

# Urknall auf Erden

In diesem Sommer nimmt nahe Genf der stärkste Teilchenbeschleuniger aller Zeiten den Betrieb auf. Die Forscher wollen darin das Feuer des Urknalls zünden. Das komplizierteste Experiment der Menschheitsgeschichte soll klären, woraus das Universum besteht und wie es entstanden ist.

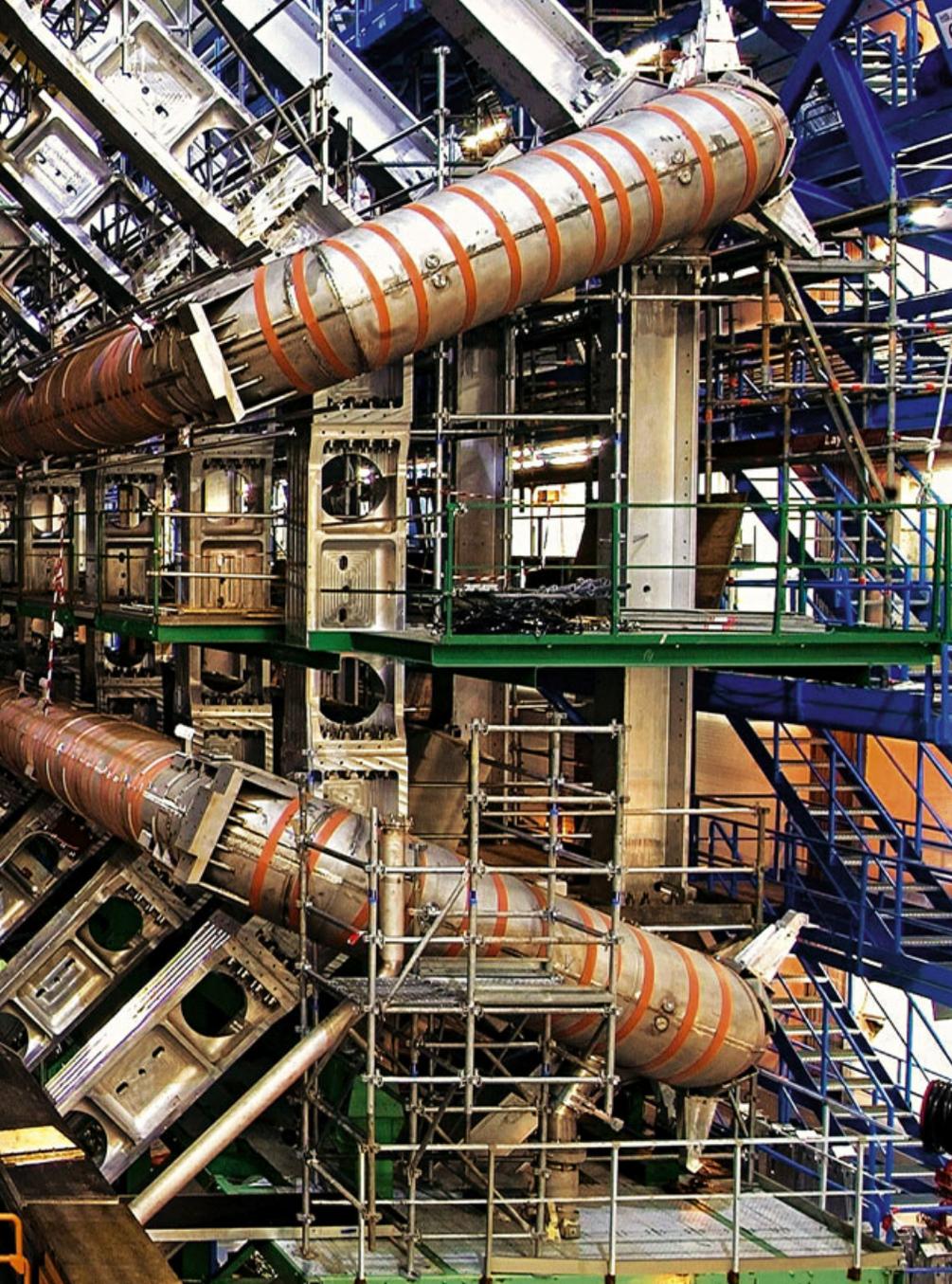
**G**ewiss, nach menschlichem Maßstab mag eine glühende Herdplatte heiß erscheinen. Wie erst muss sich da das Innere der Sonne anfühlen, wo die Temperaturen vieltausendfach höher sind? Vollends versagt die Vorstellungskraft angesichts einer Sternexplosion, bei der es nochmals mehr als tausendmal heißer werden kann. 200 Milliarden Grad Celsius: Was soll so eine Zahl noch bedeuten?

Und doch ist selbst eine Supernova geradezu kühl gemessen an den Temperaturen, die Jürgen Schukraft, zusammen mit rund tausend Forscherkollegen, erzeugen will. Sein Ziel ist es, einen Feuerball zu schaffen, der bei einigen Billionen Grad Hitze lodert.

Zünden soll dieser Superblitz inmitten eines eisernen 10 000-Tonnen-Kolosses, der am Forschungszentrum Cern bei Genf in

60 Meter Tiefe in einer gewaltigen Kaverne auf Signale lauert. „Alice“ haben die Forscher dieses Monster genannt.

Jahrelang sind sie in seinen Gedärmen umhergekrochen, haben Silizium-Detektoren, Spektrometer und Driftkammern millimetergenau zusammengesetzt. Überall quellen nun Daten- und Stromkabel aus dem Gerät, Leitungen für zehn verschiedene Gase durchlaufen es wie die Blut-



## Bau des „Atlas“-Detektors

„Die Welt der Physik wird sich verändern“

soll. „Niemand hat mit so etwas mehr Erfahrung“, so Schukraft.

Und auch die Blei-Wolframat-Kristalle, mit deren Hilfe sich die erzeugte Temperatur messen lässt, stammen aus russischer Produktion. Anfang der neunziger Jahre, berichtet Schukraft, habe er in der gerade zerfallenen Sowjetunion für sein großes Vorhaben geworben: „Plötzlich trat da einer an mich heran. Wie ein Drogenhändler zog er ein schmutziggelbes Kristall aus der Tasche und fragte, ob wir nicht etwas damit anfangen könnten.“ Inzwischen sind knapp 18 000 von ihnen im Photonenspektrometer von Alice verbaut.

Nun also ist das Monstrum fertig. Nun werden die Forscher es kennenlernen müssen. Auf Dutzenden Monitoren überwachen sie all die Temperatursensoren, sie fahnden danach, wo noch Gas aus den Kammern, Leitungen und Zählern entweicht, prüfen, wo vielleicht ein Techniker eines der Zigttausenden Kabel nicht richtig gesteckt hat.

Ihr eigentliches Interesse aber richtet sich aufs Innerste von Alice. Dort verläuft mitten durch den Wust von Messelektronik ein armdickes Rohr aus Beryllium. Ihm gilt all der Aufwand. Denn hierin wollen die Forscher schon bald das Urfeuer zünden – jede Sekunde rund 10 000-mal soll hier die Hitze des Urknalls lodern.

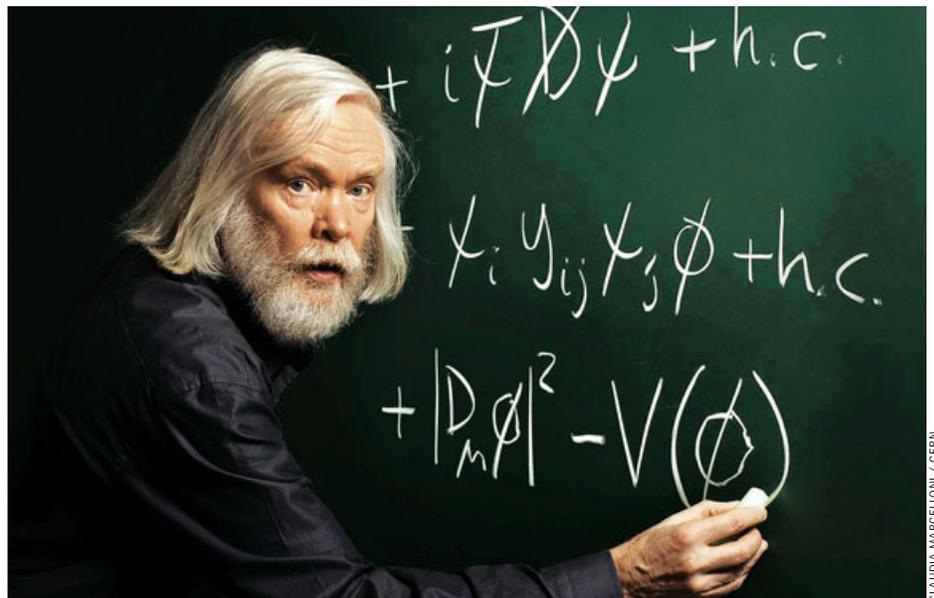
Das Rohr ist Teil des gewaltigen Beschleunigerrings „LHC“ („Large Hadron Collider“) am Cern, der in wenigen Wochen seinen Betrieb aufnehmen soll. Mehr als drei Milliarden Euro hat er gekostet, ein Fünftel davon hat die Bundesregierung gezahlt. Nun wollen die Forscher hier das größte wissenschaftliche Experiment der Menschheitsgeschichte starten.

