



In 50 bis 500 Meter Tiefe soll unter den Voralpen die bislang größte Forschungsanlage der Welt entstehen: der Future Circular Collider.

ILLUSTRATIONEN: MAX KULICH, AXEL KOCK; FOTOS: JENS UMBACH, LÉMRICH

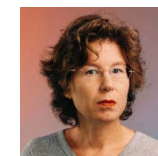
RING FREI!

Teilchenforscher wollen gigantische kreisförmige Beschleuniger bauen. Ist das nötig? Zwei renommierte Physikerinnen diskutieren – **ein Streitgespräch**

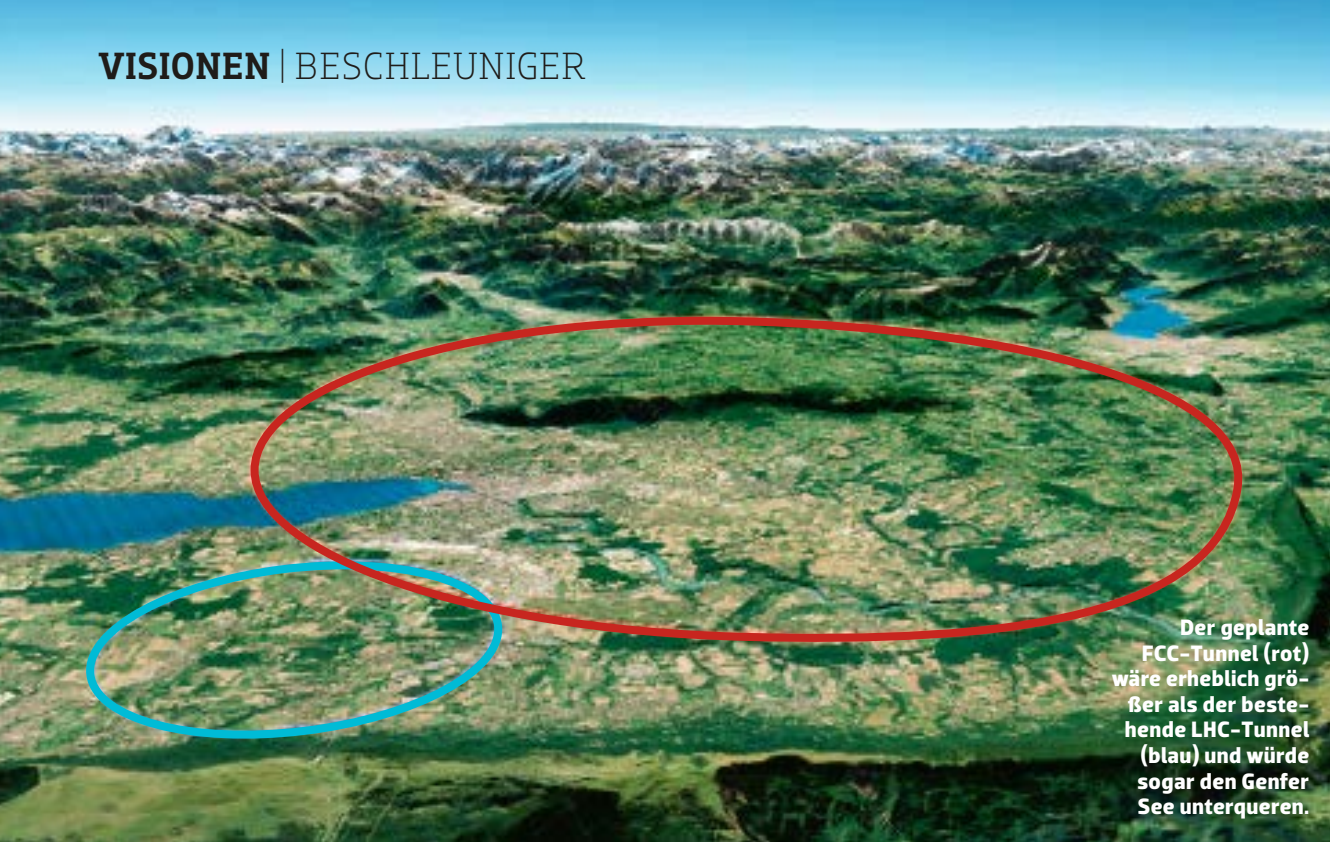
INTERVIEW: WOLFGANG RICHTER & MARTIN SCHEUFENS



DIE BEFÜRWORDERIN
Experimentalphysikerin Beate Heinemann hofft, dass größere Teilchenbeschleuniger Hinweise auf bislang unbekannte Physik liefern.



DIE KRITIKERIN
Theoretische Physikerin Sabine Hossenfelder glaubt, dass Teilchenphysiker die falschen Fragen verfolgen und daher Geld verschwenden.



Der geplante FCC-Tunnel (rot) wäre erheblich größer als der bestehende LHC-Tunnel (blau) und würde sogar den Genfer See unterqueren.



Mit einem Umfang von 98 Kilometern wäre der FCC-Ring (Illustration) einer der längsten Tunnel der Welt.



Zwischen Voralpen und Juragebirge schlängelt sich die Rhone; die Stadt Genf schmiegt sich an den südlichen Zipfel des nach ihr benannten Sees. Durch die idyllische Landschaft verläuft unsichtbar die Grenze zwischen der Schweiz und Frankreich. Genau hier soll in den nächsten Jahrzehnten die größte Forschungsanlage der Welt entstehen. Ihr Ziel: die Gesetze des Allerkleinsten mit ungeahnter Präzision vermessen. Neue Elementarteilchen finden. Und so besser erklären, wie sich das Universum entwickelt hat und wie seine Materie aufgebaut ist.

Die Bewohner von Genf würden jedoch von dem Bau nur wenig mitbekommen, denn die Anlage soll unter ihren Füßen entstehen. Die Physiker der hier ansässigen Großforschungseinrichtung Cern planen, einen gigantischen, kreisrunden Tunnel durchs Sedimentgestein zu fräsen: in über 100 Meter Tiefe, fast 100 Kilometer lang. In ihm wollen sie nacheinander zwei hochkomplexe Teilchenbeschleuniger errichten. Die Maschinen sollen die Bausteine der Natur immer schneller im Kreis fliegen lassen, bis diese mit höherer Energie als je zuvor in einem Experiment miteinander kollidieren.

Das Projekt trägt den Namen »Future Circular Collider«, kurz FCC. Gigantisch wie die Größe wären auch die Kosten: 26 Milliarden Euro würde allein der Bau verschlingen. Hinzu kämen Betriebskosten von einer Milliarde Euro jährlich. Bei 40 Jahren Betriebszeit summierten sich die Kosten auf 66 Milli-

arden Euro. Viel Geld für eine einzige Anlage. Allerdings soll sie auch bis zum Jahr 2090 laufen. Sie wäre wahrlich ein Jahrhundertprojekt.

