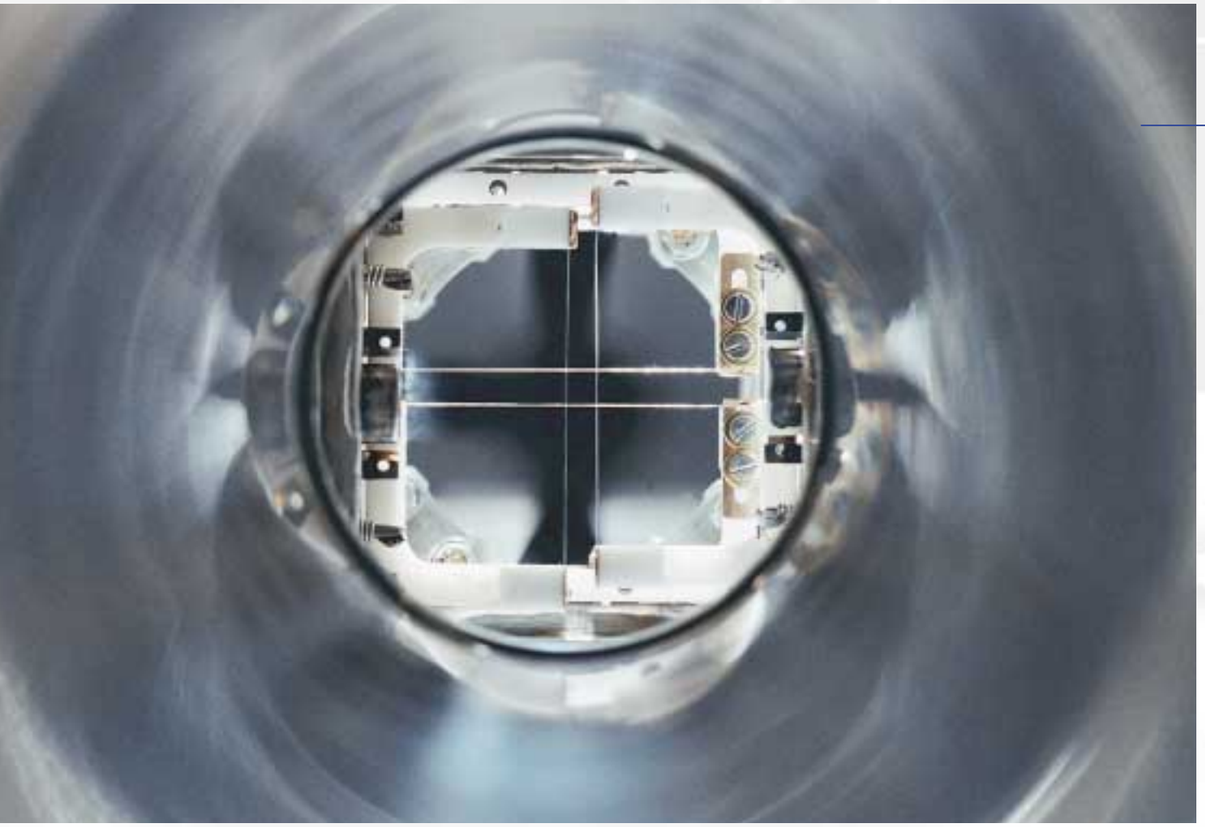
Bis in die fünfziger Jahre glaubten die Physiker, alle fundamentalen Naturvorgänge seien P-symmetrisch. 1957 wies die chinesische Forscherin Chien-Shiung Wu jedoch nach, dass der radioaktive Zerfall von Kobalt die Parität verletzt. Wenig später entdeckte man, dass auch die Ladungssymmetrie „gebrochen“ ist. Wie die beiden amerikanischen Forscher Cronin und Fitch 1964 an K^0-Mesonen nachwiesen, verstoßen manche physikalischen Prozesse sogar gegen die Kombination von Ladungs- und Spiegelsymmetrie, gegen die CP-Symmetrie. Einzig die so genannte CPT-Symmetrie scheint bislang uneingeschränkt gültig zu sein. Sie verknüpft Raumspiegelung und Ladungsaustausch mit dem Umkehren des Zeitverlaufs. Ihr zufolge sollte ein gespiegeltes, elektrisch umgepoltes Universum denselben Naturgesetzen gehorchen wie das ursprüngliche, sofern in diesem neuen Kosmos auch die Zeit rückwärts abläuft…

Mesonen

Mesonen bestehen aus zwei Grundbausteinen: einem Quark und einem Antiquark. Sie können über die so genannte starke Kernkraft mit anderen Teilchen in Kontakt treten. Mesonen sind jedoch nicht stabil – in der Regel zerfallen sie bereits nach wenigen Sekundenbruchteilen in andere Partikel, etwa in Elektronen, Neutrinos oder Lichtteilchen (Photonen).

K°-Mesonen sind die leichtesten Teilchen mit einem Strange-Quark als Baustein. B-Mesonen enthalten anstelle des Strange-Quarks ein Bottom-Quark. Weil das Bottom-Quark ungefähr dreißig mal schwerer ist als das Strange-Quark, haben B-Mesonen eine vielfach größere Masse als K°-Mesonen.

So würde ein Proton die Aluminiumdrähte des HERA-B-Targets sehen. Die vier sehr dünnen Drähte können einzeln bewegt werden, um die Wechselwirkungsrate mit dem Protonenstrahl einzustellen. (Foto: Manfred Schulze-Alex)



Wissenschaftler am europäischen Teilchenbeschleuniger CERN in Genf und am Fermilab in Chicago fanden im vergangenen Jahr heraus, welche Kraft die Verletzung der CP-Symmetrie verursacht. Nach dem Standardmodell sollte sich nur eine der vier physikalischen Grundkräfte solche Extravaganzen erlauben: die so genannte schwache Wechselwirkung, die radioaktive Zerfallsprozesse in Gang bringt. Unklar war aber, ob sie allein ausreichen würde, um das eigentümliche Verhalten der K^0-Mesonen zu bewirken. Oder ob zusätzlich eine fünfte, in der Theorie bisher nicht vorgesehene Kraft eingeführt werden müsste. „Unsere Experimente haben eindeutig gezeigt, dass die schwache Kraft für den Symmetriebruch genügt“, sagt der Mainzer Physikprofessor und CERN-Forscher Konrad Kleinknecht.

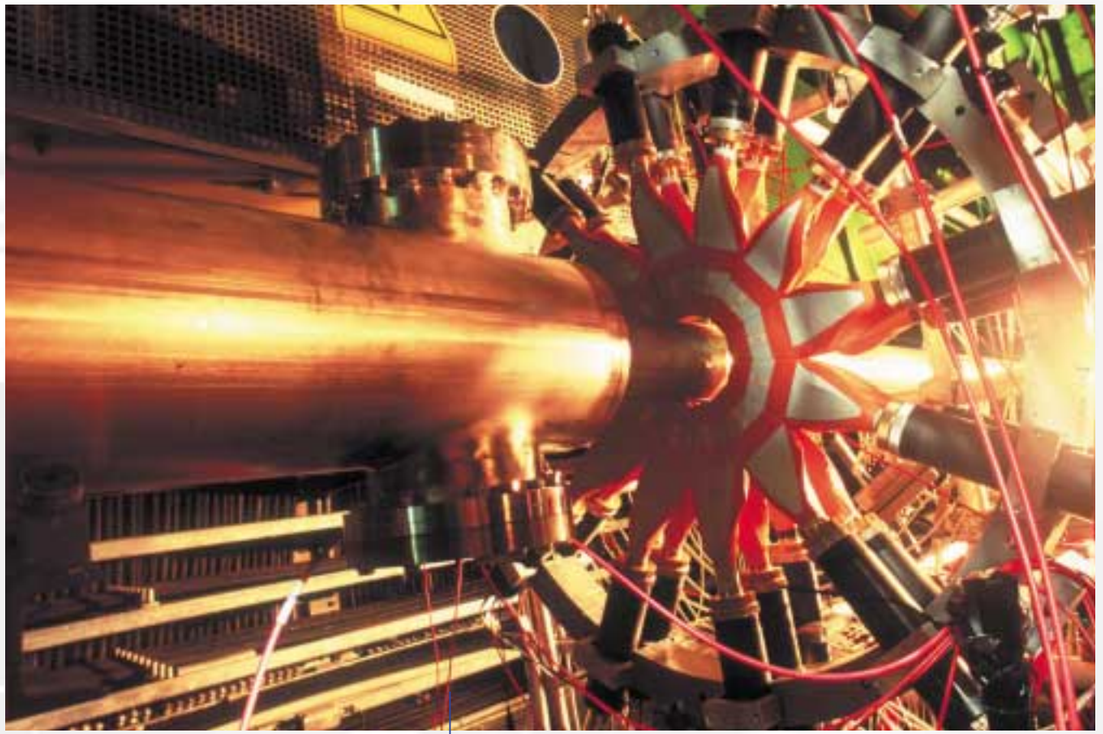
Doch auf die Physiker kommt noch weitere Arbeit zu. Denn wenn die K°-Mesonen gegen das Symmetrie-Gesetz verstoßen, dann müssen sich ihre schwereren Artgenossen, die B-Mesonen, genauso unorthodox verhalten. Die „CP-Verletzung“ sollte bei den massigen Teilchen sogar stärker ausgeprägt sein als bei K°-Mesonen.

Gleich in mehreren Hochenergielabors auf der ganzen Welt nehmen Physiker deshalb zur Zeit B-Mesonen ins Visier. So suchen deutsche Forschungsgruppen an der Stanford-University in Kalifornien beim Experiment „BABAR“ nach der CP-Verletzung bei B-Mesonen, die durch Kollisionen von Elektronen und Positronen entstanden sind. Am Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY) hat eine internationale Forschergruppe „HERA-B“ aufgebaut. Die Wissenschaftler lassen in diesem Experiment Protonen aus dem vorhandenen Ringbeschleuniger „HERA“ auf feine Aluminiumdrähte prallen. Schlagen die nahezu lichtschnellen Wasserstoffkerne auf dem Draht auf, erzeugen sie eine ganze Kaskade von Partikeln, darunter häufig auch die gesuchten B-Mesonen.

„CP-Verletzungen sind aber nur bei sehr seltenen Zerfallsvarianten der B-Mesonen zu erwarten“, sagt Thomas Lohse, Physiker an der Humboldt-Universität in Berlin und Mitglied des HERA-B-Teams. Bei Hundert Milliarden Zusammenstößen von Protonen mit dem Aluminiumdraht werde lediglich ein Mal der gewünschte Zerfallsprozess ausgelöst.

Ein besonders leistungsfähiger Detektor bei DESY registriert die Spuren aller Trümmerteilchen, die sich beim Aufprall der Protonen auf dem Draht bilden. Um aus den unzähligen Signalen die richtigen Zerfallsprozesse herauszufiltern, läuft eine ganze Rechnerfarm Tag und Nacht auf Hochtouren. „Unser Nachweis-System muss eine Datenflut bewältigen, die in etwa dem Informationsfluss im gesamten Netz der Telekom entspricht“, sagt Lohse.

Ein leises Anzeichen dafür, dass die Teilchen tatsächlich die CP-Symmetrie brechen, gibt es bereits. Wissenschaftler am Fermilab in Chicago haben das Phänomen kürzlich an B-Mesonen beobachtet, die bei Kollisionen von Protonen mit ihren Antipartnern entstanden waren. „Die Messungen der Amerikaner sind aber zu ungenau, um sichere Schlussfolgerungen zu erlauben“, meint Dietrich Wegener, Leiter der Dortmunder HERA-B-Gruppe. Noch sei daher „völlig offen, welche Geheimnisse die B-Mesonen in sich bergen“. Vielleicht tritt die CP-Verletzung nicht in der vorhergesagten Stärke auf. Vielleicht enthüllen die Experimente auch überraschende Zusatzeffekte, die von keiner Theorie im Standardmodell beschrieben werden. Dann geriete das Weltbild der Physiker heftig ins Wanken. Und sie müssten nach neuen, bislang unbekannten Kräften oder Teilchen suchen, um die Vorherrschaft der Materie im Universum zu erklären – und das Rätsel unserer Existenz zu lösen. *ad*



Kranz aus 12 doppelten Szintillationszählern (orange-weiß), die jeweils in einen Photoelektronen-Vervielfacher münden (schwarz). Er ist Teil des Detektors von HERA B, der die Trümmerteilchen registriert, die sich nach dem Aufprall der Protonen auf dem Draht bilden. Das Bild zeigt den Detektorkranz in einem Testaufbau. (Foto: Bilderberg, Peter Ginter)

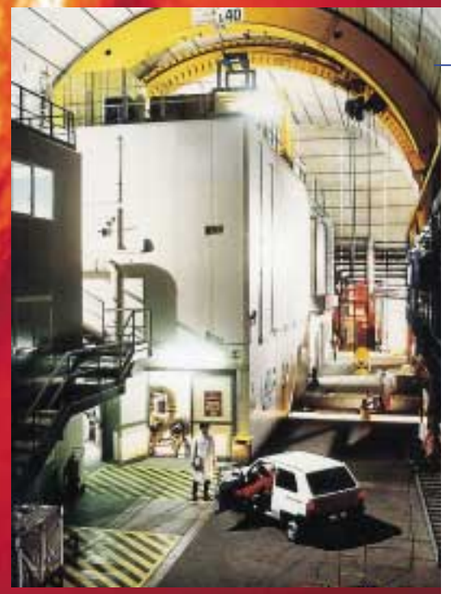
Geisterteilchen in der Waagschale

Mit ausgefeilten Experimenten versuchen Physiker, die Masse der Neutrinos zu bestimmen. Von ihr könnte das Schicksal des Universums abhängen.