Mit geradezu kosmischer Wucht schleudern sie dazu Teilchen aufeinander, um de-

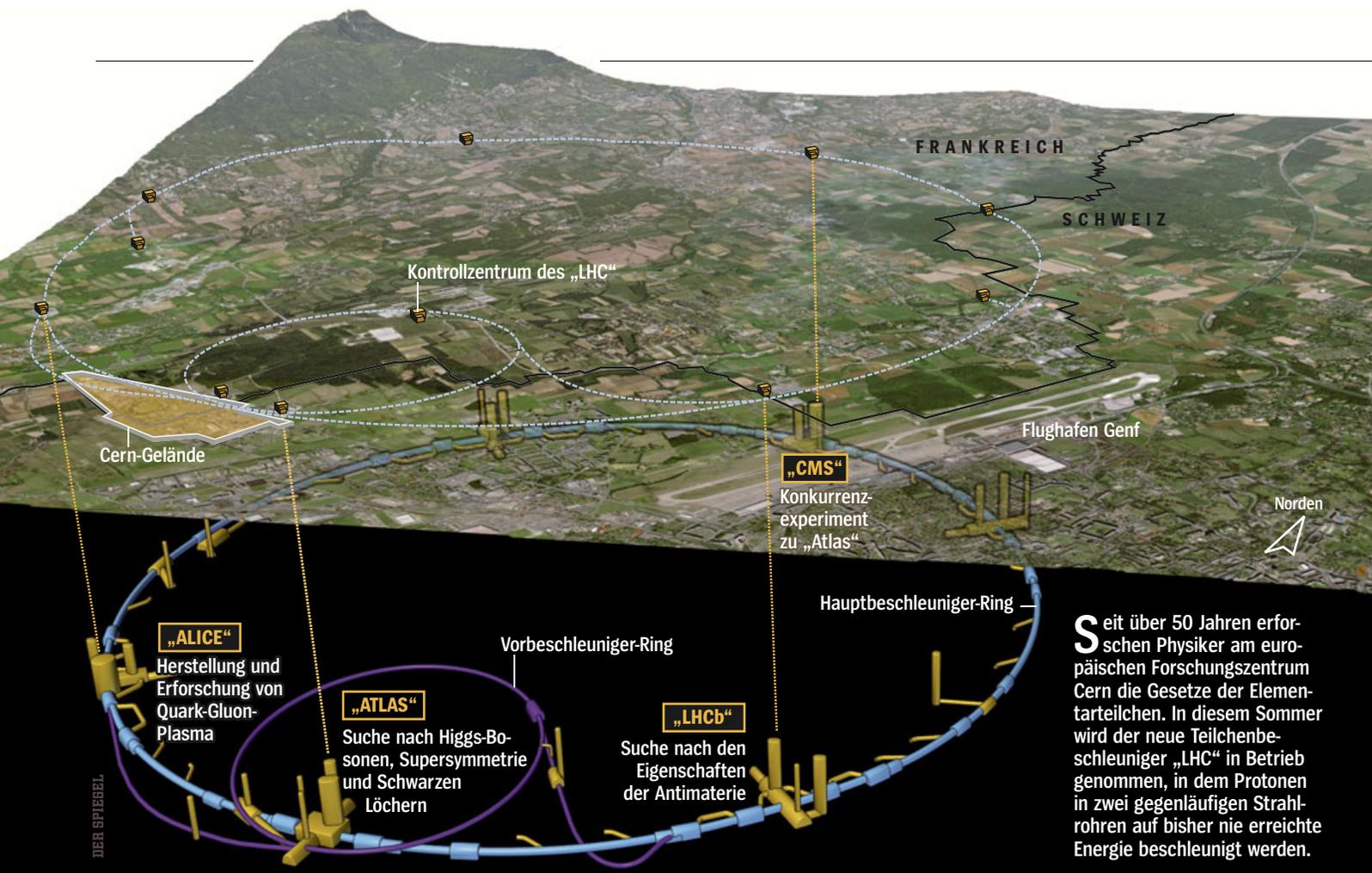
adern einen Organismus. Zuletzt haben Schukraft und seine Mannschaft ganz außen noch die Flugzeitähler angebracht, die gleichsam die Funken der Höllenglut im Innern auffangen sollen.

„Wir brauchten 150 000 solcher Zähler“, erzählt Schukraft. „Das allein hätte gereicht, um unseren Etat zu sprengen.“ Doch dann seien ein paar junge Physiker gekommen und hätten Flugzeitähler einfach aus Fensterglas, Angelschnur und Pappe fabriziert: „Und was dabei rauskam, war sogar noch doppelt so gut wie alles, was man hätte kaufen können.“

Überhaupt, meint Schukraft, sei der Bau eines solchen Hightech-Giganten nur möglich, wenn man bereit sei, unkonventionelle Wege zu beschreiten: „Viel haben uns zum Beispiel die Russen geholfen.“ So hätten Atombombentechniker aus einer sowjetischen Nuklearfabrik lange daran getüftelt, die Eigenschaften des Absorbers zu optimieren, der die Strahlung abfangen



Cern-Theoretiker Ellis: Expeditionen in den Raum der Möglichkeiten



Seit über 50 Jahren erforschen Physiker am europäischen Forschungszentrum Cern die Gesetze der Elementarteilchen. In diesem Sommer wird der neue Teilchenbeschleuniger „LHC“ in Betrieb genommen, in dem Protonen in zwei gegenläufigen Strahlrohren auf bisher nie erreichte Energie beschleunigt werden.

ren Splitter zu untersuchen. Sie hoffen Antworten zu finden auf die Urfragen, woraus das Universum besteht und wie es entstanden ist. Fast hat es den Anschein, als seien sie der Schöpfung selbst auf der Spur.

Das große Abenteuer der Forscher lädt ein zu Visionen und Ängsten gleichermaßen. Die Wissenschaftler sehen sich an der Schwelle zu einem neuen „goldenen Zeitalter“, in dem es möglich sein werde, den großen Fragen nach dem Ursprung und Wesen allen Seins mit Mitteln der messenden Wissenschaft auf den Grund zu gehen. In der Öffentlichkeit gehen unterdessen Ängste um vor einer unkontrollierten Entfesselung von Urgewalten: „Versenken Forscher die Erde in einem Schwarzen Loch?“, bangte „Bild“.

Schukraft und seine Mitstreiter können über solche Horrorvisionen nur schmunzeln. Für sie sieht die Sache einfach aus: Das Universum ist vor 13,7 Milliarden Jahren entstanden, das ist wissenschaftlich erwiesen. Anfangs war es hochkomprimiert und sehr heiß – Bedingungen, wie sie sich auf Erden nur simulieren lassen, indem man Kerne von schweren Atomen mit hoher Energie aufeinanderprallen lässt. Und genau das wollen sie im LHC tun.

Jedes Mal wenn es dabei zum Crash kommt, platzt nicht nur der Atomkern; die freigesetzte Energie lässt sogar die Protonen und Neutronen in seinem Innern schmelzen.

Jedes der Protonen wiederum besteht aus drei Quarks, die unmittelbar nach dem Urknall aneinandergelagert wurden. Doch nun, unter der enormen Gewalt des Aufpralls, bricht die Schicksalsgemeinschaft auseinander: Die Protonen lösen sich auf. An ihrer statt bildet sich ein Brei, in dem Zehntausende Quarks frei umherschweben. Quark-Gluon-Plasma nennen die Physiker diesen bizarren Zustand der Materie.