Die Forscher am Cern haben Erfahrung mit Teilchenbeschleunigern: Im Genfer Boden liegt bereits ein Ring mit einem Umfang von 27 Kilometern, er beherbergt den »Large Hadron Collider« (LHC). In ihm wurde 2012 das Higgs-Teilchen nachgewiesen.

Die Entdeckung war ein Triumph der Teilchenphysik, denn das Higgs bildet den Schlussstein zum »Standardmodell der Teilchenphysik«. Auch wenn der öde Name dies nicht nahelegt, liefert das Standardmodell Gewaltiges: eine umfassende Erklärung und Beschreibung des Mikrokosmos, der kleinsten Bausteine des Universums und ihres Wirkens.

AUF DER SUCHE NACH NEUER PHYSIK

Dem Standardmodell zufolge existieren genau 17 Elementarteilchen, sie lassen sich nicht weiter aufspalten. Zwölf bilden unsere Materie; dazu zählen Leptonen wie das Elektron, aber auch die Quarks, die Atomkerne bilden. Diese Materieteilchen interagieren über drei grundlegende Kräfte: die elektromagnetische Kraft, die Schwache und die Starke Kernkraft. Wenn zwei Materieteilchen aufeinander einwirken, flitzen »Austauschteilchen« zwischen ihnen hin und her – sie vermitteln die Kraftwirkung. Von diesen Austauschteilchen gibt es insgesamt vier.

Das letzte Puzzlestück des Standardmodells bildet das Higgs-Teilchen. Mit seiner Entdeckung fand eine jahrzehntelange Suche ihr Ende. Doch ihr Er-

folg ist zugleich das Problem der Teilchenphysiker. Sie brauchen ein neues Ziel. Dabei mangelt es wahrlich nicht an Herausforderungen, denn das Standardmodell löst bei Weitem nicht alle Fragen: Warum gibt es zwölf Materieteilchen und nicht elf oder dreizehn? Warum sind ihre Massen so verschieden? Und ebenso die Kräfte zwischen ihnen? Kann es für diese Fragen überhaupt eine Erklärung geben?

Neue, radikale Erklärungsansätze sind nötig. Auf der Suche nach ihnen prüfen die Physiker das Standardmodell mit immer größerer Präzision, vor allem dort, wo es knirscht, wo Messungen minimal von Vorhersagen abweichen. Auf diese Weise suchen die Forscher nach feinen Rissen im Standardmodell, durch die sie zu einer noch grundlegenden Theorie des Universums gelangen.

Helfen sollen ihnen dabei Teilchenbeschleuniger mit noch höheren Energien und mehr Kollisionen. Im vergangenen Jahr haben die europäischen Teilchenphysiker nach jahrelangen internationalen Beratungen einer Strategieguppe ihre langfristige Planung vorgestellt. Sie hoffen, bis 2026 ihre Geldgeber – vor allem die europäischen Staaten – für das Projekt FCC zu gewinnen.

Doch es regt sich Widerstand. Kritiker fürchten, dass die Anlage zum Milliardengrab wird. In unserem Streitgespräch diskutieren zwei Expertinnen, welche Erkenntnisse wir erwarten dürfen und ob das viele Geld nicht besser in andere Projekte, etwa die Klimaforschung, investiert werden sollte.

Interview auf der nächsten Seite ►

ILLUSTRATIONEN UND FOTOS: CERN (3), AXEL KÖCK

15

Minuten

In einer Viertelstunde könnte einer der FCCs so viele Daten erheben wie sein Vorgänger in sieben Jahren. Da die besonders interessanten Vorgänge der Natur extrem selten stattfinden, ließen sie sich dank ihm endlich präzise erforschen.

Größer, schneller, teurer

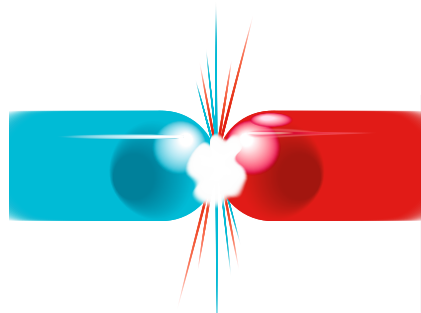
TECHNIK In Teilchenbeschleunigern fliegen kleine Wolken aus Elektronen oder geladenen Atomkernen durch luftleere Röhren. Sie werden mit Hochspannung auf annähernd Lichtgeschwindigkeit beschleunigt. **Ringförmige Beschleuniger** haben den Vorteil, dass in ihnen die Teilchen beliebig oft im Kreis fliegen. Bei jeder Runde erhalten sie in Beschleunigungsstrecken etwas mehr Energie. Wenn die Materiewolken kollidieren, untersuchen Detektoren, welche grundlegenden Prozesse dabei ablaufen.

Ringbeschleuniger haben einen Nachteil: **Magnete** müssen die Teilchen auf ihre Kreisbahn zwingen. Je mehr Energie die Teilchen schon haben und je extremer die Kurve ist, umso stärker müssen die Magnete sein. Cern-Forscher entwickeln zwar stetig bessere Magnete (unten), doch die Fortschritte sind klein. Daher können nur größere Ringbeschleuniger energiereichere Teilchen auf der Bahn halten.



»Mit den FCCs könnten wir spannende Phänomene erstmals direkt untersuchen.«

Beate Heinemann



Sollen die Future Circular Collider gebaut werden? Im großen P.M.-Interview argumentiert als Befürworterin **Beate Heinemann**, Physikerin am Zentrum Desy in Hamburg und Professorin an der Universität Freiburg. Sie forscht auch am Cern und wirkte am Strategiekonzept der europäischen Teilchenphysiker mit. Als Kritikerin spricht **Sabine Hossenfelder** vom Frankfurt Institute for Advanced Studies. Die theoretische Physikerin ist Autorin des Buchs »Das hässliche Universum« sowie des Wissenschaftsblogs »Backreaction«.

Frau Heinemann, der aktuell größte Beschleuniger LHC hat 2012 das Higgs-Teilchen gefunden. Nun plädieren Teilchenphysiker für den Bau von noch größeren Beschleunigern, den Future Circular Colliders. Welche Entdeckungen erwarten Sie von den FCCs??

