MIKRO KOSMOS.

DESY erforscht, was die Welt im Innersten zusammenhält

Auf den Spuren von Quarks, Supersymmetrie und Extra-Dimensionen – die Teilchenphysiker bei DESY erforschen das Gefüge unserer Welt. Mit großen Beschleunigeranlagen, Supercomputern und Spitzentechnologie an der Grenze des Machbaren ergründen sie die Geheimnisse der fundamentalen Bausteine und Kräfte im Universum. Dazu arbeiten sie in nationalen und internationalen Netzwerken mit Kollegen aus der ganzen Welt zusammen.

Beschleuniger | Forschung mit Photonen | Teilchenphysik

Deutsches Elektronen-Synchrotron
Ein Forschungszentrum der Helmholtz-Gemeinschaft

DESY

Im Herzen des H1-Detektors am HERA-Beschleuniger

INHALT.

DESY

Wir machen Erkenntnis möglich 4

Das Deutsche Elektronen-Synchrotron DESY ist eines der weltweit führenden Beschleunigerzentren zur Erforschung der Materie. DESY entwickelt, baut und nutzt Beschleuniger und Detektoren für die Forschung mit Photonen und die Teilchenphysik.

ZEIT REISEN

Einblicke in die Welt der kleinsten Teilchen 6

Die Teilchenphysik erforscht zentrale Fragen unseres Weltbilds: Woraus bestehen wir? Was sind die Grundbausteine unserer Welt und was hält sie zusammen? Wie entstand das Universum und wie wurde es zu dem, was es heute ist? ...

WELT BILD

Die großen Rätsel des Universums 8

Im letzten Jahrhundert sind die Physiker in immer kleinere Dimensionen vorgedrungen. Das Standardmodell der Teilchenphysik beschreibt heute mit großem Erfolg die Grundbausteine unserer Welt und die Kräfte, die zwischen ihnen wirken. Dennoch lässt es zentrale Fragen offen. ...

WELT FORSCHUNG

DESY: Ein internationales Zentrum der Teilchenphysik 10

Die großen Fragen nach dem Ursprung und der Beschaffenheit unseres Universums beschäftigen Wissenschaftler weltweit. Sie sind nur zu lösen, wenn alle Kräfte in nationalen und internationalen Forschungsnetzwerken gebündelt werden. Beim Teilchenphysik-Forschungszentrum DESY hat diese Vernetzung – über politische und kulturelle Grenzen hinweg – seit langem Tradition.

WEG WEISER

HERA: Das Super-Elektronenmikroskop 12

Die Hadron-Elektron-Ring-Anlage HERA war der größte Teilchenbeschleuniger bei DESY und zugleich Deutschlands größtes Forschungsinstrument: ein riesiges Super-Elektronenmikroskop, das den Physikern den weltweit schärfsten Blick ins Proton eröffnete. ...

WELT MASCHINE

LHC: Der leistungsstärkste Beschleuniger der Welt 20

Im Jahr 2008 ging beim europäischen Forschungszentrum CERN in Genf die größte Maschine der Welt in Betrieb: der *Large Hadron Collider* LHC, ein gigantischer, ringförmiger Teilchenbeschleuniger mit 26,7 Kilometern Umfang. Bis zu 175 Meter tief unter dem Genfer Umland und dem französischen Jura stoßen hier Protonen oder schwere Ionen frontal aufeinander – bei den höchsten Energien, die je in einem Teilchenbeschleuniger erreicht wurden. ...

NEU LAND

ILC: Das Zukunftsprojekt der Teilchenphysik 30

Während der Protonenbeschleuniger LHC die Tür zur Teraskala erstmals weit aufstößt und erste Einsichten in dieses absolute Neuland bietet, werden sich die großen Rätsel des Universums nur in Verbindung mit einer weiteren Präzisionsmaschine lösen lassen – einem Linearbeschleuniger, in dem Elektronen und ihre Antiteilchen, die Positronen, bei höchsten Energien zusammenstoßen. ...

LEICHT GEWICHTE

ALPS: Auf der Suche nach leichten Teilchen 38

Auf der Fahndungsliste der DESY-Forscher stehen nicht nur extrem schwere Teilchen, die mit großen Hochenergiebeschleunigern erzeugt werden müssen. Auch sehr leichte Teilchen am unteren Ende der Energieskala könnten den Physikern Hinweise auf unbekannte physikalische Phänomene liefern. ...

WELTRAUM BOTEN

IceCube und CTA: Die Fenster zum Universum 40

Die DESY-Wissenschaftler forschen auch in der Astroteilchenphysik, einem Fachgebiet, das Methoden und Fragestellungen aus der Astrophysik, der Kosmologie und der Teilchenphysik vereint. Aus dem Weltall gelangen ständig unterschiedliche Arten von Teilchen auf die Erde, die Auskunft über die Geschehnisse in den fernen Weiten des Kosmos geben können. ...