Lange freilich währt dieser Zustand nicht. Nach dem billionstel Teil einer milliardstel Sekunde ist der Spuk schon wie-

### JEDER ESSLÖFFEL VOLL DES URBREIS WOG SO VIEL WIE ALLES WASSER DES BODENSEES ZUSAMMEN.

der vorbei. Doch dieser kaum messbar kurze Moment reicht aus, um einen Blick in die Schmiede zu werfen, in der das heutige Universum Gestalt annahm. Denn die ersten zehn millionstel Sekunden seines Daseins bestand es aus einem solchen Brei aus Quarks und Gluonen (siehe Grafik Seite 106).

Fünffmal dichter zusammengedrängt als in einem Atomkern erfüllten diese brodelnden Teilchen das All. Jeder Esslöffel voll des Urbreis wog so viel wie alles Wasser des Bodensees zusammen. „Und als das Quark-Gluon-Plasma dann nach

zehn Mikrosekunden verdampfte“, meint Schukrafts Kollege Peter Braun-Munzinger, „könnten ebenjene winzigen Unregelmäßigkeiten entstanden sein, aus denen später die Galaxien hervorgegangen sind.“

Quarks und Galaxien, die einen submikroskopische Zwerge, die anderen kosmische Giganten – wie passt das zusammen? Es mag paradox anmuten, doch so ungewöhnlich ist es gar nicht: Überall in der modernen Physik sprießen Ideen, die das ganz Große mit dem ganz Kleinen verknüpfen. Denn immer mehr entpuppen sich Mikro- und Makrokosmos als eng miteinander verwoben.

Wer wissen will, was sich im Urknall vollzog, der muss verstehen, woraus die Materie dieser Welt zusammengesetzt ist. Und wer sich für die kleinsten aller Teilchen interessiert, der findet die Antworten nur, wenn er sich mit dem Beginn allen Daseins befasst. Denn die Teilchen und Kräfte, die heute die Welt bevölkern, wurden nicht gleichzeitig mit dieser Welt erschaffen. Sie mussten erst entstehen, und zwar unter den Extrembedingungen, wie sie unmittelbar nach dem Urknall herrschten – oder aber im Alice-Experiment.

Astroteilchenphysik heißt das neue Forschungsfeld, in dem die Erkundung des

## Rennbahn im Untergrund

Der „LHC“-Teilchenbeschleuniger am Cern bei Genf



Genfer See

Die Protonen werden zunächst vorbeschleunigt und dann in die Strahlrohre in einem 27 km langen Tunnel eingespeist, der in 50 bis 175 m Tiefe durch das französisch-schweizerische Grenzgebiet verläuft. An vier Stellen des Rings kollidieren die Partikelströme. Vier gewaltige Detektoren erfassen die Einzelheiten der Zusammenstöße, wobei sich jeder von ihnen speziellen Fragestellungen widmet.



„Alice“-Forscher Schukraft

JEAN REVILLARD / REZO

Universums und die Lehre von den Quarks und Neutrinos zu einer Wissenschaft verschmolzen sind. „Es gibt keine Trennung mehr zwischen Kosmologie und Teilchenphysik“, konstatiert Astroteilchenphysiker Jon Bagger von der Johns Hopkins University. Und auch der britische Theoretiker John Ellis, der wie Schukraft am Cern arbeitet, verkündet: „Einst habe ich lange gezögert, ob ich mich nun der Kosmologie oder der Teilchenphysik zuwenden sollte. Heute habe ich das Glück, auf beiden Feldern arbeiten zu können, und das oft sogar in ein und derselben Veröffentlichung.“

Eine gewaltige Forschungsoffensive bahnt sich nun an: Kaum dass es vollständig fertiggestellt ist, reicht den Astronomen ihr „Very Large Telescope“ in Chile bereits nicht mehr. Schon tüfteln sie an Plänen eines neuen „Extremely Large“ oder gar „Overwhelmingly Large Telescope“, dessen Spiegel groß wie ein ganzes Fußballfeld wäre. Auch Radioempfänger, zu Hunderten oder gar Tausenden miteinander verkoppelt, sollen nach Signalen des Urknalls lauschen.

Noch exotischere Horchmissionen bereiten die Forscher am Südpol und im Weltraum vor: Tief ins ewige Eis der Antarktis versenken sie Sonden, die Neutrinos einfangen sollen. Und im All wollen sie jeweils fünf Millionen Kilometer voneinander entfernt drei Satelliten aussetzen,

um zu messen, ob das Echo des Urknall-Tumults noch heute Raum und Zeit in Schwingung versetzt.

Das staunenswerteste Gerät aber wird in den nächsten Wochen seinen Vorstoß ins Unbekannte beginnen: der LHC am Forschungszentrum Cern bei Genf.

Hans Magnus Enzensberger sprach von einer „Kathedrale der Physik“, nachdem er das Forschungszentrum an der französisch-schweizerischen Grenze besucht hatte. Andere erkannten in dem LHC das „moderne Äquivalent der Pyramiden“ oder schlicht „das komplizierteste Ding der Welt“.

Unweigerlich scheint ins Schwärmen zu geraten, wer die neue Maschine zu beschreiben versucht. Der eine sieht in ihr eine Zeitmaschine, die eine Reise bis zum Ursprung der Zeit erlaubt. Der Nächste bezeichnet sie als Mikroskop der Superlative, das den Blick bis in die Innenwelt der Atomkerne ermöglicht. Schukraft und seinem Team dient sie als heißester aller Öfen, zugleich aber beherbergt sie auch den größten Kühlschranks der Welt.

Und doch muss sich, wer die sieben Kilometer vom Genfer Flughafen quer durch Rapsfelder und Kartoffeläcker zurückgelegt hat, auf eine Enttäuschung gefasst machen. Den Besucher empfängt ein lustlos zusammengewürfeltes Ensemble von Zweckbauten: Betonbunker, blech-

verschaltete Bürobaracken, verwitterte Verwaltungsgebäude. Vergessene Kabeltrommeln, Gasflaschen und T-Träger liegen am Straßenrand. Da und dort rostet ein mehrsprachiges Warnschild vor sich hin. Überall sirren, dröhnen oder heulen die Ventilatoren von Kühlanlagen.

An der Ecke zur „Route Rutherford“ grasen ein paar Schafe auf einem überwucherten Bunker. Auf der „Route Planck“, gleich hinter dem Rechenzentrum, brechen die Wurzeln der Pappeln durch den Asphalt.

Und das soll nun das Mekka von weltweit 10 000 Physikern sein?

Wer die Faszination dieses Orts begreifen will, der muss rund hundert Meter abwärts fahren. Dort verläuft bis an den Fuß des Jura-Gebirges der Tunnel, in dem bald das neue Herz des Cern zu pochen beginnt (siehe Grafik Seite 104). Für Besucher ist dieser Teil der Anlage bereits gesperrt. Nur noch ab und zu radelt ein Techniker, stets eine Atemschutzmaske für den Fall eines Gasaustritts im Gepäck, entlang den beiden 27 Kilometer langen Stahlrohren, in denen die Teilchen im Kreis rasen sollen.

Alle hier am Cern fiebern dem Moment entgegen, wenn vermutlich Anfang August das erste Paket von Protonen in diese unterirdische Rennbahn eingelassen wird. Noch blockiert ein Graphitblock den Zugang zum Ring. Noch fängt er die Protonen

auf, die der Vorbeschleuniger in Richtung LHC schleudert.

Am Tag X aber wird der Block beiseitegeschoben. Dahinter wird der Teilchenstrahl von einem Injektionskicker empfangen, der ihn mit einem kräftigen elektrischen Stoß auf Kurs bringen soll.

Dann schlägt die Stunde der Magneten. Insgesamt 10 000 von ihnen umklammern die beiden Beschleunigerrohre. Ihre Aufgabe: Den Teilchenstrahl bändigen, bündeln und auf der Kreisbahn halten. 11 200-mal in der Sekunde sollen die Protonen von Frankreich in die Schweiz und wieder zurück flitzen, und bei jeder Runde pumpen Radiowellen noch ein wenig mehr Energie in die Protonenpakete.