Dem Physiker Wolfgang Pauli waren sie von Anfang an nicht recht geheuer. Als er 1930 erstmals „Neutrinos“ in seine Theorien einführte, um damit einige Ungereimtheiten beim Kernzerfall zu erklären, schrieb er zerknirscht an seine Kollegen: „Ich habe etwas Schreckliches getan. Ich habe ein Teilchen vorausgesagt, das sich nicht nachweisen lässt.“ Zwar sollten sich die Bedenken des Nobelpreisträgers als unbegründet erweisen: Obwohl Neutrinos fast nie mit ihrer Umgebung in Kontakt treten und deshalb zumeist spurlos durch unsere Erde hindurchsausen, wurden sie inzwischen längst aufgespürt. Kopfzerbrechen bereitet Physikern derzeit vor allem die Frage, ob Neutrinos eine Masse haben.

„Die Suche nach der Neutrino-Masse ist für Teilchenforscher so etwas wie die Jagd nach dem Heiligen Gral“, sagt Till Kirsten vom Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg. „Wenn sich herausstellt, dass die Partikel eine Masse besitzen, könnte das weitreichende Folgen haben; nicht nur für das Weltbild der Physiker, auch für das Schicksal des Universums.“

Nach Vorstellung der Kosmologen dehnt sich das All seit der gewaltigen Explosion des Urknalls fortwährend aus. Ob diese Expansion bis in alle Ewigkeit andauert oder ob das Universum in einigen Milliarden Jahren in sich zusammenfällt wie ein Ballon, aus dem man die Luft herauslässt, hängt von der Gesamtmasse des Kosmos ab. Übersteigt sie einen bestimmten kritischen Wert, reicht ihre Schwerkraft aus, um das All irgendwann zusammenzuziehen. Der Urknalltheorie zufolge schwirren durch jeden Kubikzentimeter des Weltraums ein paar hundert Neutrinos. Wenn die Partikel eine Masse hätten, könnten sie einen erheblichen Teil aller kosmischen Materie ausmachen und so den Werdegang des Universums entscheidend beeinflussen.



Neutrinos, die bei der Kernfusion im Innern der Sonne entstehen (hier ein Bild aufgenommen vom Sonnenobservatorium SOHO) durchdringen 1200 Meter Fels, bis sie im Untergrundlabor der Physiker ankommen. Die beiden Tanks des Experiments mit dem Namen „GALLEX“ sind in dem Gebäude im Vordergrund untergebracht. (Fotos: ESA, MPI für Kernphysik)

Panorama des Gran Sasso mit einem Außengebäude des italienischen Instituts für Kern- und Teilchenphysik. Zwei Kilometer von hier beginnt der Tunnel, der in das unterirdisch gelegene Physiklabor führt – 1200 Meter tief unter den Abruzzen. Die Felsmassen sollen das Experiment vor störender kosmischer Strahlung schützen. (Foto: MPI für Kernphysik)

Allerdings ist für die Neutrinos in der Teilchenphysik eine solche Rolle als Schicksalslenker bisher nicht vorgesehen. Das Standardmodell geht nämlich davon aus, dass sie masselos sind.

Den ersten Hinweis darauf, dass die Geisterteilchen vielleicht doch ein bisschen Gewicht auf die Waage bringen, bekamen Teilchenforscher von Neutrinos, die bei Kernverschmelzungen im Inneren der Sonne entstehen. Eines der größten Nachweisgeräte für die solaren Partikel steht im italienischen Untergrundlabor „Gran Sasso“. Mehr als tausend Meter tief unter den Abruzzen, gut abgeschirmt gegen störende kosmische Strahlung, hat ein internationales Wissenschaftlerteam zwei haushohe, turmförmige Kunststofftanks aufgebaut. Sie enthalten rund hundert Tonnen flüssiges Galliumchlorid. Auf jeden Quadratzentimeter

der Tankoberfläche prasseln pro Sekunde etwa 60 Milliarden Sonnen-Neutrinos. Weil sich die scheuen Partikel in der Galliumlösung ausschließlich über Kernumwandlungen bemerkbar machen, registriert der Detektor trotz des dichten Teilchenregens höchstens ein Neutrino am Tag: Es prallt mit dem Kern eines Gallium-Atoms zusammen und löst dabei eine nachweisbare Reaktion aus. „Aus diesen vereinzelten Treffern können wir trotzdem auf die Gesamtzahl der ankommenden Neutrinos schließen“, sagt Till Kirsten, dessen Arbeitsgruppe den Detektor mitentwickelt hat. Die Forscher kennen nämlich die Wahrscheinlichkeit für einen Kerntreffer des Neutrinos sehr genau – sie müssen also nur lange genug messen, bis die Statistik verlässlich wird.

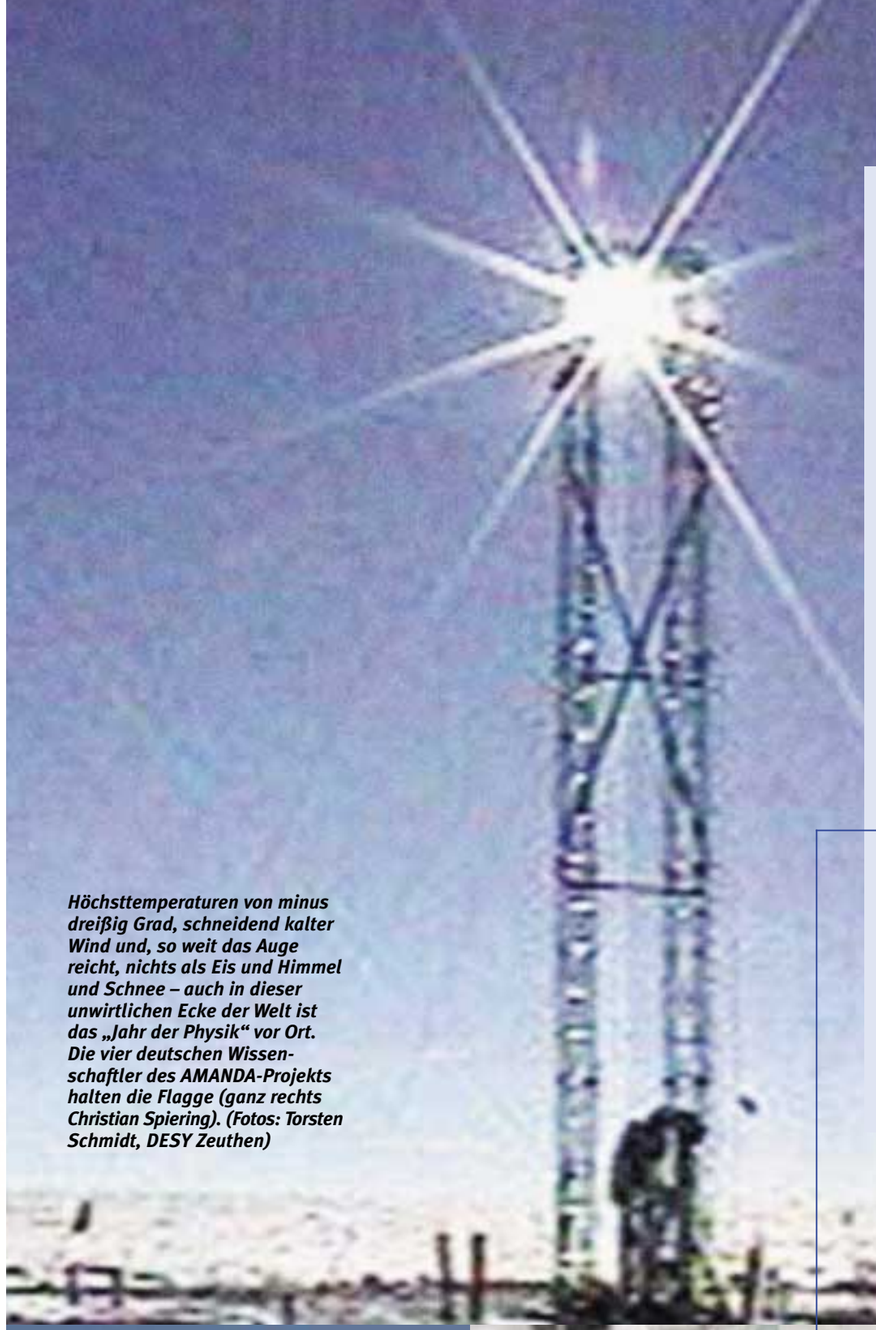
Seit rund zehn Jahren überwacht die unterirdische „Neutrino-Kamera“ den Teilchenfluss. Das Ergebnis ihrer Beobachtungen: Es treffen wesentlich weniger Sonnen-Neutrinos auf die Erde, als nach Modellrechnungen der Astrophysiker erwartet werden.

Die Teilchenphysiker vertrauen aber den Berechnungen der Astronomen. Sie schlagen deshalb für das Problem eine Erklärung vor, die auf der Annahme beruht, dass Neutrinos mitunter spontan ihren Typ ändern. Laut Standardmodell gibt es nämlich nicht nur eine, sondern drei verschiedene Neutrino-Arten. Der Detektor im Gran-Sasso-Labor spricht aber bloß auf eine der drei Sorten an. Wenn sich die im Gallium-Tank eigentlich erkennbaren Neutrinos nun auf ihrem Weg von der Sonne zur Erde in eine der beiden anderen Sorten umwandeln, können sie nicht registriert werden. Solche „Oszillationen“, wie die merkwürdigen Verwandlungskünste in der Fachsprache heißen, sind nach den Regeln der Quantenmechanik aber nur unter einer Bedingung erlaubt: Die Partikel müssen eine Masse besitzen!

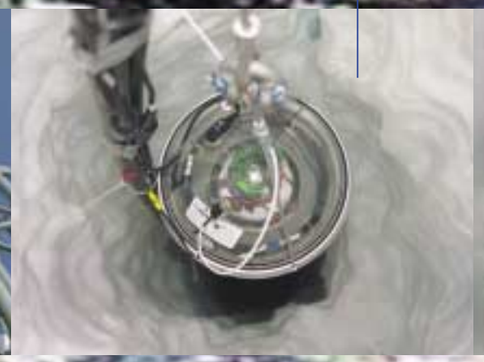
An mehreren Teilchenbeschleunigern auf der ganzen Welt laufen zur Zeit Experimente mit künstlich erzeugten Neutrinos. „Momentan sieht es so aus, als ob Neutrinos wirklich eine Masse haben“, sagt Guido Drexlin vom Forschungszentrum Karlsruhe. Er arbeitet bei einem Neutrino-Versuch an der britischen Beschleunigeranlage ISIS mit.

Gleichzeitig schätzen zwei Forschergruppen in Mainz und Heidelberg schon die mögliche Masse der Neutrinos ab. Das Ergebnis der Wissenschaftler: Auch wenn die Neutrinos tatsächlich eine Masse haben, beträgt sie höchstens Mil-lionstel-Bruchteile der Masse des Elektrons. Und schon das Elektronengewicht beträgt lediglich den Millionsten Teil eines Trilliardstel Gramms. Die Neutrinos wären also kaum schwerer als Nichts.

Wenn sich die Oszillations-Experimente in nächster Zeit bestätigen und Neutrinos tatsächlich eine Masse besitzen, müssen die Physiker ihr Standardmodell ergänzen, möglicherweise sogar durch eine neue, weitreichendere Theorie ersetzen. Sicher ist auch, dass die leichtgewichtigen Partikel dann einen Teil jenes unsichtbaren kosmischen Klebstoffs ausmachen, der mit seiner Schwerkraft Struktur und Bewegung aller Galaxien im Weltall beeinflusst. Ob das Universum in ferner Zukunft mit heftigem Knall in sich zusammenstürzen wird oder ob es ewig expandiert, steht jedoch weiterhin in den Sternen – irgendwo zwischen den unzähligen geisterhaften Neutrinos. *ad*



Höchsttemperaturen von minus dreißig Grad, schneidend kalter Wind und, so weit das Auge reicht, nichts als Eis und Himmel und Schnee – auch in dieser unwirtlichen Ecke der Welt ist das „Jahr der Physik“ vor Ort. Die vier deutschen Wissenschaftler des AMANDA-Projekts halten die Flagge (ganz rechts Christian Spiering). (Fotos: Torsten Schmidt, DESY Zeuthen)



Kosmische Spuren im ewigen Eis

Auch am Südpol wird den Geisterteilchen nachgespürt. „AMANDA“, wie die Wissenschaftler ihr Experiment nennen, soll Neutrinos detektieren, die aus den entlegensten Winkeln des Alls auf die Erde niederprasseln. Lichtstrahlen oder Elektronen bleiben auf ihrem Weg zur Erde leicht in Materiewolken stecken. Neutrinos reagieren dagegen nur extrem selten mit ihrer Umgebung und können so Kunde geben aus Regionen, von denen kaum ein anderes Signal bis zu unserem Planeten vordringt. Etwa von der gegenüberliegenden Seite unserer Milchstraße oder von den Zentren fremder Galaxien.