HEINEMANN: Tatsächlich sollen zwei Beschleuniger entstehen, allerdings über einen Zeitraum von 70 Jahren. Zunächst planen wir einen, den wir die »Higgs-Fabrik« nennen, weil wir mit ihm Higgs-Teilchen am laufen-

■ Zu den Hadronen zählen Protonen und Neutronen, die Bausteine der Atomkerne. Mit Hadronenbeschleunigern lassen sich besonders energiereiche Kollisionen erzeugen.

den Band produzieren könnten. Sein Kürzel ist FCC-ee, denn dort würden Elektronen e^- und ihre positiven Antiteilchen e^+ zusammenprallen. Wir haben zwar mit dem LHC das Higgs gefunden, aber wie genau es mit anderen Elementarteilchen wechselwirkt und ihnen dabei ihre Masse verleiht, wissen wir noch nicht (siehe Kasten Seite 27). Die Higgs-Fabrik soll dies herausfinden. Sie könnte frühestens 2040 an den Start gehen und würde dann 15 Jahre lang betrieben. Parallel wollen wir einen **HADRONENBESCHLEUNIGER** entwickeln, den FCC-hh, der den ersten Beschleuniger ablöst. Er würde etwa 2065 starten und 25 Jahre laufen. Er könnte eine mindes-

tens siebenmal höhere Energie liefern sowie eine 30-mal höhere Kollisionsrate als der aktuelle Beschleuniger LHC. Der neue Energiebereich ist sehr interessant, weil wir dort spannende Phänomene erstmals direkt untersuchen könnten.

Frau Hossenfelder, Sie sprechen sich gegen den Bau aus. Warum halten Sie ihn für keine gute Idee? Das Cern hat doch mit dem LHC bewiesen, dass es erfolgreiche Forschung betreibt.

HOSENFELDER: Natürlich war der LHC ein großer Erfolg. Das Higgs-Teilchen wurde schon 1964 von Peter Higgs vorhergesagt, und der LHC wurde vor

allem gebaut, um es zu finden. Wir theoretischen Physiker sind ja darauf angewiesen, dass jemand Geld in die Hand nimmt, um unsere Theorien zu überprüfen. Aber bei aller Dankbarkeit: Für die jetzt geplanten Beschleuniger gibt es kein solches Argument, warum man neue Teilchen finden sollte. Das Higgs war der fehlende Baustein im Standardmodell der Teilchenphysik – das ist jetzt komplett. Physikalisch spannend wird es erst wieder bei Energien, wie sie ganz kurz nach dem Urknall geherrscht haben. Die sind aber so riesig, dass sie auf der Erde nicht hergestellt werden können. Es besteht die Gefahr, dass wir mit immer größerem Aufwand im-

mer höhere Energien erzeugen – sich in diesen Bereichen aber nichts Neues finden lässt. **HEINEMANN:** Es geht aber in der Teilchenphysik nicht nur darum, neue Teilchen zu finden! Es geht darum, die Natur besser zu verstehen. Unser Standardmodell ist zwar komplett, aber es hat ein großes Problem. Die dahinterstehende Theorie ist sehr schön **SYMMETRISCH**. In der Realität aber sind einige der Symmetrien verletzt, Physiker nennen das **SYMMETRIEBRECHUNG**. Ein Beispiel: Eigentlich müssten beim Urknall gleich viel Materie und Antimaterie entstanden sein, die sich sofort wieder gegenseitig zu Energie zerstrahlten. Aber offenbar blieb

»Es besteht die große Gefahr, dass sich dort nichts Neues finden lässt.«

Sabine Hossenfelder



etwas Materie übrig, sonst wären wir jetzt nicht hier. Die Frage ist: Wann nach dem Urknall hat sich diese Symmetriebrechung vollzogen und warum?

Jetzt haben wir aber gerade von Frau Hossenfelder gehört, dass Energien wie kurz nach dem Urknall gar nicht auf der Erde erzeugt werden können ...

HEINEMANN: Ja, das ist richtig. Aber solche Symmetriebrechungen lassen sich sehr wohl untersuchen. Die treten zum Beispiel auch auf, wenn das Higgs den Elementarteilchen ihre Masse verleiht. Diese Massen sind grotesk unterschiedlich! Warum sie so grotesk unterschiedlich sind, ist eine wichtige Forschungsfrage. Zum Beispiel ist das schwerste Quark, das Top, 80 000-mal schwerer als das leichteste, das Up. Die Massen scheinen vollkommen willkürlich und unnatürlich. Unschön, wenn Sie so wollen. Ich weiß noch, wie ich mich als Studentin zu Hause hingeworfen und versucht habe, mathematische Funktionen zu finden, die diese Werte sinnvoll miteinander verknüpfen. Leider ohne Erfolg! Dieses Rätsel könnten wir mit der Higgs-Fabrik vielleicht lösen.

HOSENFELDER: Ich muss zugeben, ich habe als Studentin genau dasselbe gemacht wie Sie, als ich das erste Mal davon gehört habe. (lacht) Man denkt: ►

■ Physikalische Symmetrien sind mathematische Regelmäßigkeiten, die Forscher in zahlreichen Prozessen der Natur entdeckt haben.

■ Physiker sprechen von Symmetriebrechung, wenn eine Symmetrie, die sonst überall zu gelten scheint, bei einigen wenigen Prozessen nicht auftritt.

FOTOS: JENS UMBACH, LEMRICH

»Man kann nicht Milliarden ausgeben, nur weil man auf Glück hofft.«

Sabine Hossenfelder

Da muss doch ein Muster dahinterstecken! Ich würde mich freuen, wenn man dafür eine Erklärung hätte. Allerdings werden uns da die geplanten Beschleuniger nicht weiterhelfen. Nur weil Sie eine Merkwürdigkeit noch genauer vermessen, wird sie nicht weniger merkwürdig. Außerdem: Ihr Argument ist letztlich, dass diese krumme Massenverteilung irgendwie unschön sei. Unschönheit ist aber schlichtweg kein wissenschaftliches Kriterium. Mit dem **SCHÖNHEITSARGUMENT** wurde vorhergesagt, dass man am LHC **»SUPERSYMMETRISCHE TEILCHEN«** finden würde. Das ist nicht passiert, und damit ist das Schönheitsargument meiner Meinung nach tot.

■ *Annahme einiger Forscher, die Natur sei in ihren Grundstrukturen »schön«. Wo sie uns nicht so erscheine, hätten wir sie zu wenig verstanden.*

■ *Eine prognostizierte Form von Symmetrie: Alle Elementarteilchen hätten einen »SuSy«-Partner. Bislang wurden keine nachgewiesen.*

Frau Hossenfelder, Sie sagen, Schönheit sei kein wissenschaftliches Kriterium; Wissenschaftler sollten also Strukturen in der Natur nicht bloß deswegen untersuchen, weil sie sie als »unschön« empfinden. Welche Probleme sollten Forschende denn stattdessen untersuchen?