„Insgesamt 1700 Stromkreisläufe müssen wir getrennt kontrollieren“, sagt Rüdiger Schmidt, während er im Kontrollraum seinen Kollegen an den Monitoren über die Schulter schaut. Seit mehr als 20 Jahren schon arbeitet er in der Entwicklung und Kontrolle von Beschleunigern. Er hat es bis zu einem der wenigen Autos mit dem grünen Diplomaten-Nummernschild gebracht, die dem Cern seines besonderen Status wegen zugebilligt werden. Doch selbst einen Routinier wie ihn vermag der

LHC noch in Erstaunen zu versetzen: „Ich bin immer wieder aufs Neue verblüfft über die unglaubliche Komplexität dieser Maschine.“

Noch allerdings sind nicht alle Magneten auf Betriebstemperatur. Noch liefern täglich zwei Lkw flüssige Luft für die Kühlung aufs Cern-Gelände. Ziel ist eine Temperatur von 271 Grad unter null, dann fließt der Strom widerstandsfrei durch die Magnetspulen.

Nie zuvor haben Menschen versucht, so viel Masse so kalt zu machen. Und Schmidt und seine Mannschaft wissen: Sie haben sich auf ein Wagnis eingelassen. Denn als Kühlmittel taugt einzig supraflüssiges Helium, und Umgang mit dieser eigenartigen Flüssigkeit pflegen die Techniker bisher meist nur in Fingerhutportionen. Hier aber gilt es, rund hundert Tonnen davon zu handhaben.

Gefürchtet sind vor allem jene Momente, in denen sich irgendwo ein winziger Teil der Magnetspulen erwärmt, und sei es auch nur um wenige Grad. „Dann schießen urplötzlich Ströme durch das Metall, die es fast augenblicklich schmelzen lassen können“, sagt Schmidt. 11 700 Ampere Magnetstrom binnen Sekundenbruchtei-

len zu bändigen, das ist eine der großen Herausforderungen für die Techniker.

Und noch ein Alptrauumszenario peiniget sie: Der LHC ist der erste Beschleuniger der Welt, der fähig ist, sich selbst zu zerstören. Wenn der Protonenstrahl vom Kurs abkommt, dann prallt er mit solcher Wucht aufs Metall, dass er das Rohr mühelos durchbohren würde.

„Deshalb werden wir die Energie des Rings nur ganz vorsichtig und schrittweise hochfahren“, meint Schmidt. Und erst wenn die Physiker ein einzelnes Protonenpaket wirklich zuverlässig zu beherrschen glauben, werden sie ihm weitere Pakete auf die Fersen schicken.

Irgendwann sollen dann 2808 Protonenbündel gleichzeitig durch den Tunnel am Cern rasen, jedes von ihnen in der Form einer Art Nadel: haardünn und etwas mehr als streichholzlang.

An vier Stellen des Rings werden diese nadelförmigen Protonenbündel dann ineinandergeschossen. Jedes der Teilchen trägt dabei sieben Billionen Elektronenvolt (TeV), das entspricht etwa der Bewegungsenergie einer Stubenfliege.

Dem durch seinen Alltag verwöhnten Menschen mag das lächerlich wenig er-

# Der große Knall

Strukturbildung im Universum

**Urknall**  
Geburt des Universums

**Quark-Gluon-Plasma**

Das Universum besteht aus einem extrem heißen Brei aus Quarks und Gluonen.

**Protonen-Entstehung**

Nachdem das Universum auf etwa zwei Billionen Grad Celsius abgekühlt ist, verbinden sich die Quarks zu Protonen und Neutronen.

**Nukleosynthese**

Nach Abkühlung bis auf eine Milliarde Grad bilden sich Helium- und Wasserstoffkerne.

**Erste neutrale Atome**

entstehen bei 2700 Grad. Das Universum ist fortan durchsichtig.

**Erste Sterne**

Gaswolken kollabieren zu Riesensternen, die als Schwarze Löcher enden.

**Galaxien-Entstehung**

Vermutlich rund um diese Schwarzen Löcher bilden sich später die Galaxien.

<b>0</b> Mikrosekunden	<b>10</b> Minuten	<b>3</b> Jahre	<b>380 000</b>	<b>200 Mio.</b>
------------------------	-------------------	----------------	----------------	-----------------

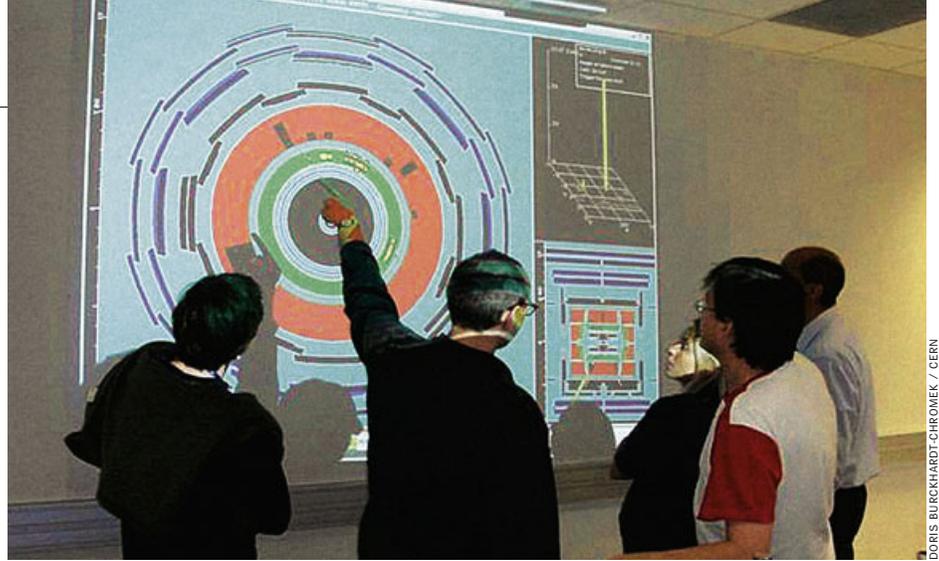
scheinen; in der Welt der Teilchen jedoch ist dies gewaltig viel. Das „Tevatron“ in den USA, bisher der Rekordhalter unter den Protonenbeschleunigern, erreicht gerade einmal ein Siebtel.

Zudem rasen die Protonen ja nicht einzeln auf ihrer Rennbahn umher. Sie stürzen vielmehr in Schwärmen aufeinander zu, zu jedem davon gehören Milliarden Teilchen.

Welch eine Massenkarambolage, Welch fürchterlicher Teilchensalat!, so könnte man meinen. Doch weit gefehlt: Die beiden Strahlen sausen durcheinander hindurch, als merkten sie nichts voneinander. Genau genommen gilt dies jedenfalls für 99,999 999 99 Prozent der Protonen.

Gerade einmal 20 der Teilchen zersplittern im Crash; die Wahrscheinlichkeit eines Treffers liegt damit etwa so hoch, wie wenn man auf fußballfeldgroßem Millimeterpapier Schiffe versenken spielte.

Genau auf diese 20 Kollisionen aber kommt es den Physikern an. Denn sie erlauben es ihnen, sich geradezu schwindelnd dicht an den Urknall heranzutasten. Sie werden, davon sind die Forscher überzeugt, tiefe Geheimnisse über das Wesen der Materie offenbaren. „Die Welt der Physik wird sich



Physiker im „Atlas“-Kontrollraum: Wie im Bienenstaat ist auch hier jeder Einzelne nichts

DORIS BURCHARDT-CHROWIEK / CERN

verändern“, prophezeit der Heidelberger Hochenergie-Physiker Karlheinz Meier.

Doch je höher die Energie bei einer Teilchenkollision, desto höher der Aufwand, alle Splitter aufzufangen. Diese Faustregel ist es, die den Physikern das Leben erschwert. Denn sie zwingt sie zum Bau wahrhaft gigantischer Detektoren.

Vier solcher Geräte warten nun, fertig montiert in ihren Betongrotten tief unten im Fels, auf den Teilchenschauer aus dem Beschleunigerring. Alice mutet dabei, mit 16 Meter Höhe und 70 Millionen Euro Baukosten, fast schon bescheiden an. „Atlas“ etwa, das größte der vier Experimente, ist hoch wie das Brandenburger Tor und kostete 330 Millionen Euro.