„AMANDA“ ist ein Detektor-Feld aus vielen lichtempfindlichen Glaskugeln. Mit heißem Wasser bohren die Forscher für jede Kugel eine zweitausend Meter lange, senkrechte Röhre ins Eis. Darin lassen sie den medizinball-großen Detektor vorsichtig in die Tiefe gleiten. Wenige Stunden später schließt sich das Eis wieder. Die Kugel friert ein, bleibt aber über ein Kabel mit dem Messrechner verbunden. „Der dicke Eispanzer schirmt Störsignale von oben, aus der kosmischen Strahlung, weitgehend ab“, begründet Christian Spiering vom DESY Zeuthen die Standortwahl für das Experiment. „Das kristallklare Eis erlaubt uns sogar, die Herkunftsrichtung der Partikel zu bestimmen.“

Wenn ein Neutrino auf seinem Weg durch das Eis mit einem Atomkern zusammenstößt, verwandelt es sich nämlich mitunter in ein anderes Teilchen und zieht einen schwachen bläulichen Lichtkegel hinter sich her. Dieses Signal wird im durchsichtigen Eis von mehreren Detektorkugeln wahrgenommen. Ähnlich wie man aus der Bugwelle eines Schiffs auf dessen Fahrtrichtung schließen kann, lässt sich aus dem Verlauf des Lichtkegels der Einflugwinkel der Neutrinos rekonstruieren.

Bisher haben die Forscher rund 700 Sensorkugeln im arktischen Boden versenkt. Bis zum Jahr 2008 sollen mehr als viertausend Kugeln hinzukommen, verteilt über eine quadratkilometergroße Fläche. *ad*

Supermikroskope für Protonen

Neues aus dem Innenleben der Kernbausteine

Das Proton

Die gewohnte, uns umgebende Materie besteht aus Atomen; jedes Atom besitzt einen Kern und eine Hülle aus Elektronen. Atomkerne setzen sich aus zwei Sorten von Bausteinen zusammen – ungeladenen Neutronen sowie elektrisch positiven Protonen.

HERA

Die Hadron-Elektron-Ringanlage HERA ist ein unterirdischer Ringbeschleuniger mit einem Umfang von 6,3 Kilometern. Er bringt Elektronen und Protonen praktisch auf Lichtgeschwindigkeit und lässt beide Teilchensorten frontal aufeinanderprallen. Die Energie der Elektronen beträgt knapp 28, die der Protonen 920 Milliarden Elektronenvolt. Die beiden haushohen Detektoren H1 und Zeus analysieren die „Stoßwinkel" der Geschosse sowie die bei der Kollision entstehenden Reaktionsprodukte. Daraus lässt sich mit einzigartiger Genauigkeit das Innenleben des Protons rekonstruieren. An den insgesamt vier HERA-Detektoren des DESY in Hamburg arbeiten rund 1200 Forscher aus 23 Ländern mit. (Foto: Manfred Schulze-Alex)

Einst galt es als letzter, elementarer Baustein der Natur: Gemeinsam mit dem Neutron bildet das Proton den Bausatz für sämtliche bekannten Atomkerne. Doch schon in den sechziger Jahren wurde klar: Das Proton ist nicht fundamental, sondern setzt sich aus noch kleineren Partikeln zusammen – den Quarks. Wie das „Innenleben" des Protons im Detail beschaffen ist, versuchen Physiker mit unterschiedlichen Mitteln zu enträtseln.

Ein weltweit einzigartiges „Protonenmikroskop" ist der Teilchenbeschleuniger HERA am DESY in Hamburg. Als Sonde dienen hochenergetische, praktisch lichtschnelle Elektronen; sie prallen mit ungeheurer Wucht auf ebenfalls lichtschnelle Protonen. Damit lässt sich der Kernbaustein bis auf ein Tausendstel seines Radius genau untersuchen. Eines der Resultate: Aus Sicht von HERA sieht das Proton wesentlich komplizierter aus, als es ältere Messungen hatten vermuten lassen. Insbesondere fanden die Forscher bei den hochenergetischen Kollisionen weitaus mehr Gluonen (Klebeteilchen) als erwartet.

Ein Blick in den geöffneten H1-Detektor von HERA vermittelt einen Eindruck von der Komplexität der heute in der Teilchenphysik eingesetzten Nachweisgeräte. (Foto: Bilderberg, Peter Ginter)

Zudem beobachten sie so genannte Fluktuationen: Bei den Zusammenstößen zwischen Elektron und Proton bilden sich für winzige Augenblicke Paare aus Quarks und Antiquarks, die sich flugs wieder vernichten. In den Augen von HERA bildet das Proton also ein komplexes und höchst dynamisches Gebilde, in dem es vor Quarks, Antiquarks und Gluonen nur so wimmelt. Ein weiteres Ergebnis: Vor Inbetriebnahme des Hamburger Großbeschleunigers war es fraglich, ob das Standardmodell und speziell die Theorie der Quantenchromodynamik die Geschehnisse überhaupt zutreffend beschreiben können. Die Experimente jedoch bewiesen, dass das Standardmodell selbst für die hohen Kollisionsenergien von HERA „stimmt" – ein Resultat, mit dem nicht jeder gerechnet hatte.

Während HERA das Proton quasi als Teleobjektiv untersucht, beobachtet es ein anderer Beschleuniger aus der Weitwinkel-Perspektive. In Mainz feuert MAMI-B ebenfalls Elektronen auf Protonen, aber mit deutlich geringerer Energie als HERA. Dadurch betrachtet MAMI nicht unmittelbar einzelne Quarks, sondern den Kernbaustein als Ganzes. Dabei erfasst er Größen wie Ausdehnung, Ladungsverteilung, magnetisches Moment und Elastizität (Steifheit). Dieselben Größen messen die Forscher auch am Neutron, dem zweiten, elektrisch ungeladenen Kernbaustein. Anhand der Messdaten können die Physiker auf die Kräfte rückschließen, die zwischen den Quarks herrschen.

Anders als bei den hohen Energien an HERA erscheinen die Quarks bei den MAMI-Experimenten als fest miteinander verbundene Partikel – sie unterliegen dem Confinement. Für dieses Phänomen haben die Physiker noch keine befriedigende Erklärung; unklar ist insbesondere, ob es von der Quantenchromodynamik korrekt beschrieben wird. Experimente wie die an MAMI versuchen, Licht in dieses „theoretische Dunkel" zu bringen. *fg*

Quantenchromodynamik und Confinement

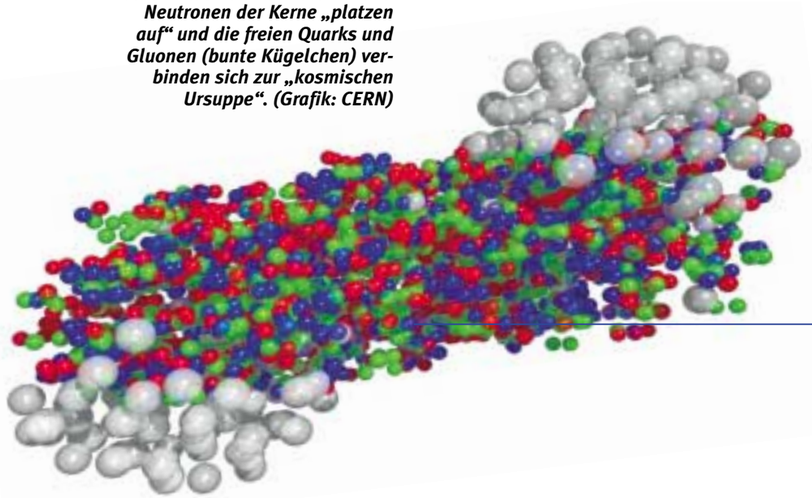
Quantenchromodynamik heißt diejenige Theorie, die für die starke Kraft „zuständig" ist. Sie beschreibt das Wechselspiel der Quarks, der elementaren Bausteine der Materie. Relativ wenig wissen die Forscher bisher über das Phänomen „Confinement": Quarks existieren niemals isoliert, sondern stets in Zweier- oder Dreiergrüppchen. Bei Großbeschleunigern wie HERA allerdings ist das Confinement nicht wirksam. Bei den hochenergetischen Kollisionen verhalten die Quarks sich so, als wären sie nicht stark aneinander gebunden.

MAMI-B

Das Mainzer Mikrotron schießt Elektronen mit einer Energie von 850 Millionen Elektronenvolt auf Flüssigwasserstoff. Das Besondere: MAMI-B erzeugt einen hochintensiven, kontinuierlichen Elektronenstrahl, der um das Zehnfache besser gebündelt ist als Laserlicht. Diese Methode erlaubt es, äußerst viele Kollisionen zwischen den Geschossen und der Zielscheibe zu erzeugen. Mit MAMI-C nehmen die Forscher bald eine Ausbaustufe ihres Beschleunigers in Betrieb, die es auf eine Energie von 1,5 Gigaelektronenvolt bringen wird. Im Bild sieht man die Spektrometer-Halle von MAMI mit den bis zu 20 Meter hohen Detektoren. (Foto: Universität Mainz, Robertino Nikolic)

Das Rätsel der kosmischen Ursuppe

Physiker am CERN entdecken das Quark-Gluon-Plasma



Bei der frontalen Kollision von zwei Bleikernen entsteht für Sekundenbruchteile das Quark-Gluon-Plasma. Die Protonen und Neutronen der Kerne „platzen auf“ und die freien Quarks und Gluonen (bunte Kügelchen) verbinden sich zur „kosmischen Ursuppe“. (Grafik: CERN)

Quark-Gluon-Plasma
Kurz nach dem Urknall vor rund 15 Milliarden Jahren befand sich der Kosmos im Ausnahmezustand: Er hatte die Größe des Sonnensystems und war gefüllt mit subatomaren Elementarteilchen, mit Quarks und Gluonen. Diese als Quark-Gluon-Plasma bezeichnete kosmische Ursuppe war millionenfach heißer als das Sonneninnere und 20 Mal dichter als ein gewöhnlicher Atomkern. Die Physiker gehen davon aus, dass der Kosmos bereits einige Milliardstel Sekunden nach dem Urknall von dem Plasma dominiert wurde. Nach etwa zehn Mikrosekunden fanden sich die freien Quarks dann zu größeren Partikeln zusammen, insbesondere den Kernbausteinen Proton und Neutron.

Es ist der Materiezustand, in dem sich das Universum unmittelbar nach seiner Geburt vor etwa 15 Milliarden Jahren befunden hatte: Das Quark-Gluon-Plasma besteht aus einem unvorstellbar heißen Gemisch aus archaischen Elementarteilchen – freien Quarks sowie ihren „Klebeteilchen“, den Gluonen. Nach jahrelangen Experimenten ist es Physikern am CERN gelungen, diese „kosmische Ursuppe“ künstlich zu erzeugen. Die Entdeckung wirft nicht nur neues Licht auf die „Quantenchromodynamik“ – die Theorie, die das Wechselspiel der Quarks beschreibt. Sie könnte auch ein altes kosmologisches Rätsel lösen: Warum konnten sich im jungen Kosmos überhaupt Sterne und Galaxien bilden?

Das Prinzip der Versuche: Ein Teilchenbeschleuniger bringt schwere Bleikerne nahezu auf Lichtgeschwindigkeit, um sie dann mit voller Wucht auf eine ebenfalls bleierne Zielscheibe zu schießen. Dabei verschmelzen zwei Bleikerne miteinander. Es entsteht eine Art Feuerball, der kurzzeitig heiß genug ist, um zum Quark-Gluon-Plasma zu werden. Die Forscher können den „Film“ bis auf wenige Milliardstel Sekunden nach dem Urknall zurückspulen.

Das Schwierige bei diesen Experimenten: Die Ursuppe existiert jeweils nur für einen Wimpernschlag, um sich dann wieder in normale Materie umzuwandeln. Dabei verrät sich das Plasma in den Detektoren der Forscher nicht etwa durch ein eindeutiges, zweifelsfreies Messsignal.

Indizienbeweis
Bei ihrer Indizienkette konnten die CERN-Physiker unter anderem zeigen, dass ihr Beschleuniger im Prinzip genügend Kollisionsenergie liefert, um das Plasma zu erzeugen. Außerdem blieb ein bestimmtes exotisches Teilchen, was bei Kollisionen dieser Art eigentlich immer entsteht, spurlos verschwunden: Es ist von der Ursuppe „verschluckt“ worden. Schließlich beobachteten die Physiker genau die Teilchen, die sich beim Zerfall des Plasmas bilden sollten. Vorkommen und Verteilung dieser Folgeprodukte lassen sich am einfachsten durch die Existenz eines Quark-Gluon-Plasmas erklären.