HOSSENFELDER: Theoretische Vorhersagen waren in der Geschichte der Physik immer dann erfolgreich, wenn sie einen Widerspruch in den existierenden Theorien auflösen sollten. Genau das hat auch zur Vorhersage und Entdeckung des Higgs geführt, denn ohne das Higgs würde das Standardmodell nicht funktionieren. Echte Widersprüche sehe ich in den jetzt ge-

nannten Themenfeldern aber weit und breit nicht. Es gibt sie, aber anderswo! So passen die beiden grundlegenden Theorien der Physik nicht zusammen: das Standardmodell und die Allgemeine Relativitätstheorie. Dieser Widerspruch ist drängender als die angeblichen »Unschönheiten« und »Unnatürlichkeiten«. Ich sage nicht, dass es nicht auch Durchbrüche gibt durch zufällige experimentelle Funde. Aber man kann halt nicht Milliarden ausgeben, nur weil man auf dieses Glück hofft.

Frau Heinemann, stimmt es, dass die Physiker, wie Frau Hossenfelder sagt, im Dunkeln stochern und auf einen Glücksfund hoffen?

Was plant das Cern?

VISION Bis 2026 feilt das Cern an seinem Zukunftskonzept, dann entscheiden die Geldgeber, ob das Jahrhundertprojekt FCC realisiert wird. Doch wie sähe dann der Plan genau aus?

2030: Beginn des Tunnelbaus Die 98 Kilometer lange Röhre soll allein fünf Milliarden Euro kosten.

2040: Start der Higgs-Fabrik Im Tunnel soll zunächst der schwächere der beiden Beschleuniger, der FCC-ee, entstehen. In ihm würden Elektronen und ihre Antiteilchen, die Positronen, kollidieren. Mit den leichten, winzigen Teilchen lassen sich Prozesse des Mikrokosmos höchst präzise untersuchen, Abweichungen zwischen Theorie und Wirklichkeit würden klarer zutage treten. Die Higgs-Fabrik würde sechs Milliarden Euro kosten, ab **2055** würde sie umgebaut.

2065: Start des Hadronenbeschleunigers Als eigentlicher Nachfolger des LHC soll der FCC-hh in den Tunnel einziehen. Er würde mehr Energie als alle Beschleuniger zuvor aufbringen. In ihm flögen Hadronen, etwa Protonen. Die Kollision der großen und schweren Teilchen birgt gewaltige Energie, aber auch großes Chaos – so lassen sich völlig neue Phänomene entdecken, aber nicht ganz so präzise untersuchen. FCC-hh würde weitere 15 Milliarden Euro kosten. Er soll 25 Jahre lang, bis **2090**, laufen.

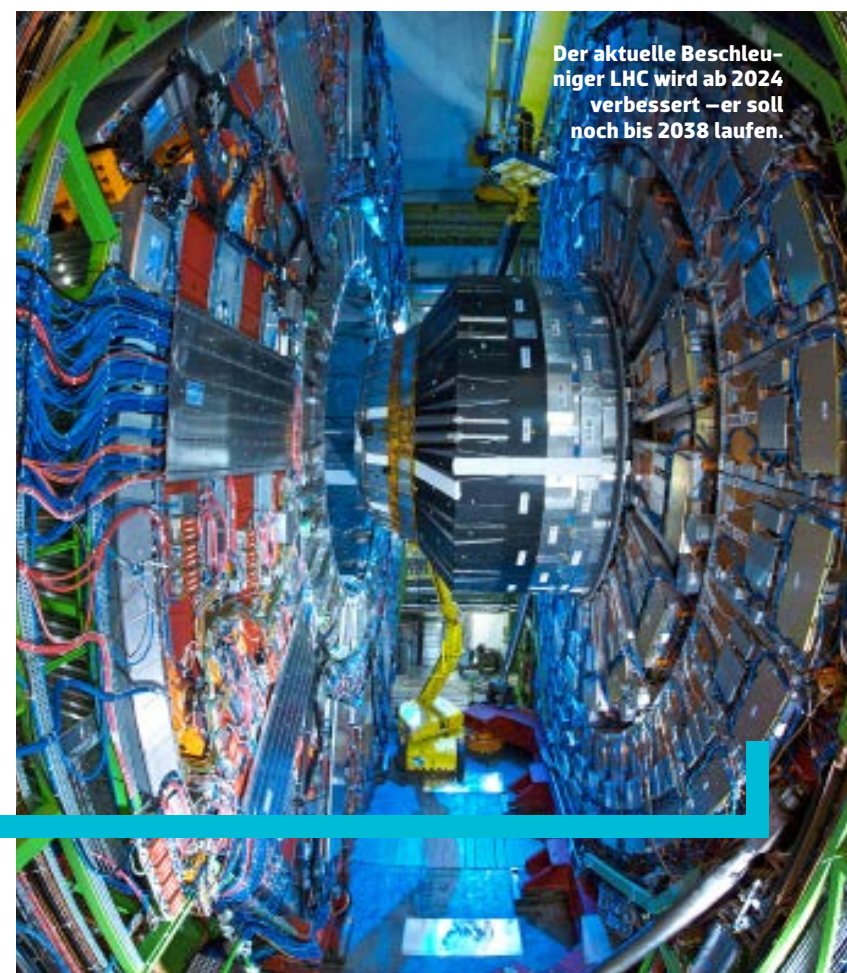
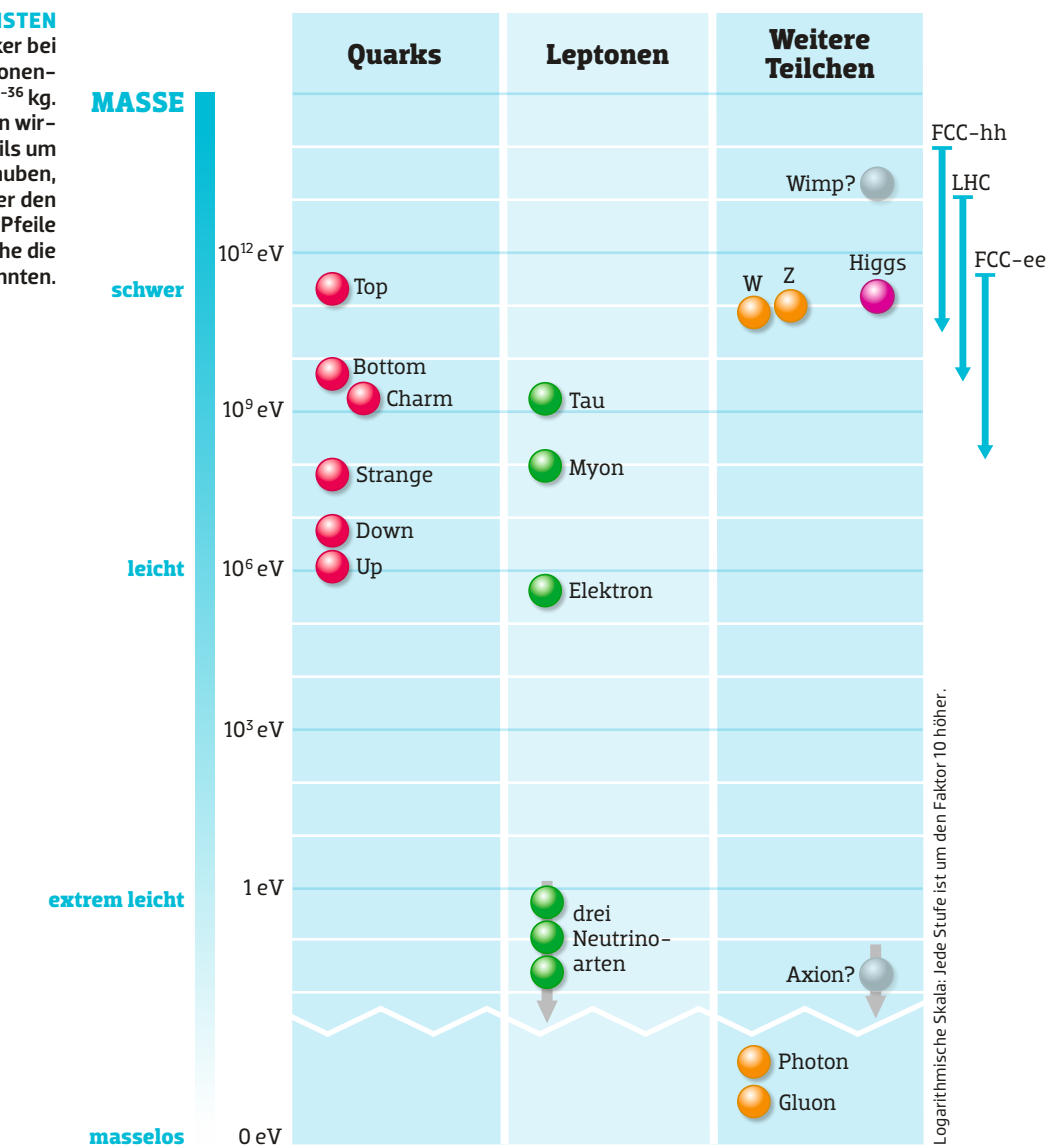