DENK FABRIK

Theorie: Die Suche nach der Weltfomel 46

Ohne sie wäre das beste Experiment nichts wert: Die theoretische Teilchenphysik ergründet das große Bild, das den experimentellen Ergebnissen zugrunde liegt. ...

DESY.

Wir machen Erkenntnis möglich

Das Deutsche Elektronen-Synchrotron DESY ist eines der weltweit führenden Beschleunigerzentren zur Erforschung der Materie. DESY entwickelt, baut und nutzt Beschleuniger und Detektoren für die Forschung mit Photonen und die Teilchenphysik.

DESY betreibt Grundlagenforschung in verschiedenen Naturwissenschaften und verfolgt dabei drei Schwerpunkte:

- **Beschleuniger:**
  DESY entwickelt, baut und betreibt große Beschleunigeranlagen, um Teilchen auf höchste Energien zu bringen.

- **Forschung mit Photonen:**
  Physiker, Chemiker, Geologen, Biologen, Mediziner und Materialforscher nutzen das besondere Licht aus den Beschleunigern, um Strukturen und Prozesse im Mikrokosmos sichtbar zu machen.

- **Teilchenphysik:**
  Wissenschaftler aus aller Welt erforschen an Beschleunigern die fundamentalen Bausteine und Kräfte im Universum.

Entsprechend vielseitig sind das Forschungsspektrum und die Zusammenarbeit mit nationalen und internationalen Partnern. Aus 45 Nationen kommen jährlich über 3000 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, um bei DESY zu forschen. Das Forschungsprogramm reicht dabei weit über die Anlagen in Hamburg und Zeuthen hinaus. DESY arbeitet intensiv an internationalen Großprojekten mit. Beispiele sind der Röntgenlaser European XFEL in Hamburg, der europäische Protonenbeschleuniger LHC in Genf, das internationale Neutrinoteleskop IceCube am Südpol oder der internationale Linearbeschleuniger ILC.

Steckbrief DESY

- Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY
- Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren
- Mit öffentlichen Mitteln finanziertes nationales Forschungszentrum
- Standorte: Hamburg und Zeuthen (Brandenburg)
- Mitarbeiter: 1900, davon 200 in Zeuthen
- Etat: 170 Millionen Euro (Hamburg: 154 Mio. Euro, Zeuthen: 16 Mio. Euro)

Computersimulation der Teilchenbeschleunigung

Beschleuniger

Die Entwicklung von Teilchenbeschleunigern stellt Mensch und Maschine vor besondere Herausforderungen. Immer wieder gilt es, in technisches Neuland vorzustoßen und Pionierarbeit zu leisten. DESY hat in 50 Jahren umfangreiche Erfahrungen in der Beschleunigerentwicklung gesammelt und gehört zur Weltspitze. Dabei verfolgt DESY zwei Forschungsrichtungen:

- Für die Forschung mit Photonen werden Lichtquellen entwickelt, die es ermöglichen, Strukturen und Prozesse auf extrem kleinen Raum- und Zeitskalen zu beleuchten. Dazu werden Teilchen zunächst beschleunigt und dann in großen Magnetstrukturen so abgelenkt, dass sie eine besondere Strahlung aussenden.
- Für die Teilchenphysik werden immer leistungsstärkere Beschleuniger entwickelt, um Teilchen auf immer höhere Energien zu beschleunigen und damit immer tiefer ins Innerste der Materie und zurück zur Entstehung des Universums zu blicken.

Forschung mit Photonen

Teilchenbeschleuniger erzeugen eine besondere Strahlung, die kleinste Details aus dem Mikrokosmos sichtbar macht. Bei DESY untersuchen Wissenschaftler aus aller Welt damit die atomare Struktur und die Reaktionen von vielversprechenden Werkstoffen und Biomolekülen, aus denen neue Medikamente gewonnen werden können. Im weltweiten Vergleich zeichnet sich die Forschung mit Photonen bei DESY durch die einzigartige Vielfalt der Lichtquellen aus.

- Der Teilchenbeschleuniger DORIS III liefert Strahlung für eine Vielzahl von Anwendungen. Hier werden zum Beispiel Katalysatoren oder Halbleiterkristalle analysiert.
- Weltweit einmalige Untersuchungsmöglichkeiten bietet der neue Freie-Elektronen-Laser FLASH, der hochintensive, kurzwellige Laserlichtblitze erzeugt.
- Ab 2009 steht den Forschern bei DESY die weltbeste Speicherring-Röntgenstrahlungsquelle, PETRA III, zur Verfügung.
- Der geplante Röntgenlaser European XFEL ergänzt das einzigartige Spektrum modernster Lichtquellen in der Metropolregion Hamburg.

Teilchenphysik

Auf den Spuren von Quarks, Supersymmetrie und Extradimensionen – die Teilchenphysiker bei DESY erforschen das Gefüge unserer Welt.