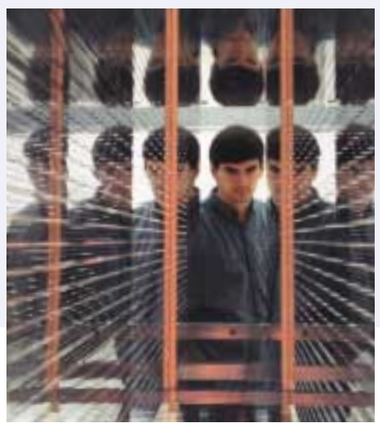
Die Physiker können den extremen Materiezustand nicht „vorführen“, sondern müssen einen Indizienbeweis führen. Seit 1994 haben Forscher aus mehr als 20 Ländern an sieben verschiedenen Detektoren nach den Spuren der kosmischen Ursuppe gesucht – und haben eine ganze Kette von Indizien gesammelt, die auf die Erzeugung des Plasmas schließen lassen.

Dennoch können die Experten nicht ausschließen, dass sich ihre Messdaten auch anders erklären lassen als durch die Existenz der kosmischen Ursuppe. Letzte Gewissheit sollen deshalb zwei neue Beschleuniger bringen. In diesem Jahr wird der „Relativistic Heavy Ion Collider“ (RHIC) in der Nähe von New York seinen Betrieb aufnehmen und Bleikerne mit der zehnfachen Energie aufeinanderschießen, als es in Genf möglich ist. Noch höhere Kollisionsenergien wird Ende des Jahrzehnts der „Large Hadron Collider“ (LHC) in Genf erzeugen – er soll Protonen und auch schwere Atomkerne beschleunigen. Mit beiden Anlagen lässt sich das Plasma einfacher erzeugen und detaillierter untersuchen als bislang.

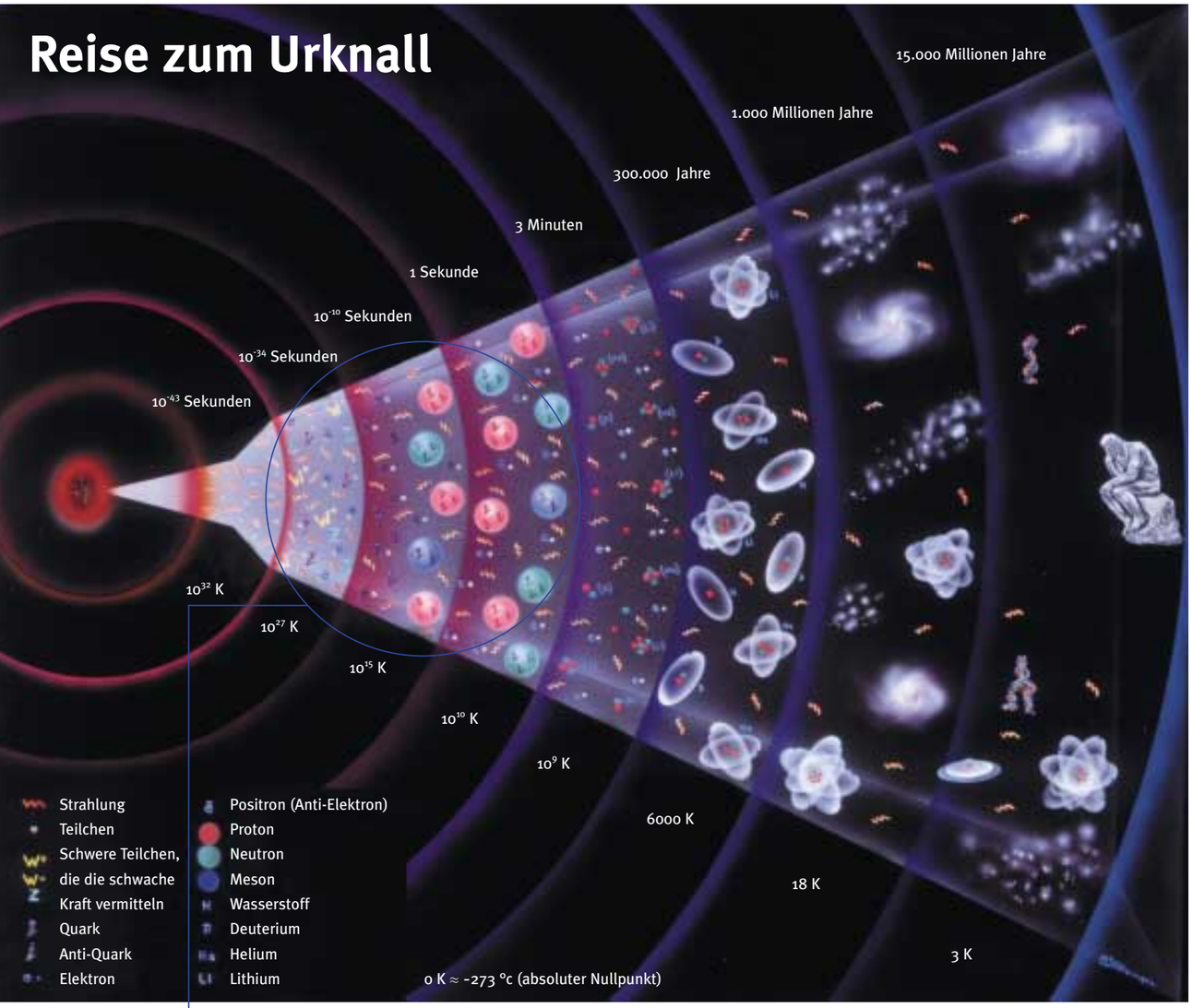
Doch auch die „alten“ Experimente gehen weiter. Dabei wollen die Forscher herausfinden, was geschieht, wenn sich das Plasma in die gewöhnliche, uns umgebende Materie umwandelt. Damit sollen diejenigen Prozesse aufgeklärt werden, die sich unmittelbar nach dem „Big Bang“ ereigneten, als sich das junge Universum immer weiter ausdehnte und abkühlte.

CERN
steht für „Europäisches Laboratorium für Teilchenforschung“. Gelegen an der schweizerisch-französischen Grenze, im Genfer Vorort Meyrin, ist es die größte Wissenschaftseinrichtung Europas. Knapp 3000 Menschen sind am CERN angestellt, 6500 Wissenschaftler kommen regelmäßig als Gastforscher nach Genf. Die deutschen Forscher zum Thema Quark-Gluon-Plasma stammen von den Universitäten Frankfurt, Heidelberg, Marburg und Münster, von der GSI Darmstadt sowie vom MPI für Physik in München.

Der große Beschleunigerring des CERN hat einen Umfang von 27 km.



Spurendriftkammer zur Detektion von Teilchen, wie sie bei Schwerionenkollisionen (z. B. von Bleikernen) entstehen. (Fotos: CERN)



Das junge Universum

Wie konnten sich im jungen Kosmos überhaupt Sterne und Galaxien bilden? Fachleute vermuten, dass die Antwort in dem Augenblick steckt, als das Quark-Gluon-Plasma zehn Mikrosekunden nach dem Urknall zu Protonen, Neutronen und ähnlichen Teilchen „kondensierte“. Ebenso wie bei der Kondensation von Dampf zu Wasser sprechen die Fachleute von einem Phasenübergang. Der entscheidende Punkt: Bei diesem Phasenübergang könnte es bestimmte Unregelmäßigkeiten gegeben haben, wie man sie auch beim Siedeverzug im Wassertopf beobachtet. Die Folge: An einigen Stellen im jungen Kosmos könnte das Plasma bereits kondensiert sein, an anderen Stellen noch nicht. Diese Schwankungen haben womöglich als Keimzellen für die ersten Sterne gedient, zumindest aber die Bildung der ersten, leichten Atomkerne mitbestimmt. Ohne diese Dichteschwankungen hätten sich die Elementarteilchen des frühen Universums völlig gleichmäßig über den Raum verteilt und wären nicht zu Klümpchen zusammengetroffen. (Grafik: CERN) *fg*

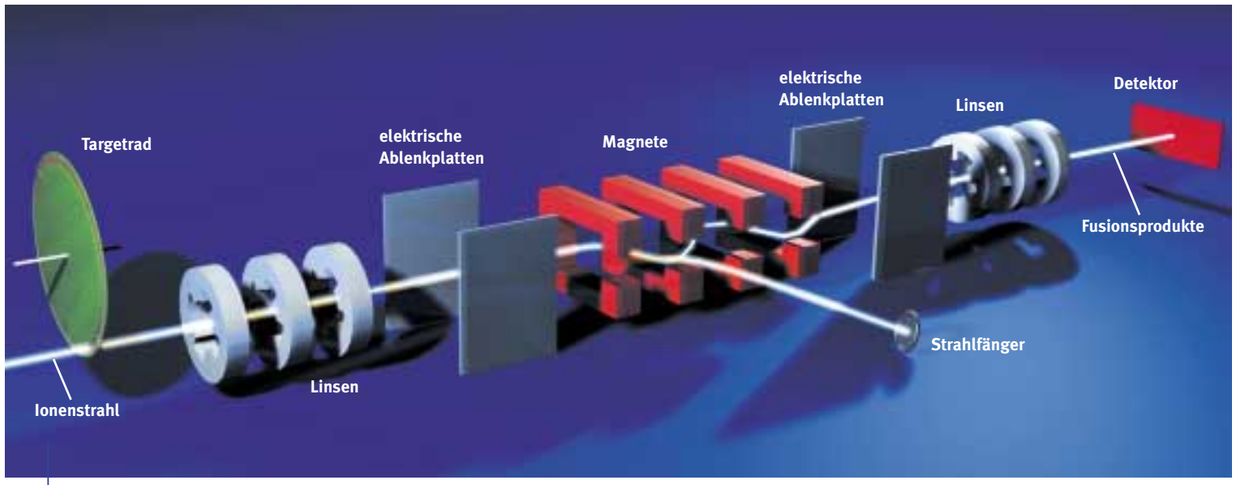
Die Chemieköche des Mittelalters mühten sich vergeblich. Trotz aller Anstrengungen wollte es ihnen nicht gelingen, aus Blei Gold zu machen. Wesentlich mehr Erfolg mit der Bleiveredelung haben dagegen heute die Kernphysiker. Zwar können auch sie das giftige Schwermetall nicht in glänzende Nuggets verwandeln. Doch sind sie immerhin in der Lage, neue chemische Elemente daraus zu zaubern.

„Superschwere Atome“, wie die Neuschöpfungen in der Fachsprache heißen, enthalten außer einer großen Zahl elektrisch ungeladener Neutronen in ihrem Kern mehr als hundert Protonen. Weil sich deren positive Ladungen abstoßen, zerfallen die Atome sehr leicht und kommen in der Natur nicht vor. „Solch ein Element im Labor zu erzeugen ist für Physiker spannender als jede Goldsuche. Denn sein Verhalten verrät uns viel über die Struktur von Atomkernen“, sagt Sigurd Hofmann von der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) in Darmstadt. Neben dem Lawrence Berkeley National Laboratory in Kalifornien und dem Institut für kernphysikalische Forschung in Dubna bei Moskau gilt die GSI als eine der erfolgreichsten Elementschmieden der Welt. In den vergangenen zwanzig Jahren gelang es den Wissenschaftlern an der GSI, sechs neue Atomsorten herzustellen, darunter das Element 112, das bis vor Kurzem den Rekord als schwerster Beitrag zum Periodensystem hielt.

Targetrad (großes Bild) und Detektor bilden Anfangs- und Endpunkt einer modernen Alchemistenküche. (Fotos: GSI)

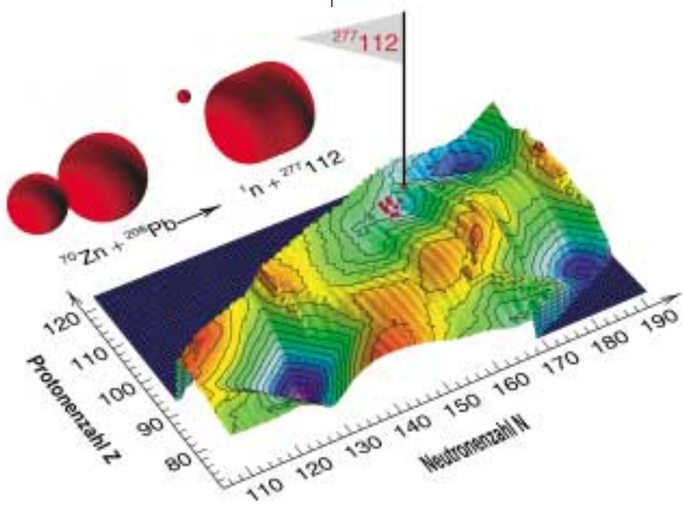
Suche nach der Insel der Stabilität

Kernphysiker erschaffen im Labor neue Elemente



Was wie moderne Alchemie anmutet, stellt hohe Anforderungen an die Experimentierkunst der Physiker. Mit einem Beschleuniger schießen die Forscher relativ leichte Atomkerne auf eine dünne, zumeist aus Blei bestehende Folie. Fast alle Geschosse passieren die Metallschicht ungestört, lediglich ein paar Wenige stoßen frontal mit einem Bleikern zusammen. In diesem Fall verbinden sich beide Kerne zu einem größeren und bilden günstigstenfalls ein neues Element. Eine solche Fusion klappt jedoch nur, wenn die Geschwindigkeit der einfliegenden Teilchen genau austariert ist. Sind die Geschosse zu langsam, kommen sie nicht dicht genug an die Bleikerne heran. Haben sie zu viel Schwung, platzt der Kernverbund sofort auseinander. „Die Atomkerne zum Verschmelzen zu bringen, ist ähnlich knifflig wie eine Kugel so den Berg hinauf zu rollen, dass sie gerade auf der im Nebel liegenden Spitze zum Stehen kommt“, erläutert Hofmann. „Bei einem einwöchigen Bombardement der Bleifolie mit Milliarden Teilchen pro Sekunde erhalten wir im Schnitt höchstens einen der gesuchten Kerne.“ Und den bekommen die Wissenschaftler noch nicht einmal direkt zu Gesicht. Schon wenige Augenblicke nach seiner Geburt zerbricht der superschwere Kandidat nämlich in leichtere Trümmer. Sie werden von einem empfindlichen Detektor registriert. Wie aus einer Indizienkette müssen die Wissenschaftler dann aus der Zerfallskaskade auf das Entstehen des neuen Elements rückschließen.