FOTO: SCIENCE PHOTO LIBRARY; INFOGRAFIK: AXEL KOCK

DIE MASSE DER ALLERKLEINSTEN
Statt Kilogramm nutzen Physiker bei winzigen Massen die Einheit Elektronenvolt: 1 eV entspricht $1,8 \cdot 10^{-36}$ kg. Die Massen der Elementarteilchen wirken zufällig, unterscheiden sich teils um das Billionenfache. Physiker glauben, dass diese Unterschiede viel über den Mikrokosmos verraten. Die blauen Pfeile zeigen, welche Energiebereiche die Beschleuniger untersuchen könnten.

HEINEMANN: Nein. Der Energiebereich, den die neuen Beschleuniger untersuchen sollen, ist total interessant. Dazu müssen wir uns noch einmal das Standardmodell anschauen. Es beschreibt, wie alle Kräfte durch Austauschteilchen übertragen werden. Die elektromagnetische Kraft zum Beispiel wird vermittelt durch Photonen. Die Theorie besagt eigentlich, dass alle Austauschteilchen masselos seien. Das trifft auch auf die meisten zu – bis auf die W- und Z-Bosonen. Sie sind die Austauschteilchen der Schwachen Kernkraft. Die W- und Z-Bosonen sind sogar ziemlich schwer, fast so schwer wie Silberatome. Wir haben also wieder eine Symmetriebrechung – die sonst masselosen Austauschteilchen haben auf einmal eine Masse. Und noch eines kommt hinzu: Ihre Masse erhalten W- und Z-Bosonen vom Higgs – und dieses ist ausgerechnet ähnlich schwer! Dieser Bereich von Energie und Masse – denn nach Einstein sind Masse und Energie ja dasselbe – scheint also sehr wichtig zu sein. Klar kann man sagen: Das hat Gott halt so ausgewürfelt. Aber es ist schon merkwürdig! Und genau deswegen wollen wir diesen Energiebereich präziser untersuchen, was mit den FCCs möglich sein wird.

Die neuen Beschleuniger sollen also Dinge im Standardmodell erklären, die Physiker bislang nicht verstehen. Aber gibt es nicht dennoch die Hoffnung, dass sich



mit ihnen auch etwas ganz Neues entdecken ließe?

HEINEMANN: Doch, und zwar eine Antwort auf ein ganz drängendes Problem der Kosmologie: die Dunkle Materie. Sie macht rund 80 Prozent der Materie im Universum aus, und dennoch wissen wir nicht, worum es sich bei ihr handelt. Bekommt die Dunkle Materie ihre Masse auch vom Higgs, wie alle anderen Teilchen? Falls ja, könnte das Higgs eventuell auch zuweilen in Dunkle Materie zerfallen – diesen Vorgang könnten wir in der Higgs-Fabrik vielleicht beobachten. Um zu erklären, aus was für Teilchen die Dunkle Materie be-

■ *Kandidat für Dunkle Materie. Das schwere Teilchen würde vor allem die Schwache Kraft nutzen, daher sein englischer Name: »Schwächling«.*

■ *Das Experiment XenonIT unter dem Gran Sasso d'Italia suchte in 3,5 Tonnen Xenon nach Spuren von Wimps – erfolglos.*

steht, haben Physiker verschiedene Hypothesen erstellt. Solch ein hypothetisches Teilchen ist das **WIMP**. Seine Masse könnte gerade in dem Energiebereich liegen, den wir mit den FCCs unter die Lupe nehmen wollen. **HOSSENFELDER:** Sie verschweigen, dass schon seit Jahrzehnten nach Wimps aus dem All gesucht wird, mittlerweile in aufwendigen unterirdischen Tanks mit Tonnen von **HOCHREINEM XENON**. Bisher sind dadurch schon viele Vorhersagen zu Wimps widerlegt worden. Die Theoretiker denken sich immer wieder einen neuen Grund aus, wieso das Ding vielleicht doch ein bisschen

Dunkle Materie (in der Simulation gelb) soll dafür gesorgt haben, dass normale Materie (violett) sich überhaupt zu Galaxien zusammenschloss.

schwerer ist oder ein bisschen schwächer wechselwirkt, weswegen man es doch noch nicht gefunden habe. Irgendwann muss man sagen: Leute, ihr habt euren Spaß gehabt, aber jetzt ist Schluss. Inzwischen wendet man sich ja auch wieder mehr einem extrem leichten Kandidaten für die Dunkle Materie zu, dem **AXION**. Um das zu finden, braucht man keinen großen Beschleuniger mit Wumms und Krach, sondern einen speziellen Detektor, der nur wenige Millionen kostet.