Gebannt blickt die Welt der Physik nun nach Genf. Diesmal, davon sind die Forscher überzeugt, wird es anders sein als bei jedem anderen Beschleuniger. „Diesmal“, so Harvard-Physiker Nima Arkani-Hamed, „beginnt die aufregendste Periode einer ganzen Generation.“

Jahrzehntelang schien es, als seien die experimentellen Teilchenphysiker dazu verdammt, immer nur die Vorhersagen ihrer Kollegen aus den theoretischen Instituten zu bestätigen. Zwar ließen sie ihre Teilchen in immer gewaltigeren Maschinen mit immer größerer Wucht aufeinanderkrachen. Doch stets waren ihnen, wie beim Rennen des Hasen mit dem Igel, die Theoretiker schon zuvorgekommen. Was immer die Experimente der einen an Neuem zutage förderten, hatten die Berechnungen der anderen schon im Voraus verraten.

Nun aber soll es vorbei sein mit diesem Frust. Denn der LHC wird endlich in den Bereich jenseits der magischen TeV-Grenze vordringen – und damit in jenes Terrain, wo die Überlegenheit der Theoretiker ein Ende hat. Deren Berechnungen nämlich gründen sich auf das sogenannte Standardmodell der Materie. Es besteht aus einer bloßen Handvoll Formeln, die sämtliche Phänomene der Teilchenwelt verblüffend präzise beschreiben. Doch so überwältigend erfolgreich die-

ses Standardmodell auch ist, so weist es doch kleine Unstimmigkeiten auf. Und diese werden im LHC offen zutage treten.

Ein regelrechtes Sprühfeuer von Überraschungen halten die Physiker für möglich. Myriaden von Teilchen haben die Forscher eronnen, die bei den Crashes im LHC entstehen könnten. Von der rätselhaften Dunklen Materie, von verborgenen Raumdimensionen und Schwarzen Löchern ist die Rede.

Besonders aber haben es die Physiker auf ein Teilchen abgesehen, über dem ein eigenartiger Fluch zu liegen scheint. Immer wieder haben sie versucht, es einzufangen, immer wieder ist es ihnen entwischt. Sie haben es „Higgs“ getauft.

Zwar handelt es sich auch bei ihm, ein letztes Mal, um eine Vorhersage des Standardmodells. Und doch verhält es sich diesmal völlig anders, denn das Higgs ist nicht wie die anderen.

Das Standardmodell nämlich kennt nur zwei Sorten von Teilchen: Aus den einen

### FASSUNGSLOS FRAGTE SICH HIGGS: ALL DAS, UM EIN WINZIGES TEILCHEN MEINES NAMENS ZU FINDEN?

ist die Materie zusammengesetzt; die anderen sind dazu da, Kräfte zwischen den Teilchen der ersten Sorte zu übermitteln (siehe Grafik Seite 112).

Insgesamt kommen so 24 Teilchen zusammen, die, eins nach dem anderen, in den großen Beschleunigern am Cern, am amerikanischen Fermilab und am Hamburger Desy gefunden wurden. Nur ein einziges fehlt noch: das Higgs. Und dieses gehört keiner der beiden Sorten an.

Das Higgs, kein Zweifel, ist ein Außenseiter im Teilchenreich. Es ist zugleich Herzstück und Schandfleck des Standardmodells.

Denn die 24 Teilchen könnten ihren Tanz der Wechselwirkungen auch ohne das Higgs vollführen. Ja, mehr noch: Die Gleichungen wären dann klarer, eleganter, symmetrischer. Kurz: schöner.

Doch es gibt da ein Problem: Ohne das Higgs hätten die anderen Teilchen keine



MAS/DBP, HO/FP

DER SPIEGEL

**13,7 Milliarden Jahre**

Masse, schwerelos würden sie durchs Weltall schweben. Und um ihnen diese Masse mit auf den Weg zu geben, kennen die Physiker nur einen einzigen, wenngleich etwas schmutzigen Trick: das Higgs.

Einen Trick, sehr viel mehr hatte Peter Higgs nicht im Sinn, als er vor 44 Jahren seinen bahnbrechenden Artikel verfasste. Ob dieser Trick je von Nutzen sein würde, ahnte er nicht.

Im April dieses Jahres kam er erstmals aus dem heimischen Edinburgh ans Cern. Voller Ehrfurcht ließ sich der schottische Physiker, inzwischen 79-jährig, durch die Katakomben voller Kühl- und Rechentechnik führen. Fassungslos stand er vor den Kolossen in den Detektorhallen: All das, um ein winziges Teilchen seines Namens zu finden?

Es war eine Begegnung seltsamer Art. Jeder hier am Cern kannte Higgs' Namen, kaum einer sein Gesicht. Schon bald nach der Veröffentlichung jenes denkwürdigen Artikels – er umfasst gerade einmal anderthalb Druckseiten und enthält ganze vier Formeln – zog sich Higgs aus den Debatten der Teilchenphysiker zurück. Er hatte begriffen, dass er bei deren geistigen Höhenflügen nicht mithalten vermochte. Seither bleibt ihm nur eines: warten. Warten, ob das nach ihm benannte Teilchen endlich gefunden wird. Warten, ob dann der schon so oft beschworene Anruf aus Stockholm kommt.

Seinen Kollegen indes bleibt es überlassen, sich darüber zu streiten, ob das Higgs-Teilchen nun ein Segen oder ein Fluch für ihr Fach ist. Als „Teilchen Gottes“ betete es Leon Lederman an. Als „Toilette“, in die alle Unstimmigkeiten des Standardmodells gespült würden, beschimpfte es Sheldon Glashow. Beide haben den Nobelpreis bereits.

Es ist vertrackt: So recht wohl ist niemandem bei diesem eigenartigen Teilchen. „Und doch muss es irgendetwas wie das Higgs geben“, meint der Cern-Theoretiker Ellis. Gerade das Unbehagen sei aber auch ein Quell von Hoffnungen: Vielleicht findet sich am Ende ja gar nicht ein Higgs, sondern viele? Vielleicht hat die Natur eine ganze Higgs-Familie hinter der TeV-

## **DIE WELT STELLT SICH DAR ALS KOSMISCHE SYMPHONIE WECHSELWIRKENDER SAITENKLÄNGE.**

Grenze versteckt? Oder ist das Higgs vielleicht aus vielen noch kleineren Higgsleins zusammengesetzt? „Es ist, als befänden wir uns in einem fensterlosen Raum mit einer einzigen Tür“, räsoniert Ellis. „Wer diese Tür öffnet, dem tut sich eine neue, faszinierende Welt auf.“ Kurz hält er inne, dann fügt er hinzu: „Und diese Tür ist das Higgs.“

Im Laufe der Jahrzehnte hat Ellis in seinem Büro ein Gebirge aus Papier aufge-

schichtet, hinter das er sich zum Arbeiten zurückzieht. Zu Dutzenden haben sich hier die Entwürfe ganzer Universen abgelagert, die seine Kollegen erdosen, erörtert und wieder verworfen haben. Hunderte Expeditionen in den Raum der Möglichkeiten sind in diesen Stapeln begraben.

Seit 35 Jahren schon forscht der kleine agile Mann mit dem weißen Schamanenbart am Cern einen Teil davon als Chef des Theorie-Instituts. Wie viele grandiose Ideen hat er in dieser Zeit aufscheinen und wieder untergehen sehen! Wie viele Luftschlösser haben die theoretischen Physiker in dieser Zeit erbaut, um sie sogleich wieder zu zertrümmern!

Es ist eine eigenartige Phase seines Fachs, die Ellis da miterlebt hat – eine Zeit, in der die Theorie den Experimenten immer weiter vorauslief. Immer näher tastete sich die rechnende Zunft im Geiste an den Urknall heran; bei immer abenteuerlicheren Energien spielten sich ihre Gedankenspiele ab. Die Experimentatoren, die diese Energien in der realen Welt zu erzeugen suchten, hatten sie da rasch abgehängt.

Besonders weit trieb es eine kleine Gemeinde, die sich Mitte der achtziger Jahre vom Rest der Physik abspaltete: Das Dasein, so ihre These, besteht aus aberwinzigen Saiten, den Strings; die Teilchen aber sind nichts anderes als Vibrationen dieser Strings. Die Welt stellt sich also dar als kosmische Symphonie miteinander wechselwirkender Saitenklänge.

Es klingt vermessen. Und doch machten sich die String-Forscher an den Versuch, das Urrätsel allen Seins mit der Kraft purer Gedanken zu knacken: Vielleicht, so ihre Hoffnung, lässt sich ja irgendwie nachweisen, dass die Welt, in der wir leben, die einzig logisch mögliche ist?