Experimentelle Anordnung zur Herstellung überschwerer Elemente. Der in einem Linearbeschleuniger erzeugte Schwerionenstrahl trifft auf das Targetrad mit dünnen Folien aus Blei oder Wismut. Zur Reduzierung der Wärmebelastung rotiert es mit hoher Geschwindigkeit. Nahezu alle Ionen durchqueren die Target-Folie ohne wesentlichen Energieverlust; nur selten verschmilzt ein Projektil- mit einem Target-Kern. Der neu gebildete Verbund-Kern fliegt in dieselbe Richtung, aber etwas langsamer als die anderen Ionen und Reaktionsprodukte. Er durchquert die zwei elektrischen und vier magnetischen Ablenkfilter des insgesamt 11 Meter langen Geschwindigkeitsfilters. Während der Ionenstrahl auf einen Strahlfänger geleitet wird, gelangen die Verbundkerne auf einen Silizium-Detektor, der Auftreffort und anschließenden Zerfall der Kerne registriert. Die magnetischen Linsen in der Anordnung dienen zur Bündelung des Strahls. (Grafik: I&P)



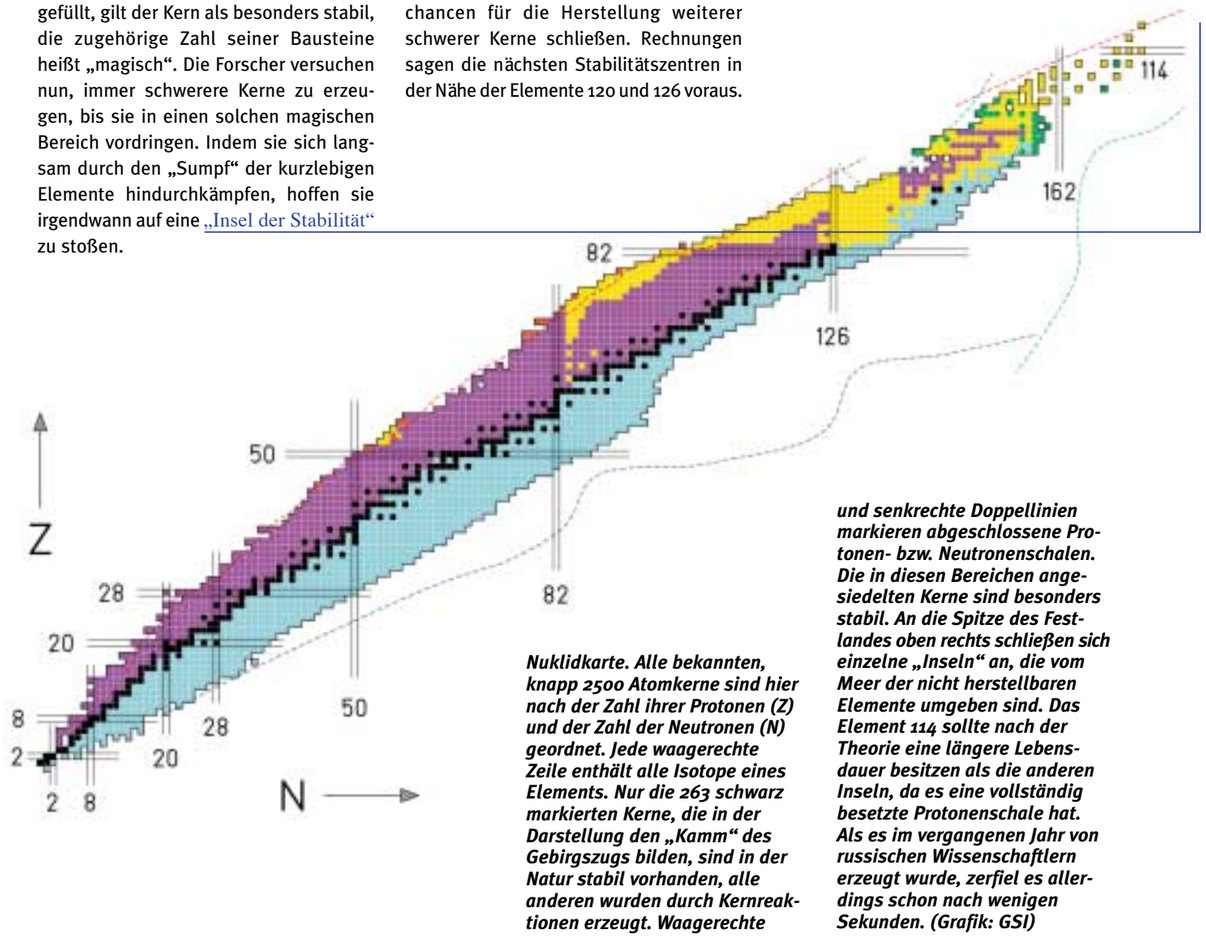
Ausschnitt aus der Nuklidkarte. In der dritten Dimenion ist zusätzlich die Schalenenergie der Kerne aufgetragen. Ein besonders niedriger Wert bedeutet, dass der Kern sehr stabil ist. Die größte Senke findet sich beim Blei (^{208}Pb mit der Protonenzahl Z = 82). Dieser Kern hat eine vollständig gefüllte Protonen- und Neutronenschale und weist daher eine extrem hohe Stabilität auf. Der Ort des letzten an der GSI hergestellten Elements mit der Protonenzahl 112 ist mit einer Fahne markiert. Die Reaktionsgleichung zeigt: ein Zink- und ein Bleikern verschmelzen unter „Abdampfung“ eines Neutrons zum Element 112. Die kleinen Zahlen links oben geben die Summe aus Protonen und Neutronen an. (Grafik: GSI)

Obgleich ihre Kunstprodukte bisher stets nur Millisekunden überlebt haben, treiben Physiker die Elementsynthese mit großem Einsatz voran. Ihren Vorstellungen vom Atomkern zufolge könnten nämlich einige der künftig herstellbaren Schwergewichte recht beständig sein; vielleicht sogar so beständig, dass sich aus diesen Elementen neue Werkstoffe für Materialforschung und Industrie oder zumindest interessantes Experimentiermaterial für Chemiker gewinnen ließe. Denn nach theoretischen Modellen ordnen sich Neutronen und Protonen nicht beliebig im Kern an. Ähnlich wie die Elektronen in der Atomhülle sitzen sie vielmehr in bestimmten Schalen. Sind die Schalen ganz mit Protonen oder Neutronen gefüllt, gilt der Kern als besonders stabil, die zugehörige Zahl seiner Bausteine heißt „magisch“. Die Forscher versuchen nun, immer schwerere Kerne zu erzeugen, bis sie in einen solchen magischen Bereich vordringen. Indem sie sich langsam durch den „Sumpf“ der kurzlebigen Elemente hindurchkämpfen, hoffen sie irgendwann auf eine „Insel der Stabilität“ zu stoßen.

Wie weit dieses Eiland entfernt liegt, ist bislang allerdings unklar. Der Theorie zufolge besitzt schon das Element 114 eine vollständig gefüllte Protonen-Schale. Als russische Forscher die Atomsorte im vergangenen Jahr erstmals erzeugten, haftete den Kernen aber wenig Magisches an: Auch sie zerfielen bereits nach wenigen Sekunden. Noch kürzere Zeit überdauerten die drei Kerne des Elements 118, deren Produktion unlängst aus Berkeley gemeldet wurde. Dennoch fühlen sich viele Kernphysiker von den jüngsten Experimenten angespornt. Die Versuchsreihe in Berkeley hat nämlich gezeigt, dass die Bildungswahrscheinlichkeit für das Element 118 ungewöhnlich hoch ist. Das lässt auf gute Erfolgschancen für die Herstellung weiterer schwerer Kerne schließen. Rechnungen sagen die nächsten Stabilitätszentren in der Nähe der Elemente 120 und 126 voraus.

Ob die Forscher dort tatsächlich Atomkerne finden, die länger als ein paar flüchtige Sekunden existieren, ist offen. Ein kleiner Trost bleibt den Teilchenschmieden jedoch in jedem Fall: Wenn sie ein neues superschweres Element erzeugen, dürfen sie einen Namen für ihre Schöpfung vorschlagen. So heißt das GSI-Produkt mit der Ordnungszahl „108“ inzwischen „Hassium“ nach dem Bundesland Hessen, in dem das Wissenschaftszentrum seinen Sitz hat. „Für die Physik spielt die Namensgebung natürlich überhaupt keine Rolle“, sagt Hofmann. „Aber die Entdecker erfüllt das Privileg durchaus ein bisschen mit Stolz“ – ganz gleich, wie kurz das Leben ihres Täuflings ist.

ad



Nuklidkarte. Alle bekannten, knapp 2500 Atomkerne sind hier nach der Zahl ihrer Protonen (Z) und der Zahl der Neutronen (N) geordnet. Jede waagerechte Zeile enthält alle Isotope eines Elements. Nur die 263 schwarz markierten Kerne, die in der Darstellung den „Kamm“ des Gebirgszugs bilden, sind in der Natur stabil vorhanden, alle anderen wurden durch Kernreaktionen erzeugt. Waagerechte und senkrechte Doppellinien markieren abgeschlossene Protonen- bzw. Neutronenschalen. Die in diesen Bereichen angesiedelten Kerne sind besonders stabil. An die Spitze des Festlandes oben rechts schließen sich einzelne „Inseln“ an, die vom Meer der nicht herstellbaren Elemente umgeben sind. Das Element 114 sollte nach der Theorie eine längere Lebensdauer besitzen als die anderen Inseln, da es eine vollständig besetzte Protonenschale hat. Als es im vergangenen Jahr von russischen Wissenschaftlern erzeugt wurde, zerfiel es allerdings schon nach wenigen Sekunden. (Grafik: GSI)

Die Überreste der Supernova aus dem Jahr 1054 bilden heute den 6000 Lichtjahre entfernten Krebsnebel. (Foto: ESO)

Rezepte aus dem Kochbuch der Sterne

Kernphysiker vollziehen im Labor nach, wie die schweren Elemente im Kosmos zusammengebraut werden

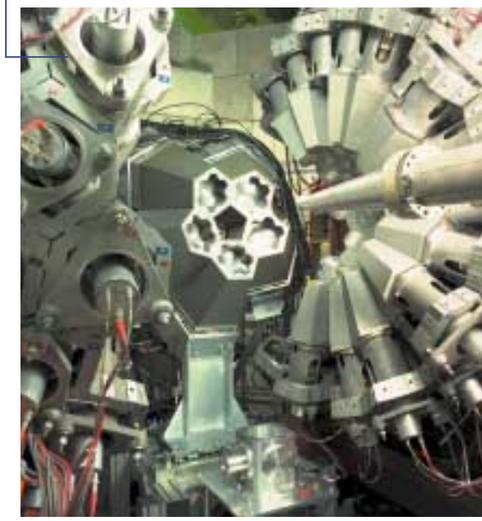
Am vierten Juli 1054 meldeten Chinas Astrologen ihrem Kaiser ein ungewöhnliches Ereignis: In der Nacht war plötzlich ein neuer, auffällig hell leuchtender Stern am Firmament aufgeflammt. Hoch erfreut ließ der Kaiser im ganzen Land Feste zu Ehren des Neuankömmlings ausrichten. Denn seine Astrologen sahen in dem „Sternengast", wie die Himmelserscheinung in den Annalen der Sung Dynastie genannt wird, einen „Lebensspender", der „reiche Ernten für die kommenden Jahre" versprach.

Ob Chinas Bauern in der Folgezeit tatsächlich bessere Erträge erzielten, ist nicht überliefert. Man weiß heute aber, dass die kaiserlichen Sterndeuter mit ihrer Interpretation des Himmelsphänomens als „Lebensspender" gar nicht so unrecht hatten. Was sie beobachtet hatten, war nämlich die gewaltige Explosion einer Supernova.

Beim dramatischen Ende eines massereichen Sterns, einer sogenannten Supernova, entsteht ein großer Teil jener Atome, ohne die sich Pflanzen und Tiere auf der Erde nie entwickelt hätten. „Alle schweren Elemente auf unserem Planeten wurden in den Sternküchen des Universums zusammengebraut", sagt Karl-Ludwig Kratz, Kernchemiker an der Universität Mainz. „Wollen wir verstehen, woher Kohlenstoff, Jod oder Gold stammen, müssen wir uns die Reaktionen anschauen, die im Inneren der Sterne ablaufen."