Frau Hossenfelder, was sollen denn die Teilchenphysiker tun, wenn nicht einen neuen Beschleuniger bauen?

HOSSENFELDER: Diese Frage trifft genau das Problem! Überspitzt gesagt ist Beschleunigerbauen ja die ureigenste Tätigkeit von Teilchenphysikern. In diesen Sektor geht einfach viel zu viel Geld

■ Kandidat für Dunkle Materie. Axionen wären bis zu zehn Milliarden Mal leichter als Elektronen.

■ Ein Laser erzeugt in einem Plasma eine Welle, die sich fast mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet. Geladene Teilchen könnten auf der Welle »surfen«.

rein. Für die Gesellschaft hat das quasi überhaupt keine Relevanz. **HEINEMANN:** Hier muss ich widersprechen. Zunächst: Die Kosten der FCCs über die Laufzeit entsprechen umgerechnet pro EU-Bürger jährlich zwei Euro. Ich halte viele Vorträge vor Laien, und da sehe ich stets eine große Begeisterung für die Teilchenphysik. Außerdem haben wir in den vergangenen Jahrzehnten immer präzisere Beschleuniger entwickelt. Das hat den Menschen direkt geholfen: Auf der Welt gibt es mittlerweile über 40 000 Beschleuniger – und die meisten davon stehen nicht in Physiklaboren, sondern in Krankenhäusern! Mit ihnen wird Krebs bekämpft, werden Tumore bestrahlt. Das Cern hat der Gesellschaft zudem noch eine weitere Entwicklung geschenkt: das World Wide Web. Es wurde 1989 von Teilchenphysikern entwickelt, um den Daten-

austausch in der Forschung zu verbessern. Heute profitieren alle Menschen davon, jeden Tag. **Frau Hossenfelder, zurück zu der Frage: Was sollen denn die Teilchenphysiker nun tun, wenn nicht einen neuen Beschleuniger bauen?** **HOSSENFELDER:** Sie sollten neue Beschleunigertechniken weiterentwickeln. Mit ihnen ließen sich zukünftig vielleicht kleinere und preiswertere Beschleuniger bauen. Statt 100 Kilometern bräuchte man dann eines Tages vielleicht nur eine Beschleunigungsstrecke von einem Kilometer, um Kollisionen derart hoher Energien zu erzeugen. Da ist etwa die **PLASMA-WAKEFIELD-BESCHLEUNIGUNG**, bei der die Teilchen sozusagen auf einem Plasma surfen ... **HEINEMANN:** Daran arbeiten wir ja schon, hier am Desy und auch am Cern. Die Technik ließe sich zur Erzeugung von intensivem

»In den FCCs könnten wir nach Spuren Dunkler Materie suchen.«

Beate Heinemann

Röntgenlicht nutzen, um etwa Moleküle oder Viren zu untersuchen. Doch sie kann bislang nicht die Qualität des Teilchenstrahls liefern, die für die hier diskutierte Forschung nötig ist. **HOSSENFELDER:** Dann sollten die Teilchenphysiker auf technische Durchbrüche warten. Auf der Suche nach Dunkler Materie sollten sie sich in der Zwischenzeit auf **KOSMISCHE TEILCHEN** konzentrieren – diese Experimente sind nicht so teuer. Und mit **TELESKOPEN** ließen sich spannende Beobachtungen zum frühen Universum machen.

Frau Hossenfelder, Sie meinen eben, bei der Teilchenphysik spränge für die Gesellschaft nichts heraus. Nun plädieren Sie für die Suche

nach Dunkler Materie. Die würde das Leben auf der Erde auch nicht besser machen ... **HOSSENFELDER:** Was ich sagte, ist, dass das Bauen von riesigen Teilchenbeschleunigern per se keine soziale Relevanz hat. Natürlich springt für die Gesellschaft etwas heraus, wenn wir mehr über das Universum lernen. Meiner Meinung nach macht Wissen alleine schon das Leben besser – und in einigen Jahrzehnten bis Jahrhunderten könnte es zu wichtigen Anwendungen führen. Allerdings sollte man Forschungsgelder dort investieren, wo man die besten Chancen hat, etwas Neues zu lernen. Das ist beim Riesenbeschleuniger eben nicht der Fall. Deshalb sage ich: lieber in andere Experimente investieren!

■ Auch das Cern sucht – etwa im Experiment CAST – nach Spuren von Axionen, die von der Sonne stammen.

■ Für 1,3 Milliarden Euro entsteht in Chile zurzeit das größte optische Teleskop der Erde: das Extremely Large Telescope.

HEINEMANN: Es ist natürlich Ansichtssache, worin man das Geld investieren sollte. Das entscheiden ja auch nicht wir Teilchenforscher, sondern letztlich Politiker, aufgrund von Gutachten internationaler Gremien. Wir Antragsteller müssen unsere Pläne und deren Relevanz für die Gesellschaft genau erklären. **HOSSENFELDER:** Da muss ich deutlich widersprechen. Es ist Ansichtssache, was ein gutes wissenschaftliches Problem ist? Das ist komplett unwissenschaftlich. Schreiben Sie es so in Ihre Anträge: Wir denken, das Standardmodell ist nicht schön genug, deshalb gebt uns bitte Geld, und zwar 66 Milliarden Euro. **Die Gremien müssten doch über genügend Sach-** ►



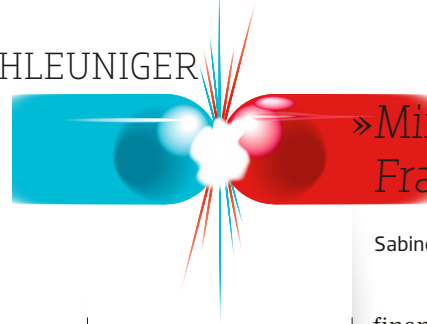
Am Cern gelang der Nachweis des Higgs (oben). Weltweit jubelten Forscher bei der Verkündung.