Bestechend, geradezu überwältigend sei die Eleganz der String-Theorie, beteuern die Anhänger dieser Schule. Geradezu berauscht sind sie von der Harmonie ihrer Gleichungen. Die Theorie sei einfach zu schön, um nicht wahr zu sein.

Zwei Probleme allerdings können auch die Jünger der String-Lehre nicht leugnen. Zum einen: Die Saiten, von denen sie sprechen, sind aberwitzig winzig. Je kleiner aber ein Objekt, desto größere Beschleuniger sind nötig, um es nachzuweisen. Strings, so das ernüchternde Ergebnis einer Überschlagsrechnung, wären erst in Maschi-

nen galaktischer Dimension sichtbar. Mit anderen Worten: Ein direkter Test der Theorie ist unmöglich.

Und zweitens: In drei Raumdimensionen lassen sich String-Theorien mathematisch schlüssig gar nicht formulieren. Sie funktionieren nur in neun oder zehn Dimensionen. Der Raum muss also, wenn die Idee mit den Saiten wirklich stimmt, irgendwo noch sechs oder sieben verborgene Zusatzdimensionen haben.



**Neutrino-Detektor in der Antarktis**  
**Kosmologische Großgeräte: Überall in der Physik**

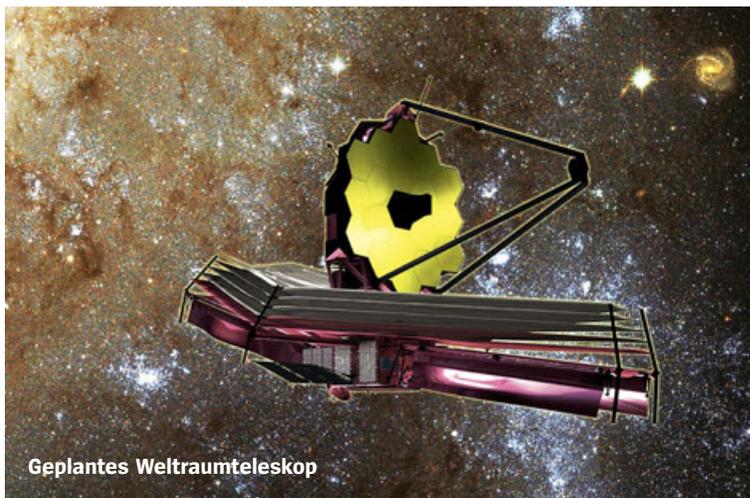
Zwar waren allerhand mathematische Kabinettstückchen nötig, doch irgendwann hatten die String-Forscher nicht nur einen Weg gefunden, wie sie die Zusatzdimensionen, ganz winzig zusammengerollt, in einer dreidimensionalen Wirklichkeit verstecken konnten, sie brachten es sogar fertig, Welten zu konstruieren, in denen sich diese Zusatzdimensionen in Riesenbeschleunigern auch bemerkbar machen würden.

Zugegeben, sehr wahrscheinlich ist es nicht, das geben sogar die eingefleischtesten String-Fans zu. Es gehört schon sehr viel Glück dazu, ausgerechnet in einer der wenigen Welten zu leben, in denen sich die Zusatzdimensionen bei Teilchencrashes verraten würden. Aber immerhin, unmöglich ist es nicht. Der LHC könnte also Signale aus versteckten Dimensionen empfangen – und welch spektakuläre zudem! Der Beschleuniger würde nämlich Schwar-



„Very Large Telescope“ in Chile

RAPHAEL GAILLARDE / GAMMA / STUDIO X



Geplantes Weltraumteleskop

AFP

*sprießen Ideen, die das ganz Große mit dem ganz Kleinen verknüpfen*

ze Löcher produzieren, und zwar ungefähr eines in jeder Sekunde.

Es wären zwar nur winzige Löcher, aber immerhin: Es reicht, um die Science-Fiction-Fraktion auf den Plan zu rufen.

Besonders große Aufmerksamkeit zog die Befürchtung auf sich, der ganze Planet Erde könnte womöglich von der Schwerkraft der Schwarzen Minilöcher fortgestrudelt werden. Geschürt wird die Angst vor der Apokalypse von dem US-Physiker Walter Wagner, der beim LHC-Start den Weltuntergang befürchtet. Er hat deshalb Klage gegen das Cern erhoben.

Wagner hat zu viel „Star Trek“ gesehen. In Wirklichkeit würde ein Schwarzes Miniloch kaum länger leben, als Licht braucht, um ein Atom zu queren – das ist zu wenig Zeit, um einen Planeten zu verschlingen.

Optimistischere Phantasten halten sich denn auch an erfreulichere Visionen. Der

russische Forscher Igor Wolowitsch etwa träumt davon, im LHC könnten Prototypen für Zeitmaschinen entstehen, mit denen sich die Reise in die Zukunft antreten lasse. Der Darmstädter Physiker Horst Stöcker wiederum konnte der Versuchung nicht widerstehen, eine Erfindung zum Patent anzumelden, die er „Relikt-Reaktor“ nennt.

Falls nämlich, so seine gewagte Argumentation, winzige Schwarze Löcher doch stabil sein sollten, dann ließen sie sich in dem Beschleunigerring einfangen und mit Materie füttern, welche sie umgehend zu reiner Energie verstrahlen würden. „Jedes Schulkind kann dann nach der berühmten Formel  $E=mc^2$  ausrechnen, dass eine Lkw-Ladung Sand ausreichen würde, um den Weltjahresverbrauch an Energie zu erzeugen“, erklärt er.

Was sind das nur für Spinnereien?, fragt da manch bodenständiger Wissenschaftler.

Ist das, was die String-Gemeinde treibt, überhaupt noch Physik? Ist es nicht vielmehr bloße Metaphysik, nichts als substanzlose Spekulation?

Auch John Ellis steht den Hoffnungen der String-Forscher eher skeptisch gegenüber. „Theory of everything, or of nothing?“ lautete die provozierende Überschrift eines Artikels, in dem er die damals neue String-Mode kommentierte. „Theory of everything“ („Theorie von allem“) – dieser Name ist im englischen Sprachraum erhalten geblieben. Die Deutschen sprechen stattdessen lieber von „Weltformel“.

Nicht dass es sich Ellis mit den String-Leuten verderben wollte. Er weiß ja, es sind die brilliantesten Köpfe der ganzen Physik darunter. Aber er selbst hält sich lieber an Phänomene, bei denen wenigstens eine Chance besteht, sie auch wirklich zu beobachten. Und da gibt es für ihn, neben dem Higgs natürlich, vor allem eines: die sogenannte Supersymmetrie (Susy).

Auf den ersten Blick mutet diese Idee geradezu widersinnig an: Eigentlich geht es den Theoretikern ja darum, die Gesetze der Natur zu vereinfachen. Die Susy-Theorie dagegen verdoppelt auf einen Schlag das Gewusel im Teilchenzoo: Jedem der 24 Partikel des Standardmodells wird ein bisher noch unentdeckter „Susy-Partner“ zur Seite gestellt.

Doch die Susy-Theorie entschädigt die Physiker: „Sie erlaubt es nämlich, die Kräfte bei sehr hohen Energien zu vereinfachen“, wie Ellis sagt. Elektrizität, Magnetismus, Kernkraft und Radioaktivität – sie alle erscheinen plötzlich wie verschiedene Facetten ein und desselben Urphänomens. Wie ließe sich der Traum von der Einheit schöner verwirklichen?

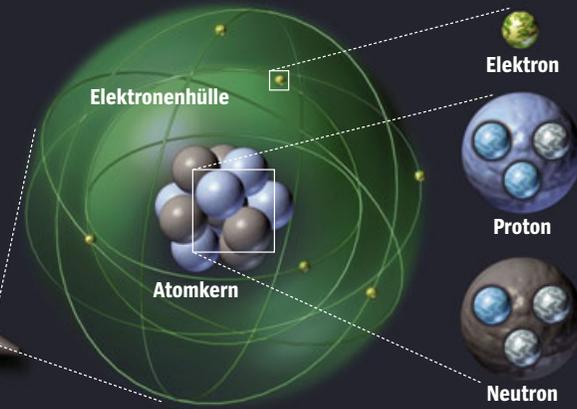
Und damit nicht genug: Gleichsam en passant könnte die Susy-Theorie noch ein weiteres Problem lösen, das den Astronomen bereits seit Jahrzehnten Kopfzerbrechen bereitet: das Rätsel der Dunklen Materie.