Weil es schwierig ist, von der Erde aus in die Kochtöpfe der Sterne zu schielen, versuchen Kernphysiker das kosmische Geschehen im Labor nachzustellen. Dabei richten sie ihr Augenmerk vor allem auf die Synthese der Atome, die schwerer als Eisen sind. Denn wie die Elemente bis Eisen entstehen, ist hinlänglich bekannt. Sie bilden sich beim Verschmelzen leichterer Kerne im Zentrum der Sterne. Eisenatome sind aber so stabil, dass ein Zusammenschluss mit weiteren Kernen keinen Energiegewinn bringt und daher selten stattfindet. Massereichere Elemente müssen in den Sternen also nach anderen Kochvorschriften angerührt werden.

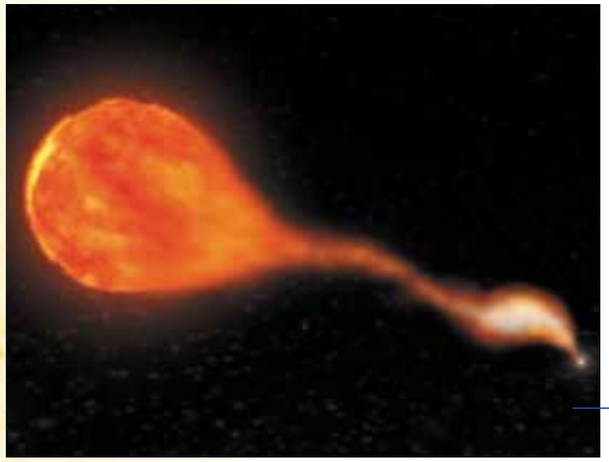
Ein mögliches Rezept ist der Einfang von Neutronen. Normalerweise kommen übermäßig neutronenhaltige Kerne in der Natur nicht vor. Bei einer Supernova-Explosion bilden sich im Inneren des zerberstenden Sterns jedoch extrem dichte Neutronenflüsse. Wenn ein Kern in diesen Strom gerät, kann er innerhalb von wenigen Sekunden eine Vielzahl zusätzlicher Neutronen an sich binden. Es entstehen kurzlebige massereiche Kerne, die sich sogleich über so genannte Beta-Zerfälle weiterverwandeln – solange, bis schließlich ein neues stabiles Element zurückbleibt. Um den stellaren Schöpfungsakt eingehend zu studieren, erzeugen die Kernphysiker künstlich neutronenreiche Kerne. Am Beschleuniger der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) in Darmstadt werden beispielsweise Uranpartikel auf eine zentimeterdicke Metallscheibe geschossen. Die besonders neutronenhaltigen Trümmer werden in einem komplizierten Filtersystem nach Kernladung sowie Masse getrennt und anschließend untersucht. Aus den Bildungswahrscheinlichkeiten und Zerfallseigenschaften der neutronenreichen Kerne können die Wissenschaftler ermitteln, mit welcher Häufigkeit die schweren Elemente entstehen.



Mit dem „Crystal-Ball"-Detektor der GSI untersuchen die Wissenschaftler besonders neutronenhaltige Kerne. (Foto: GSI)

Explodierende Sterne sind allerdings nicht die einzigen Produktionsstätten für schwere Elemente im All. Auch in „Roten Riesen“ formen sich massereiche Kerne. In ihrer letzten Lebensphase zu einem gigantischen rötlich leuchtenden Feuerball aufgebläht, beziehen solche Gestirne einen Teil ihrer Energie aus dem Verschmelzen von Heliumkernen zu Kohlenstoff. Dabei werden Neutronen freigesetzt, die sich mit leichteren Atomkernen in der Gashülle des Sterns verbinden und neue stabile Elemente bilden können. Weil die Temperaturen, der Druck und die Zahl der herumschwirrenden Neutronen in Roten Riesen längst nicht so hoch sind wie bei einer Supernova-Eruption, dauert die Elementsynthese diesmal keine Sekunden, sondern Jahrtausende.

In beiden Prozessen zusammen werden rund 99 Prozent aller schweren Elemente erzeugt. Die anderen bevorzugen einen exklusiveren Entstehungsweg. Anstatt Neutronen anzulagern, verleiben sie sich zusätzliche Protonen ein. Dies geschieht zum Beispiel dann, wenn Wasserstoffgas



Doppelsternsystem aus einem Roten Riesen und einem stark magnetischen Weißen Zwerg. Wasserstoffgas aus der Hülle des Roten Riesen strömt in einer „Akkretionssäule“ direkt auf die Oberfläche des Weißen Zwergs. (Grafik: I&P)

aus der Hülle eines Roten Riesen auf einen benachbarten, schon erloschenen Stern trifft. Das Gas entzündet sich an der Oberfläche dieses „Weißen Zwergs“ und es kommt zu einer Kernexplosion. In diesem Nova-Ausbruch verschmelzen Protonen aus dem Wasserstoffgas mit Atomkernen des Zwergsterns. Am Beschleunigerzentrum CERN will ein internationales Wissenschaftlerteam demnächst die so entstehenden Kerne unter die Lupe nehmen. „Denn nur wenn wir alle Prozesse genau kennen, die zur Elementsynthese im Universum beitragen, können wir die zugehörigen astrophysikalischen Theorien testen“, sagt Dieter Habs von der Universität München, der das Projekt mit dem Namen „Rex-Isolde“ mitentwickelt hat. Und nur dann läßt sich nachvollziehen, wie der Staub aus den Sternküchen einst Leben in unsere Welt gebracht hat. *ad*

Strahlführung innerhalb des Rex-Isolde-Experiments. (Foto: CERN)

Schwere Geschütze gegen den Krebs

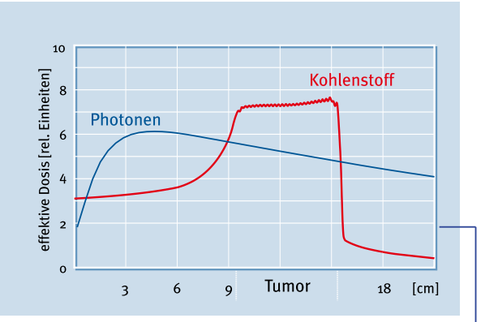
Eine Reportage

Die Physiker und Mediziner, die an der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) Tumore bestrahlen, haben alles getan, damit ihre Patienten von den riesigen Ausmaßen der Anlage möglichst wenig mitbekommen. Der Bestrahlungsraum sieht fast aus wie das Röntgenzimmer in einer gewöhnlichen Unfall-Praxis. Doch die Teilchen, die die bösartigen Krebszellen bekämpfen sollen, werden in haushohen Hallen hergestellt und in einem unterirdischen Ringbeschleuniger von mehr als 200 Metern Länge auf nahezu Lichtgeschwindigkeit gebracht.

Andrea Bayer*, die Patientin mit der Nummer 45 in dem Pilotprojekt, wird heute zum letzten Mal bestrahlt. 20 Behandlungstage hat sie schon hinter sich gebracht. Sie rutscht, mit dem Rücken auf einem schwenkbaren Tisch liegend, rückwärts in ihre Kopfmaske. „Am Anfang war das sehr schwierig“, sagt sie. „Doch mittlerweile belastet mich das eigentlich überhaupt nicht mehr.“ Die Maske aus Kunststoff, die ihren Kopf während der Bestrahlung fixieren soll, lässt sich nur dreifingerbreit öffnen, damit sich nichts verschiebt und sie immer exakt am Schädel anliegt. Die Maske bedeckt das ganze Gesicht: Mund, Augen und Ohren. Nur ein kleines Loch für die Nase ist freigeblieben.

**Name von der Redaktion geändert.*

Tumorbestrahlung mit schweren Ionen. Das Austrittsfenster für den Teilchenstrahl liegt links neben dem Kopf des Patienten. Mit Hilfe einer Maske wird der Kopf fixiert. Unter den Verkleidungen oben und unten befinden sich die beiden PET-Kameras, die vom Forschungszentrum Rossendorf (bei Dresden) entwickelt wurden. (Foto: GSI)



Hier ist die biologisch effektive Dosis für Photonen (Röntgen- bzw. Gammastrahlung) und Kohlenstoff-Ionen aufgetragen über der Eindringtiefe im Gewebe. Während die Photonen ein Maximum ihrer Energie bereits auf dem Weg zum Tumor im gesunden Gewebe verlieren, geben die Ionen den Großteil ihrer Energie erst im Tumorvolumen ab. (Grafik: GSI)

Vor drei Jahren hatte Andrea Bayer plötzlich Schwierigkeiten, auf dem rechten Ohr zu hören. Was zunächst wie ein Tubenkatarrh aussah, diagnostizierten die Ärzte schließlich durch eine Computer-Tomografie als langsam wachsenden, seltenen Gehirn-Tumor. Der Chirurg machte Andrea Bayer aufmerksam auf das gemeinsame Forschungsprojekt von GSI, der Radiologischen Klinik in Heidelberg, dem Deutschen Krebsforschungszentrum (DKFZ) und dem Forschungszentrum Rossendorf.

Jetzt liegt die Patientin in ihrer Maske, die fest mit dem Behandlungstisch verschraubt ist. Mit Hilfe eines millimetergenauen Messrahmens und eines Laser-Justiersystems richten die Ärzte ihren Kopf aus. Eine Röntgenkamera fährt von der Decke, die Mediziner machen eine letzte Kontrollaufnahme. Alles ist in Ordnung, Andrea Bayer liegt genauso in der Maske wie bei der Eingangsuntersuchung im Krebsforschungszentrum.

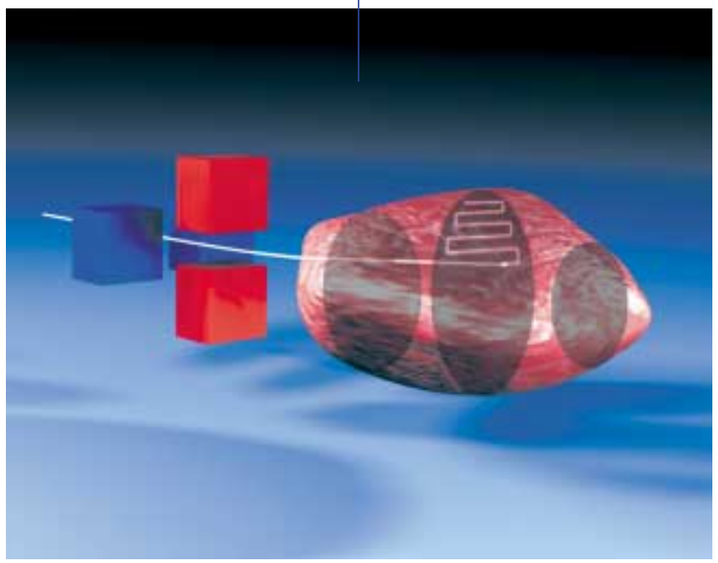
Jürgen Debus, Physiker und Mediziner, schaut sich auf dem Schirm im Kontrollraum noch einmal den mit Hilfe einer Computertomografie erstellten Bestrahlungsplan an. Dann gibt er den Strahl frei. Lautlos, unsichtbar und vollkommen schmerzfrei dringen elektrisch geladene Kohlenstoffatome, sogenannte schwere Ionen, für nur wenige Minuten in den Kopf der Patientin ein.

Gegenüber der herkömmlichen Strahlentherapie mit Photonen hat die Verwendung von Kohlenstoffionen einen entscheidenden Vorteil: „Mit diesen Teilchen kann man punktgenau einen Tumor zerstören“, sagt Debus. „Das umliegende gesunde Gewebe wird weitestgehend geschont.“ Denn die schweren Ionen geben fast ihre gesamte Energie erst am Ende ihrer Bahn im Gewebe ab.

Während Andrea Bayer allein im Bestrahlungsraum liegt, wird sie per Videokamera überwacht. Mit einem Klingelknopf in ihrer Hand kann sie sich jederzeit beim Ärzteteam bemerkbar machen. Schon direkt nach der Bestrahlung können die Mediziner feststellen, ob die Behandlung nach Plan verlaufen ist. Über zwei so genannte PET-Kameras kann die Bahn des Ionenstrahls im Gewebe rekonstruiert werden.