FOTOS: SCIENCE PHOTO LIBRARY, CERN, DDP IMAGES

Wie durch Sirup

MASSE Warum sind die Bausteine der Natur verschieden schwer? Eine Erklärung lieferten 1964 Peter Higgs und weitere Physiker: Demnach ist das Universum von einem Energiefeld durchzogen, dem **Higgs-Feld**. Laut Theorie wirkt es unterschiedlich stark auf Elementarteilchen, die dadurch träger werden, als bewegten sie sich durch Sirup. Diese Trägheit sei das, was wir als Masse wahrnehmen. Auf wenige Teilchen, etwa Licht, hätte das Feld keinen Einfluss: Sie bewegten sich weiterhin ungestört und seien deswegen masselos. Das Higgs-Feld lässt sich nicht direkt beobachten, sondern bloß dann, wenn es **»verklumpt«**: Dann ist es als Higgs-Teilchen sichtbar. Sein Nachweis gelang am LHC des Cern. Doch warum das Higgs-Feld die Elementarteilchen verschieden stark beeinflusst, bleibt weiterhin unklar.



»Mir fehlt eine Diskussion, welche Fragen uns wirklich weiterbringen.«

Sabine Hossenfelder

verstand verfügen, um diese Fragen beurteilen zu können ...

HOSSENFELDER: Na ja, in den Gremien sitzen nicht nur Teilchenforscher, sonst wären sie ja auch nicht neutral. Aber den fachfremden Wissenschaftlern ist das halt oft zu komplex, zu viele Gleichungen, da verlassen sie sich auf das Urteil der Teilchenphysiker.

Es gäbe eine salomonische Lösung in Ihrem Streit: China überlegt, einen ähnlichen RINGBESCHLEUNIGER zu bauen. Vielleicht könnten sich europäische Forscher daran beteiligen.

HEINEMANN: Das stimmt, vom wissenschaftlichen Standpunkt her ist es egal, wo dieser Beschleuniger steht. Ich als Europäerin wäre dann aber traurig, denn das ist ein Projekt mit Leuchtkraft. Außerdem ist das investierte Geld ja nicht weg. Das geht vor allem in die Wirtschaft der Region, in der der Beschleuniger gebaut wird: Wirtschaftswissenschaftler haben ausgerechnet, dass der

■ *Der Circular Electron Positron Collider soll angeblich schon 2030 in China starten – doch noch ist das Projekt nicht beschlossen.*

finanzielle Nutzen des aktuellen Beschleunigers LHC schon heute seine Kosten übersteigt, selbst wenn man die rein wissenschaftlichen Ergebnisse herausrechnet. Außerdem könnten für die FCCs neue, innovative Technologien entstehen, etwa Supraleiter oder Fortschritte in der Automatisierung. Firmen in Europa könnten sie dann für Anwendungen außerhalb der Forschung weiterentwickeln.

HOSSENFELDER: Das gilt für jedes Großprojekt ...

HEINEMANN: Ja, aber eben besonders für die FCCs. Im Übrigen wären auch bei einem Bau in Europa Forscher aus der ganzen Welt beteiligt – deren Länder müssten sich finanziell stark beteiligen, noch mehr als beim LHC. Mir ist dieser internationale Aspekt ganz wichtig. Kurz nach der Entdeckung des Higgs meinte ein Geologe zu mir, wie unglaublich inspirierend er es finde, dass das Teilchen vor knapp 50 Jahren vorhergesagt wurde und dann Tausende von Forschern aus so vielen Ländern über Jahrzehnte zusammengearbeitet und es tatsächlich gefunden haben.

Der Klimawandel ist eines der beherrschenden Probleme der Gegenwart – wir haben vielleicht noch 10, 20 Jahre, um ihn abzuwenden. Wäre es nicht ein starkes Zeichen, wenn Teilchenphysiker und Kosmologen sagen würden: »Wir stecken unsere Arbeitskraft und unser Geld jetzt erst mal in die Klimawissenschaften und lösen ein Problem, das akut die Menschheit bedroht«?

HOSSENFELDER: Nur weil man viel Geld reinsteckt, heißt das ja nicht, dass hinten viel dabei rauskommt. Aber es stimmt, bei hohen Investitionen – etwa Beschleunigern, Teleskopen oder Raummissionen – muss man schon fragen: Können wir uns das noch leisten? Letztlich sollten das nicht die Wissenschaftler selbst beantworten. Das ist eine politische Frage.

HEINEMANN: Da stimme ich mit Frau Hossenfelder überein. Alles nur in eine Forschungsrichtung zu investieren funktioniert nicht. Sicherlich sollten alle Forscher mögliche Anwendungen ihrer Technologien im Auge ha-

ben, die zur Lösung der Klimakrise beitragen können. Und natürlich sollten sie auf die **NACHHALTIGKEIT DER GROSS-PROJEKTE** achten.

Bei der Entwicklung der Corona-Impfstoffe hat sich aber schon gezeigt: Hohe Investitionen beschleunigen die Entwicklung extrem. Und je mehr kluge Köpfe, desto mehr Ideen. Wären Sie denn bereit, für einige Jahre zusammen mit anderen Forschenden an Lösungen der Klimakrise zu arbeiten?

HEINEMANN: Ja, ich denke in der Tat darüber nach, wie ich mit meiner Expertise als Wissenschaftlerin zur Lösung der Klimakrise beitragen kann. Es könnte sinnvoll sein, ein Gemeinschaftsprojekt für das Klima zu initiieren, mit viel Geld und Forschenden aus allen Disziplinen. So lassen sich hoffentlich außergewöhnliche Ergeb-

■ *Der Strombedarf des Cern liegt bei 1,3 Terawattstunden pro Jahr. Das entspricht dem Verbrauch von 300 000 Haushalten. Der Strom stammt aus einem französischen Kernkraftwerk.*



Die Fragen stellten **Wolfgang Richter** und **Martin Scheufens**, beide ebenfalls Physiker. Über die Frage, ob die FCCs gebaut werden sollten, haben sie auch untereinander heftig diskutiert.

nisse in kurzer Zeit erreichen. **HOSSENFELDER:** Prinzipiell wäre ich bereit, an solch einem Gemeinschaftsprojekt mitzuwirken – wobei ich glaube, dass ich nicht wirklich gut für die Aufgabe qualifiziert bin.