Schon lange nämlich ist den Forschern klar, dass die Galaxien am Himmel, bestünden sie nur aus den sichtbaren Sternen, von der ihnen eigenen Fliehkraft auseinandergerissen würden. Zusammengehalten werden sie von einem unsichtbaren Stoff, der insgesamt fünfmal mehr wiegt als alle sichtbare Materie zusammen. Weitgehend gesichert ist nur eines: Diese Dunkle Materie besteht aus Teilchen, die in großer Zahl, jedes einzelne etwa so schwer wie ein Goldatom, unbemerkt durch Sterne, Planeten und auch Menschen hindurchfliegen.

Genau dies aber gilt auch für den leichtesten der von den Theoretikern ersonnenen Susy-Partner. Könnte es da nicht sein, dass gewaltige Mengen des Susy-Stoffs im Urknall geboren wurden, um seither

# Baukasten der Schöpfung

Das Standardmodell der Teilchenphysik



**1** Jegliche Materie ist aus Atomen zusammengesetzt. Der Durchmesser eines Atoms beträgt knapp ein Millionstel Millimeter. In seinem Innern befindet sich der Atomkern, der von Elektronen umschwirrt wird.

**2** Der Atomkern wiederum besteht aus Protonen und Neutronen, die ihrerseits aus jeweils drei Quarks zusammengesetzt sind.

**3** Während alle Materie im Alltag aus nur aus zwei Arten von Quarks und normalen Elektronen besteht, tauchen bei höheren Energien noch weitere Grundbausteine auf. Insgesamt gibt es dem Standardmodell zufolge 24 Teilchen: 6 Quarks, 6 sogenannte Leptonen (zu denen die Elektronen zählen) und 12 Austauschteilchen. Die Materie selbst besteht dabei aus den Quarks und Leptonen, während die Austauschteilchen die Kräfte zwischen ihnen vermitteln.

QUARKS	LEPTONEN	AUSTAUSCHTEILCHEN
Normale Materie	Elektron	Photonen <i>elektromagnetische Wechselwirkung</i>
Up	Elektron-Neutrino	$W^+$ , $W^-$ und Z-Bosonen <i>schwache Wechselwirkung</i>
Down	Myon	Gluonen (8 verschiedene) <i>starke Wechselwirkung</i>
Materie in höherem Energiezustand	Myon-Neutrino	
Charm	Tau	
Strange	Tau-Neutrino	
Top		
Bottom		

**4** Bisher noch unentdeckt ist ein 25. Teilchen: das Higgs, das den anderen Teilchen ihre Masse verleiht.

**5** Nach der Theorie der Supersymmetrie steht jedem Elementarteilchen gleichsam spiegelbildlich ein sogenannter Susy-Partner gegenüber.

Aber all das gibt allenfalls eine Ahnung dessen, was wirklich passiert, wenn der Detektorkoloss beginnt, Daten zu spucken. Noch warten die Rechner, die in unterirdischen Grotten neben der Detektorkaverne Spalier stehen, leise summend auf den großen Tag ihres Einsatzes. Aber kaum dass die ersten Teilchen im Beschleunigerrohr aufeinandergekracht sind, wird durch die feinen orangefarbenen Glasfaserbündel ein digitaler Tsunami über sie hereinbrechen.

Denn bei jedem Aufeinandertreffen zweier Protonenbündel kommt es zwar nur zu rund 20 Kollisionen. Doch rauscht schon das nächste an, wenn die Splitter des vorangehenden noch im Detektor stecken: 30 Millionen Mal pro Sekunde stößt hier Protonenpaket gegen Protonenpaket – insgesamt kommen so in jeder Sekunde 600 Millionen Crashes zusammen.

Mit den Daten, die dabei anfallen, ließen sich sämtliche deutsche Universitätsbibliotheken füllen – und zwar in jeder Sekunde einmal. „Das ist mehr, als selbst die besten Rechner der Welt bewältigen können“, sagt Doris Burckhart-Chromek, die in der Datenerfassung arbeitet.

Ein wenig glaubt sie, sich entschuldigen zu müssen, wenn sie Besucher an ihren künftigen Arbeitsplatz führt: Es ist ein Raum, der noch unbewohnt wirkt, eine eigenartige Mischung aus Baustellenbüro und Klassenzimmer. Eingerichtet wird er derzeit in einem schmucklosen Container auf dem Atlas-Gelände: „Alles Geld fließt eben in das Experiment“, sagt Burckhart-Chromek.

Dutzende Wissenschaftler nisten sich ein in diesen Baracken; sie bereiten sich darauf vor, den digitalen Strom aus der Tiefe zu steuern. „Eine der wichtigsten Fragen dabei ist zu entscheiden, welche der Daten wir speichern wollen“, erklärt Burckhart-Chromek. Binnen Mikrosekunden muss der Rechner entscheiden, ob es sich lohnt, einen Teilchencrash näher zu untersuchen. Drei Filter muss ein Ereignis passieren, nur eines von 200 000 kommt am Ende durch. Nur eine von 200 000 Teilchenkollisionen wird also überhaupt genauer analysiert.

Wie aber kann die Software nach etwas fahnden, das sie noch gar nicht kennt? Lässt sich da wirklich vermeiden, dass der Computer die interessantesten Daten

einfach wegschmeißt? Wird er es merken, wenn sich im Strahlengewitter der Kollision eine Überraschung verbirgt?

Jahrelang haben die Experten sich über solche Fragen den Kopf zerbrochen. Für jedes Teilgebiet wird ein Spezialist hinzugezogen, der auf seinem jeweiligen Gebiet zur Weltspitze gehört.

Egal ob beim Bau der dichtgepackten Silizium-Tracker direkt am Strahlrohr, bei

durchs Weltall zu wabern? Ebendiese Teilchen müssten dann auch im LHC entstehen – und es wären nicht irgendwelche seltsamen Exoten, sondern vielmehr der Stoff, aus dem der Großteil unseres Universums besteht.

Das sind Aussichten, die Physiker in Verzücken versetzen können. Der amerikanische Nobelpreisträger Frank Wilczek etwa mag sich eine Welt ohne Susy schon gar nicht mehr vorstellen: „Es wäre ein grausamer Witz von Mutter Natur – und obendrein ein Zeichen sehr schlechten Geschmacks.“

Higgs-Teilchen, Schwarze Minilöcher, Susy-Partner – das sind nur einige der vielen Kopfgeburten der Theoretiker. Für sie alle geht es nun darum, den Wirklichkeitstest zu bestehen.

Im Kontrollraum des Atlas-Detektors wuseln Menschen, sie radebrechen auf Englisch mit italienischem, russischem, japanischem Akzent. Vor einigen der Moni-

tore haben sich Trauben von Forschern versammelt. Fünf Physiker diskutieren angeregt über das Schaubild einer simulierten Teilchenkollision, das der Projektor an die Wand geworfen hat.

Immer wieder haben die Forscher versucht, am Computer vorherzusagen, was

## KANN DIE SOFTWARE NACH ETWAS FAHNDEN, DAS SIE NOCH GAR NICHT KENNT?

für Signale ihr Detektor wohl aussenden mag, wenn der Beschleunigerbetrieb erst einmal begonnen hat. Und immer wieder taucht ein Myon aus dem Weltall auf, das den Fels bis hier unten durchdrungen hat und nun in der Atlas-Maschine seine Spur hinterlässt. Diese Teilchen sind willkommen, denn sie bieten den Forschern Gelegenheit, die Reaktionen ihrer Maschine zu testen.

der Konzeption der gewaltigen Myonenkammern an der Rückwand der Kaverne oder der Trigger-Software, die für die erste Rohbewertung der Daten zuständig ist – in jedes Detail des gewaltigen Atlas-Experiments fließt das Wissen ganzer wissenschaftlicher Karrieren. Vermag ein Einzelner da überhaupt noch zu begreifen, was in dieser Maschine vor sich geht? Und falls nicht: Wie ließ sich ihr Bau dann koordinieren?