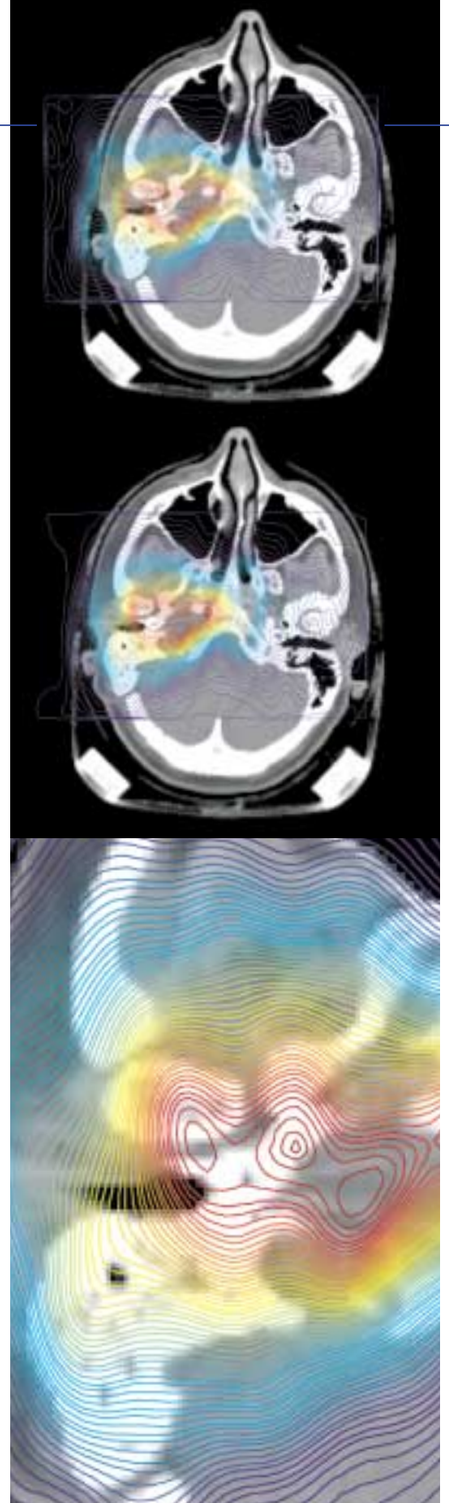
„Das PET-Verfahren ist zusammen mit der Raster-Scan-Methode weltweit einmalig“, sagt Gerhard Kraft, Leiter der Biophysik an der GSI. Er und seine Mitarbeiter haben 20 Jahre lang geforscht, über 100 000 Zellkulturen bestrahlt. Nach vierjähriger Bauzeit wurden Ende 1997 die ersten Patienten in der Pilotanlage behandelt. „Bisher konnten wir das Wachstum aller Tumoren stoppen“, sagt Kraft. „Wir hoffen, dass auch in den nächsten Jahren die Geschwulst bei den Patienten nicht wiederkommt.“

Mit dieser Hoffnung fährt auch Andrea Bayer zurück zu ihrem vorübergehenden Domizil, einem Wohnwagen auf einem Campingplatz im Odenwald. Dort hatte sie sich während der dreiwöchigen Behandlung mit ihrem Mann zusammen einquartiert. „Es sollte schon ein bisschen Urlaubsstimmung dabei sein“, sagt sie. „Wenn man immer an den Tumor denkt, kann man ja nur noch kränker werden.“ *wr*



Beim Raster-Scan-Verfahren wird der Ionenstrahl – ähnlich wie der Elektronenstrahl beim Fernseher – von Magneten horizontal und vertikal abgelenkt. Auf diese Weise kann eine Schicht des Tumors Punkt für Punkt abgerastert werden. Über die Variation der Strahlenergie wird die Reichweite verändert – so ist es möglich, ein dreidimensionales Tumorvolumen mit dem Ionenstrahl haargenau abzutasten. (Grafik: I&P)

Computertomogramm eines Patienten. Oben wurde dem Bild die aus dem Bestrahlungsplan berechnete Soll-Aktivitätsverteilung der Kohlenstoffisotope überlagert. Unten ist das Ergebnis der PET-Messung dargestellt. Der Vergleich der Bilder zeigt, wie genau die Bestrahlungsplanung durch die neue Technik realisiert werden kann. (Fotos: GSI)

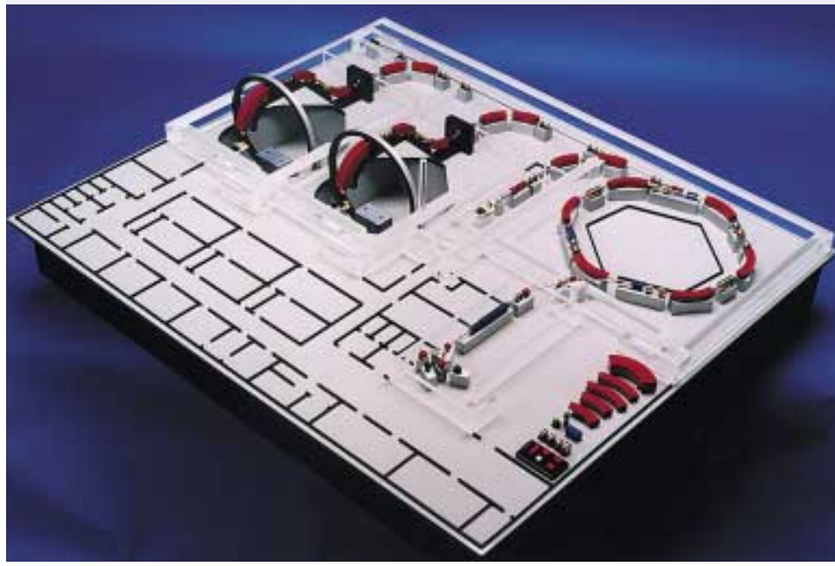


Das PET-Verfahren

Auf seinem Weg durch das Gewebe wird ein kleiner Teil des Ionenstrahls in radioaktive Isotope umgewandelt, die fast die gleiche Reichweite haben wie der Strahl selber. Sie setzen Positronen frei, die Antiteilchen des Elektrons. Praktisch sofort nach der Aussendung stößt dieses Positron mit einem Elektron in der nächsten Umgebung zusammen und beide werden in einem Energieblitz vernichtet. Es entstehen zwei Photonen, die unter einem Winkel von 180 Grad den Kopf praktisch ungehindert verlassen. Beide werden von den zwei gegenüberliegenden PET-Kameras zeitgleich registriert. So kann man auf den Entstehungsort und damit auf den Verlauf des Ionenstrahls im Gewebe zurückschließen.

Der nächste Schritt – Bau einer klinischen Anlage zur Krebstherapie

Während die Pilotphase an der GSI noch läuft, planen die Wissenschaftler bereits eine Strahlenklinik, die ihre Patienten nur mit den neuen Kohlenstoff-Strahlen behandeln soll. Nach dem vorgelegten Klinikvorschlag sollen 1000 Patienten pro Jahr bestrahlt werden können. Dafür muss keine zweite GSI gebaut werden. Die geringen, für die Bestrahlung benötigten Energien liefert ein kleiner Ringbeschleuniger. Er findet in einem Gebäude mit 60 mal 80 Metern Grundfläche Platz, in dem auch drei Bestrahlungsplätze untergebracht werden können. Zwei davon (sogenannte Gantrys) sollen eine Rotation des Strahls um den Patienten ermöglichen. Mit dieser für Ionen weltweit neuen Technik wird es möglich sein, die Patienten aus jeder beliebigen Richtung mit Ionenstrahlen zu behandeln. Dies würde eine Erweiterung der Therapiemöglichkeiten – über den Kopf und Halsbereich hinaus – bedeuten. Die Investitionskosten der Anlage liegen bei 150 Mio. DM. Für einen kostendeckenden Betrieb werden die Behandlungskosten vergleichbar sein mit denen einer Operation oder einer Chemotherapie. (Foto: GSI)



Teilchenbeschleuniger der Superlative

DESY plant mit TESLA ein einzigartiges Forschungswerkzeug

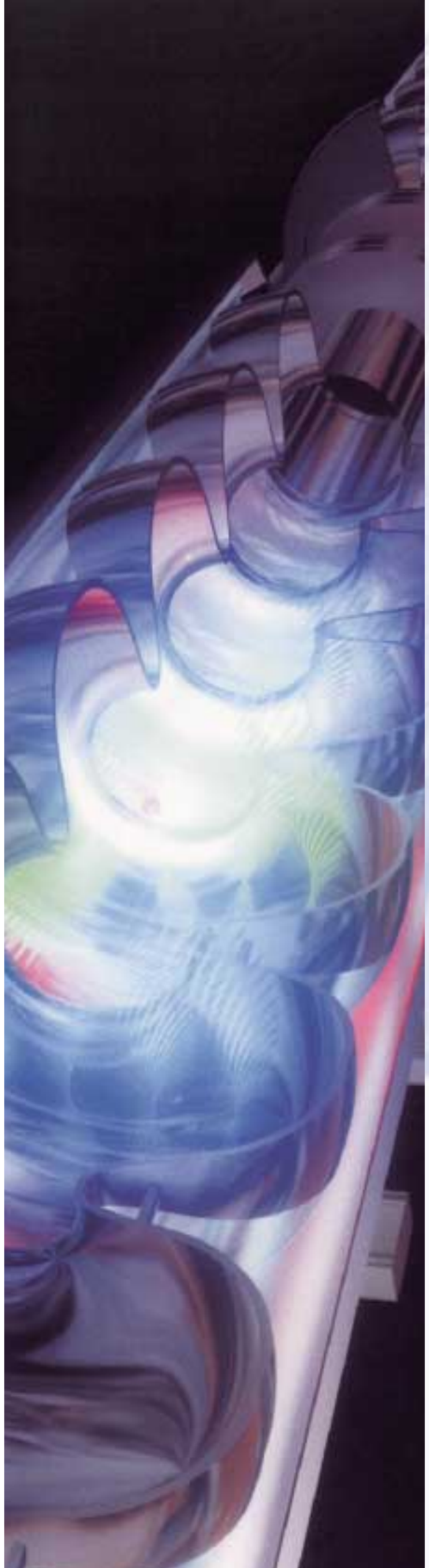
Linear Collider
Bisher arbeiten die Forscher überwiegend mit kreisförmigen Beschleunigern – den Speicherringen. In ihnen laufen Teilchenpakete etwa aus Elektronen über Stunden im Kreis und werden immer wieder für Kollisionen genutzt. Aber: Die Elektronen geben so genannte Synchrotronstrahlung ab und verlieren Energie. Bislang ließ sich diese Klippe mit immer größeren Kreisbeschleunigern umschiffen, etwa dem 27 Kilometer umfassenden LEP am CERN. Noch größere Ringe sind jedoch zu teuer. Deshalb wollen die Experten bei TESLA die Elektronen geradeaus schicken und so die unliebsamen Strahlungsverluste vermeiden. Dabei müssen die Teilchenpakete sehr kräftig beschleunigt und gebündelt sowie äußerst präzise geführt werden, da sie ihre Rennstrecke nur ein einziges Mal durchlaufen. (Grafik: DESY)

Er beginnt in Hamburg-Bahrenfeld und endet im gut 30 Kilometer entfernten Dörfchen Westerhorn. TESLA soll eine der größten Wissenschaftsmaschinen der Welt werden. Physiker des Teilchenforschungszentrums DESY in Hamburg planen gemeinsam mit 38 Instituten aus neun Ländern den Riesenbeschleuniger, um in völlig neue Bereiche der Physik vorzustoßen.

TESLA (Teraelektronenvolt-Superconducting-Linearaccelerator) ist ein Linear Collider, bestehend aus zwei schnurgeraden, sich frontal gegenüberstehenden Einzelbeschleunigern. Der eine soll Elektronen, der andere Positronen (Antielektronen) praktisch auf Lichtgeschwindigkeit bringen. Am Berührungspunkt prallen die Elektronen und Positronen mit enormer Wucht aufeinander. Dabei entstehen neue, exotische Teilchen, die von haushohen Detektoren nachgewiesen werden. Mit TESLA haben es die Physiker insbesondere auf zwei bislang unentdeckte Gruppen von Teilchen abgesehen: Higgs-Partikel sowie SUSY-Teilchen. Außerdem soll der Superbeschleuniger bekannte Teilchen wie das Top-Quark viel genauer untersuchen, als das bisher möglich ist. TESLAs Energie soll die des heutigen Rekordhalters LEP um das Zweieinhalbfache, später um das Fünffache übertreffen.

Higgs-Teilchen:
Der Higgs-Mechanismus erklärt, wie Teilchen wie Quarks zu ihrer Masse kommen. Stimmt diese Theorie, so muss es ein neues, bislang unentdecktes Partikel geben – das Higgs-Teilchen. TESLA soll dieses Teilchen erzeugen und im Detail untersuchen.

Supersymmetrie (SUSY):
eine Theorie, die über das Standardmodell hinausgeht. In Kurzform besagt SUSY, dass jedes der heute bekannten Materieteilchen einen noch unbekannten Partner aus dem Reich der Kräfteteilchen haben muss – und umgekehrt. Damit wäre SUSY die fehlende Verbindung zwischen Materie und Kraft – ein Meilenstein auf dem Weg zu einer einheitlichen Physik.



Supraleitende Beschleunigung:
In Supraleitern kann elektrischer Strom völlig verlustfrei fließen – vorausgesetzt, sie werden mit Flüssighelium auf minus 270 Grad Celsius gekühlt. Die TESLA-Forscher haben es geschafft, dieses Prinzip auf den Linear Collider zu übertragen. Dadurch kann TESLA den Strom aus dem Netz äußerst effektiv in Beschleunigerleistung umwandeln.