Welches Resümee ziehen Sie aus unserem Gespräch? **HOSSENFELDER:** Frau Heinemann und mich eint die Faszination für die grundlegenden Naturgesetze. Wenn wir sie langfristig besser verstehen wollen, müssen wir kontinuierlich neue Fragen erforschen. Was mir fehlt, ist eine breite Diskussion darüber, welche Fragen uns wirklich weiterbringen. Wenn wir uns die Geschichte der Physik ansehen, so scheint mir der Bau der FCCs derzeit keine gute Strategie zu sein. Aber auch schlechte Strategien funktionieren manchmal. **HEINEMANN:** Wissenschaft lebt vom produktiven Streit. Inso-

fern fand ich unser Gespräch jetzt sinnvoll. Es muss meiner Meinung nach eine gute Balance geben zwischen zielgerichteter Forschung, die konkrete Probleme von heute effektiv angeht, und kleinen und großen Projekten der Grundlagenforschung, die potenziell revolutionäre Änderungen bewirken können. Ob wir nun die FCCs bauen oder nicht: Wir können jedenfalls nicht auf Grundlagenforschung verzichten, denn nur sie liefert uns langfristig die völlig unerwarteten Lösungen, die die Menschheit weiterbringen. ■

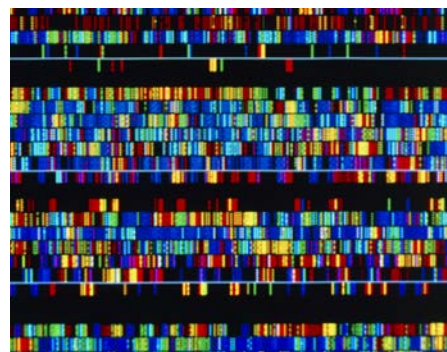
PM.KOMPAKT

- Das Cern will neue, gigantische **Teilchenbeschleuniger** bauen. Die Kosten: 66 Milliarden Euro.
- Sie sollen wichtige Phänomene wie **Dunkle Materie** erforschen.
- Kritiker halten die **Kosten für zu hoch** und die Hypothesen der Forscher für zu spekulativ.

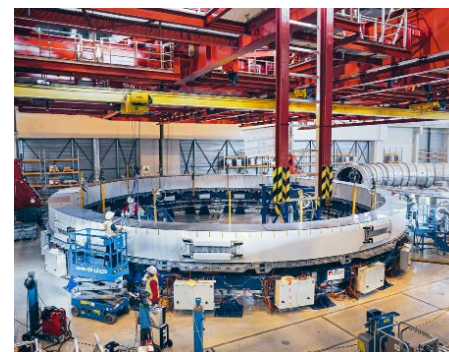
WICHTIGE FORSCHUNG, TEURE EXPERIMENTE



Die Weltraumstation ISS ist das wohl teuerste aller Experimente: Seit 1998 waren für das Labor im Orbit über 120 Milliarden Euro nötig.

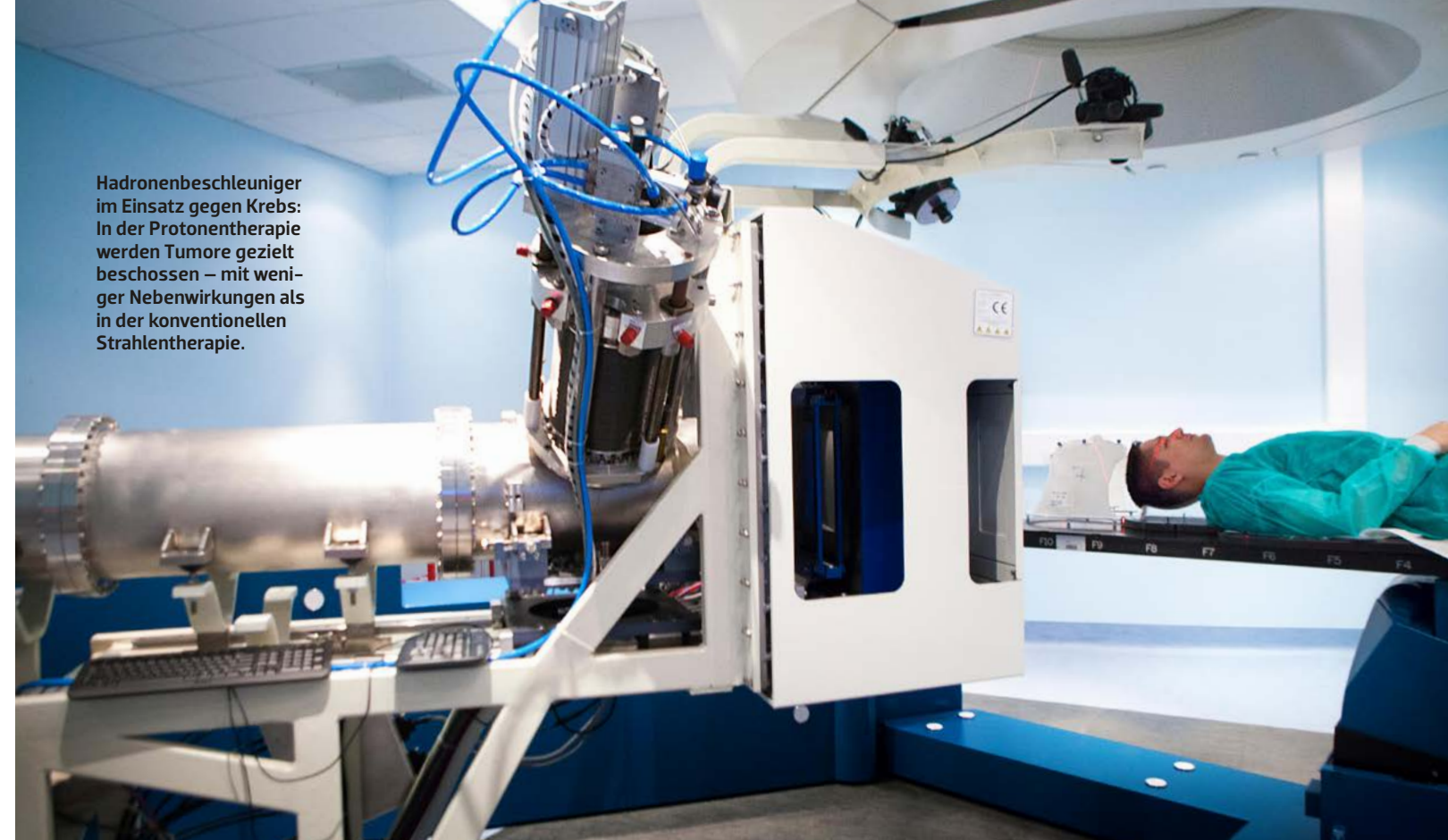


Das Humangenomprojekt, das in den 1990ern und 2000ern das menschliche Genom entschlüsselte, kostete nur 4 Milliarden Euro.



Der Kernfusionsreaktor Iter soll eine saubere Energiequelle erschließen. Die Kosten, bereits über 20 Milliarden Euro, steigen stetig.

FOTOS: NASA, SCIENCE PHOTO LIBRARY, ITER, ALAMY



Hadronenbeschleuniger im Einsatz gegen Krebs: In der Protonentherapie werden Tumore gezielt beschossen – mit weniger Nebenwirkungen als in der konventionellen Strahlentherapie.