Um das herauszufinden, ist Karin Knorr-Cetina immer wieder ans Cern gereist und hat dort an Kollaborationssitzungen, Arbeitsbesprechungen und Konferenzen des Atlas-Detektors teilgenommen. Sie war Zeugin, wie die Forscher jede einzelne Detektorkomponente optimiert, wie sie ihre Hypothesen immer wieder am Computer simuliert, wie sie alle Teile des Experiments aufeinander abgestimmt haben.

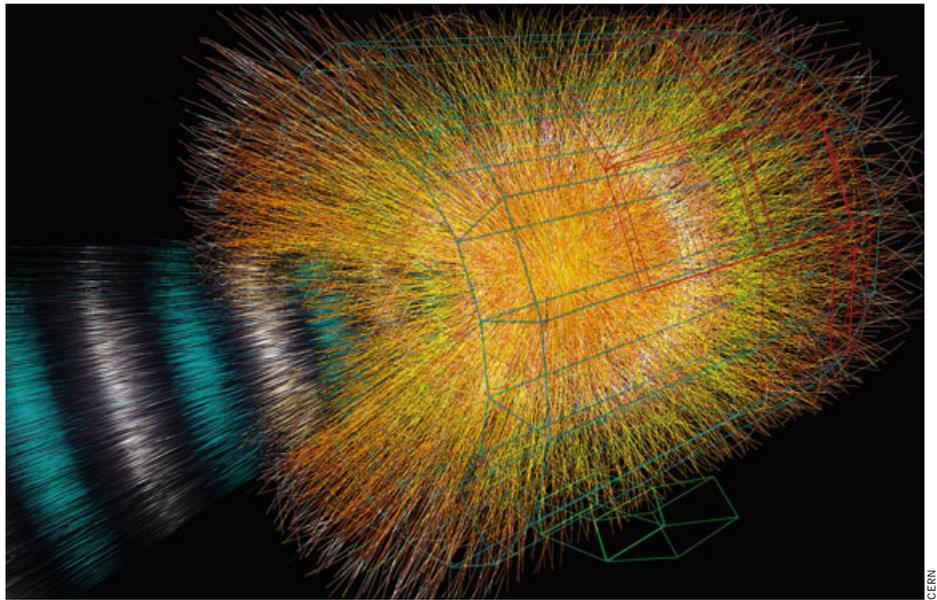
Knorr-Cetina ist Soziologin, ihr Fachgebiet der wissenschaftliche Wissenserwerb. Nach zehn Jahren Forschung am Cern lautet ihr Fazit: „Die große Überraschung ist, dass so etwas überhaupt möglich ist.“

Und in der Tat: Es ist schon ein außergewöhnlicher Club, der sich da zusammengefunden hat: 2700 Forscher aus 36 Ländern; Griechen und Türken, Taiwaner und Volkschinesen, Russen und Georgier arbeiten einträchtig miteinander an dem großen Projekt. „Und das Erstaunlichste: Ihre Zusammenarbeit kennt nur ganz wenig Hierarchien“, erklärt Knorr-Cetina. Zwar gibt es einen Sprecher, der alles koordinieren soll, doch darf er niemandem sagen, was er zu tun hat. Ein Boss ohne Weisungsbefugnis? Am Cern ist selbst das möglich.

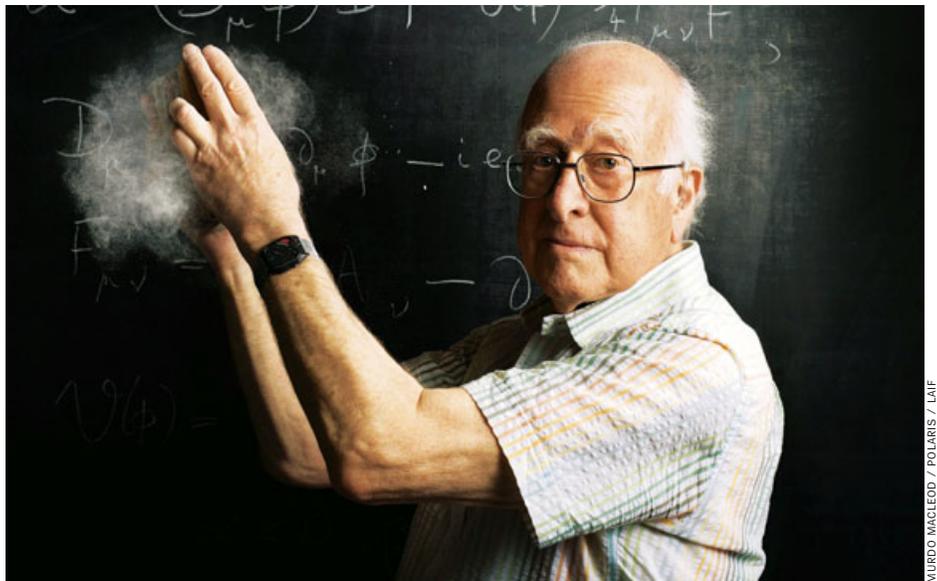
Jeder tut sein Bestes, und jeder tut es der Sache zuliebe: Es klingt zu schön, um wahr zu sein. Und doch ist es Knorr-Cetina zufolge schlicht eine Folge der beispiellosen Komplexität eines Teilchendetektors: „Kein Einzelner bringt das nötige Fachwissen mit, um Entscheidungen von oben nach unten überhaupt fällen zu können“, sagt sie. Deshalb bleibt gar nichts anderes übrig, als sich auf die Kompetenz des Einzelnen zu verlassen.

So ganz überblickt also kein Einzelner mehr das Ganze. Das Gerät entwickelt ein Eigenleben, „es entwickelt eine Art eigene Intelligenz“, meint die Soziologin. Das Heer der Wissenschaftler, das dem Monstrum Atlas gegenübersteht, beschreibt sie als „Superorganismus“, die Forscher selbst nennen es „Kollaboration“. Wie in einem Bienenstaat, so ist auch hier jeder Einzelne nichts; vollbringen können sie ihr großes Werk nur im Kollektiv. „Distribuierte Kognition“ nennt das die Soziologin: eine Art Vergesellschaftung des Geistes.

Das vereinzelt Genie, das im Kämmerlein seine intellektuellen Bravourstücke ausbrütet, gehört in der Welt des Cern der Vergangenheit an. Hier muss jeder kooperieren, wenn er etwas erreichen will. „Wissen muss geteilt werden, alles ist hier



Simulation eines Teilchenschauers im „Alice“-Detektor: Superblitz im 10000-Tonnen-Koloss



Teilchenphysiker Higgs: Warten, ob der Anruf aus Stockholm kommt

Kommunikation“, hat Knorr-Cetina beobachtet. „Beim Essen, beim Joggen, beim abendlichen Bier: Überall werden Fachgespräche geführt.“

Doch auch das hat seinen Preis: Jeder muss bereit sein, sich unterzuordnen unter die Interessen des Kollektivs. Die Soziologin spricht von der „Entmachtung des Individuums“.

Wer teilnehmen will am großen Vorstoß zu den Rätseln des Urknalls, der muss eine penible Aufnahme-prozedur überstehen. Er muss nachweisen, dass er Einzigartiges beizutragen hat; er muss auf seinem Feld Weltklasse sein; und er muss bereit sein, Schichtdienste im Kontrollraum zu übernehmen. Als Belohnung wird er in den Zirkel der Atlas-Forscher aufgenommen – und muss zugleich Verzicht üben an der eigenen Eitelkeit.

Denn veröffentlicht wird grundsätzlich im Kollektiv. Auf der Autorenliste stehen,

insgesamt länger als diese SPIEGEL-Titelgeschichte, alle 2700 Namen, abwechselnd Informatiker, Physiker und Ingenieure, nebeneinander Professoren, Postdocs und Doktoranden, gleichgültig ob chinesische, ungarische oder argentinische. Es gilt einzig und allein das Alphabet; niemand soll der Superstar sein.

Selbst zu Konferenzen werden nicht die einzelnen Forscher eingeladen. Angekündigt wird das Experiment Atlas, wer der Vortragende ist, bleibt nebensächlich.

Und was, so fragt sich, wird geschehen, wenn das Higgs-Teilchen, die Susy-Partner oder gar ein Schwarzes Loch wirklich gefunden werden? Welche Entdeckungen, wenn nicht diese, würden den Nobelpreis verdienen! Doch niemand weiß, wer ihn kriegen müsste. Im Grunde gibt es nur einen Namen: das Kollektiv.

JOHANN GROLLE