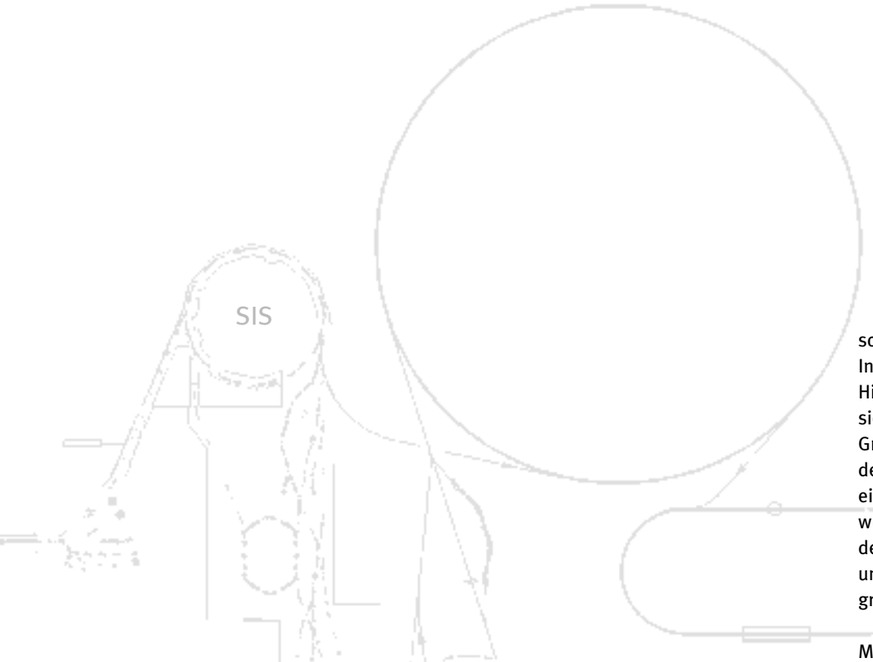
Röntgenlaser:
Spezialmagnete (Undulatoren) sollen die schnellen Elektronen von TESLA ins Schlingern bringen und sie zum Aussenden eines hochintensiven Röntgenstrahls zwingen. Der wäre bis zu 100 Millionen mal stärker als die heutigen Röntgenquellen und hätte die Eigenschaften von Laserlicht. In Hamburg wird dieses Prinzip in einer 300 Meter langen Testanlage erprobt, die ab 2003 Forschern aus aller Welt als einzigartiger UV-Laser dienen soll. Am 21.2.2000 wurde bereits erstes Laserlicht beobachtet.

Das Prinzip eines Linear Colliders gilt als vielversprechend, auch Japan und die USA arbeiten an Prototypen. Beide Konzepte unterscheiden sich deutlich von TESLA: Sie benutzen herkömmliche, normalleitende Technologie statt der innovativen supraleitenden Beschleuniger. Ein weiteres Plus von TESLA: Er soll zusätzlich als Röntgenlaser fungieren – eine weltweit einzigartige „Superlampe“, die der Forschung ganz neue Einblicke eröffnen würde. Physiker, Chemiker, Materialforscher und Molekularbiologen könnten ihre Proben so detailliert wie noch nie unter die Lupe nehmen.

Im kommenden Jahr soll ein ausgearbeiteter Projektvorschlag vorliegen. Ende des Jahrzehnts könnte der Superbeschleuniger fertig sein – eine ideale Ergänzung zum „Large Hadron Collider“ in Genf, einem Speicherring mit 27 Kilometern Umfang. Der LHC wird ab 2005 Protonen aufeinanderschießen. Damit erreicht er zwar deutlich höhere Energien als TESLA, aber die Analyse der Stoßprozesse ist ungleich schwieriger. LHC ist eine „Entdeckungsmaschine“ für Higgs- und SUSY-Partikel, TESLA ein Präzisionsinstrument, das die neuen Teilchen finden und vor allem im Detail untersuchen kann. *fg*

In den supraleitenden Niob-Resonatoren schwingen elektromagnetische Felder, die die Elektronen beschleunigen. (Grafik: DESY)

Test der supraleitenden Beschleunigerstruktur im Reinraum. (Foto: DESY)



„Starkstrom“ für Kernforscher

GSI plant neuen Hochenergie- und Höchststrombeschleuniger

Blick entlang des SIS-Beschleunigerrings der GSI, mit dem die schweren Ionen bis auf 90 % der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden können. Das SIS, das einen Umfang von 216 Metern hat, wurde 1990 in Betrieb genommen. Nun soll die Anlage um einen weiteren, größeren Ring ergänzt werden.

Mehr Strom und mehr Energie – das wünscht sich die Gesellschaft für Schwerionenforschung GSI für ihre Schwerionenstrahlen in der Zukunft. Um den Plan in die Tat umzusetzen, entwerfen die Darmstädter Kernphysiker derzeit das Konzept für einen „Höchststrombeschleuniger“. Er soll Teilchenstrahlen auf Trab bringen, die bis zu Tausend Mal mehr Ionen enthalten als heutige Anlagen. Gleichzeitig soll die Energie der beschleunigten Partikel um mehr als das Zehnfache wachsen.

Derzeit werden in Darmstadt unter anderem „nackte“ Urankerne beschleunigt; sie sind ihrer Elektronenhülle vollständig beraubt. Die Kerngeschosse tragen eine 92fache elektrische Ladung und lassen sich höchst effektiv durch elektrische Wechselfelder auf Geschwindigkeit bringen. Das Problem: Die Urankerne stoßen sich heftig ab und lassen sich deshalb nur widerwillig zu Paketen schnüren – der Ionenstrahl verliert an Intensität. Anders beim neuen Konzept: Hier sollen die Kerne „nur“ 28fach ionisiert werden. Sie behalten also einen Großteil ihres Elektronenkleides – was es den Teilchen erlaubt, im Strahl enger aneinanderzurücken. Um dennoch die gewünschte Energie zu erreichen, muss das derzeitige Beschleunigerarsenal der GSI um einen weiteren, einige hundert Meter großen Ring ergänzt werden.

Mit dem extrem dichten Uranstrahl ließen sich wesentlich intensivere „Sekundärstrahlen“ zum Beispiel aus kurzlebigen, radioaktiven Kernen oder aus Antiprotonen erzeugen. Mit dem neuen Gerät wollen die Forscher unter anderem folgende Probleme der aktuellen Forschung angehen:

- Kernmaterie: Welche Kraft hält die Nukleonen im Kern zusammen? Wie verhält sich diese zur „starken Kraft“, die zwischen den Quarkteilchen wirkt? Wie verhalten sich Kerne an den Grenzen der Stabilität?

- Nukleare Astrophysik: Wie funktioniert der „Elementkochtopf“ bei einem Supernova-Ausbruch im Detail? Was passiert mit der Kernmaterie in extrem dichten Neutronensternen?

- Standardmodell: Zeigen sich beim Zerfall ungewöhnlicher Kerne womöglich Phänomene, die mit der „herkömmlichen“ Physik des Standardmodells nicht mehr zu verstehen sind?

- Plasmaphysik: Taugt ein Schwerionenbeschleuniger in ferner Zukunft als Grundlage für ein Fusionskraftwerk?

Innerhalb von drei Jahren könnte ein baureifer Projektvorschlag auf dem Tisch liegen. Bis dahin müssen die GSI-Experten unter anderem supraleitende Spezialmagnete entwickeln. Diese müssen, um den Ionenstrahl auf der Kurvenbahn zu halten, ihr Magnetfeld äußerst schnell auf- und abbauen können. *fg*

High-Tech und Völkerverständigung

Rolf-Dieter Heuer

Ein Großexperiment zur Teilchenphysik dauert bis zu zwanzig Jahre. Mehrere hundert Wissenschaftler aus der ganzen Welt sind gewöhnlich daran beteiligt. Wie funktioniert die Zusammenarbeit in diesen riesigen, internationalen Forschergruppen? Worin besteht der Reiz solcher Projekte für junge Leute? Ein Gespräch mit dem Hamburger Teilchenphysiker Rolf-Dieter Heuer*.

Weshalb benötigt man in der Teilchenforschung Teams, die aus 1500 Wissenschaftlern bestehen?
Heuer: Zu erforschen, „was die Welt im Innersten zusammenhält“, ist ein wissenschaftlich und technisch enorm anspruchsvolles Vorhaben. Man muss dazu auf das Know-how von Fachleuten aus der ganzen Welt zurückgreifen, also möglichst viele Experten zusammentrommeln. Außerdem sind unsere Projekte in der Regel zu teuer, um sie im Alleingang zu bewältigen. Kein einzelnes Land könnte sich beispielsweise die Entwicklung eines neuen Linearbeschleunigers wie „TESLA“ leisten.

Wie werden solche Riesenprojekte koordiniert?
Heuer: Wie ein kleines Unternehmen hat jede Kollaboration – so nennen wir die Forschergruppen – eine Art Pyramidenstruktur. An der Spitze steht ein kleines Leitungsteam. Ihm arbeitet das „Collaboration-Board“ zu, ein vielköpfiges Gremium, in dem Vertreter der beteiligten Universitäten oder Länder sitzen. Zusätzlich gibt es noch technische Koordinatoren, die zum Beispiel für den Bau des Detektors zuständig sind.
Anders als in der Industrie ist bei uns jedoch niemand weisungsgebunden. Die Zusammenarbeit in der Gruppe basiert allein auf der Verlässlichkeit der Beteiligten, darauf, dass die Leute freiwillig halten, was sie versprochen haben. Weil alle am Gelingen des Experiments interessiert sind, funktioniert dieses zwangfreie System extrem gut. Am Ende passen tonnenschwere Detektorbauteile, die aus allen möglichen Ländern der Erde stammen, bis auf Zehntelmillimeter genau zusammen.

Wie läuft denn so ein Experiment ab?
Heuer: Unter einem Experiment in der Teilchenphysik versteht man etwas ganz anderes als unter einem Experiment im Physik- oder Chemieunterricht. In der Teilchenforschung zieht sich ein Experiment über 20 bis 25 Jahre hin. Es beginnt mit der Detektorplanung und endet mit der Analyse der letzten Signale. Dazwischen liegen viele Jahre Datennahme. Weil wir gleichzeitig ganz unterschiedlichen Fragestellungen nachgehen, liefert uns ein Experiment Hunderte verschiedene Ergebnisse.

Geht man als junger Diplomand oder Doktorand in einer großen Kollaboration nicht vollkommen unter?
Heuer: Nein, keineswegs. Ich denke, die großen Gruppen sind für junge Wissenschaftler eher eine Chance als ein Handikap. Wenn Doktoranden und Diplomanden am Detektor ihre Schichten schieben, manchmal auch mitten in der Nacht Daten aufnehmen, dann kann etwas von der kollektiven Begeisterung überspringen, die man als Einzelkämpfer am Schreibtisch nie hat. Die jungen Wissenschaftler üben, im direkten Wettbewerb mit ihren Forscherkollegen mitzuhalten, zügig zu arbeiten und ihre Ergebnisse bei Diskussionen innerhalb der Kollaboration gegen Einwände zu verteidigen. Das schafft gute Grundlagen für eine Karriere nicht nur in der Wissenschaft.

Wie sind denn die Berufschancen für Teilchenphysiker, die nicht in der Forschung bleiben wollen?
Heuer: Meiner Ansicht nach sehr gut. Die Kollaborationen sind eine tolle Schule für junge Leute, die später in die Industrie gehen möchten. Denn in den Großexperimenten übt man genau das, was in Firmen gefragt ist: Teamarbeit, Umgang mit modernster Technologie und sicheres Auftreten auf internationalem Parkett. Wer möchte, lernt bei uns nicht nur Physik, sondern auch viel über die Eigenheiten anderer Kulturen, kann Freundschaften mit Wissenschaftlern aus aller Welt schließen. Nach mehr als zwanzig Jahren Mitarbeit in Kollaborationen treffe ich beispielsweise fast bei jeder Berufsreise auf Freunde oder Bekannte. Das finde ich sehr schön.

Heißt das, die Teilchenphysik trägt in gewissem Sinn zur Völkerverständigung bei?
Heuer: Davon bin ich überzeugt. Wenn man sich die Geschichte von CERN oder DESY anschaut, sieht man, dass dort zum Beispiel Russen, Amerikaner und Chinesen schon immer zusammengearbeitet haben. Den Kalten Krieg gab es auf wissenschaftlicher Ebene in den Kollaborationen nicht. Forscher, die an internationalen Teams beteiligt sind, berichten zuhause von ihren Erfahrungen und vermitteln ihren Landsleuten, dass die Menschen aus den anderen Ländern durchaus vertrauenswürdig sind. Das trägt sicher viel zum Abbau von Vorurteilen bei, auch heute noch.

**Rolf-Dieter Heuer ist Professor für experimentelle Teilchenphysik an der Universität Hamburg und gehört seit 1998 zum Planungskommittee des Linearbeschleunigers „TESLA“. Zuvor war er mehrere Jahre lang Leiter eines Großexperiments am europäischen Teilchenforschungslabor CERN in Genf.*

Das Interview mit Rolf-Dieter Heuer führte Astrid Dähn.

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

bmb+f

Diese Druckschrift wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unentgeltlich abgegeben. Sie ist nicht zum gewerblichen Vertrieb bestimmt. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlbewerbern oder Wahlhelfern während eines Wahlkampfes zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Bundestags-, Landtags- und Kommunalwahlen sowie für Wahlen zum Europäischen Parlament. Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen und an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zwecke der Wahlwerbung.

Unabhängig davon, wann, auf welchem Weg und in welcher Anzahl diese Schrift dem Empfänger zugegangen ist, darf sie auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Bundesregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

BMBF PUBLIK