- Mit den am „Super-Elektronenmikroskop“ HERA, einem unterirdischen, sechs Kilometer langen Beschleuniger, aufgenommenen Daten enträtseln sie den Aufbau des Protons und die fundamentalen Naturkräfte.
- Einzigartige Chancen, die Geheimnisse von Materie, Energie, Raum und Zeit zu lüften, bieten den Forschern die nächsten Großprojekte der Teilchenphysik, an denen auch die DESY-Wissenschaftler beteiligt sind: der weltweit leistungsstärkste Beschleuniger LHC in Genf und der geplante internationale Linearbeschleuniger ILC.
- In die fernen Weiten des Kosmos blicken die DESY-Forscher und ihre Kollegen mit dem Neutrinoteleskop IceCube im Eis des Südpols, auf der Suche nach flüchtigen Geisterteilchen aus dem Weltall.

Ergänzend dazu ergründet die theoretische Teilchenphysik bei DESY das große Bild, das den vielen experimentellen Ergebnissen zugrunde liegt.

ZEIT REISEN.

Einblicke in die Welt der kleinsten Teilchen

Die Teilchenphysik erforscht zentrale Fragen unseres Weltbilds: Woraus bestehen wir? Was sind die Grundbausteine unserer Welt und was hält sie zusammen? Wie entstand das Universum und wie wurde es zu dem, was es heute ist? Das Deutsche Elektronen-Synchrotron DESY wurde 1959 als nationale Teilchenphysikeinrichtung gegründet, um Wissenschaftlern an deutschen Hochschulen die Untersuchung solcher Fragen zu ermöglichen. Heute gehört DESY zu den weltweit führenden Forschungszentren auf diesem Gebiet.

„Wir erforschen, ‘was die Welt im Innersten zusammenhält’. Das ist die Faszination der Grundlagenforschung.“

50 Jahre Teilchenforschung bei DESY

In den vergangenen 50 Jahren haben die Erkenntnisse der Teilchenforschung unser Weltbild revolutioniert. DESY hat maßgeblich dazu beigetragen. Im internationalen Rampenlicht stand das Forschungszentrum erstmals 1966 mit Präzisionsmessungen, die am ersten Teilchenbeschleuniger in Hamburg durchgeführt wurden: dem „Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY“, das dem Zentrum seinen Namen gab. Diese Ergebnisse erlaubten es, eine wichtige Kontroverse über die Gültigkeit der Quantenelektrodynamik – der Theorie der elektromagnetischen Kraft – zu Gunsten der Theorie zu entscheiden.

1978 ging mit PETRA der damals größte Speicherring seiner Art bei DESY in Betrieb. Bereits ein Jahr später gelang den PETRA-Experimenten eine bahnbrechende Entdeckung: Sie konnten erstmals das Gluon direkt beobachten – das Trägerteilchen der starken Kraft, welche die Grundbausteine aller Materie, die Quarks, aneinander bindet.

Von 1992 bis 2007 war Deutschlands größtes Forschungsinstrument bei DESY in Betrieb: der Elektron-Proton-

Beschleuniger HERA. Das 6,3 Kilometer lange Super-Elektronenmikroskop bot den Physikern den weltweit schärfsten Blick ins Proton. Viele der mit HERA gewonnenen Erkenntnisse gehören heute zum Grundlagenwissen über den Aufbau unserer Welt. Die Auswertung der HERA-Daten wird noch weitere einzigartige Einsichten in das Innenleben des Protons und die fundamentalen Kräfte liefern.

„Wir bauen auf die Erfolge der Vergangenheit, um die Forschungsvisionen der Zukunft in die Tat umzusetzen.“

Teilchenphysik mit Zukunft

Internationale Zusammenarbeit über kulturelle und politische Grenzen hinweg hat bei DESY seit langem Tradition. DESY engagiert sich bei einer Reihe von großen internationalen Anlagen, die nicht mehr von einem Land alleine getragen werden, sondern als breit aufgestellte internationale Projekte realisieren werden. Insbesondere beteiligt sich DESY an den Experimen-

ten am weltweit leistungsstärksten Beschleuniger, dem *Large Hadron Collider* LHC in Genf, für den bei DESY zudem Rechenzentren für die Überwachung der Datennahme und die Datenanalyse entstehen.

Eine führende Rolle spielt DESY bei dem großen Zukunftsprojekt der Teilchenphysik, dem geplanten *International Linear Collider* ILC. So beruht der ILC auf der supraleitenden Beschleunigertechnologie, die DESY und seine internationalen Partner entwickelt und getestet haben. Diese kommt auch bei zwei Anlagen für die Forschung mit Photonen zum Einsatz: dem Freie-Elektronen-Laser FLASH bei DESY sowie dem im Bau befindlichen Röntgenlaser European XFEL. Dies schafft wichtige Synergieeffekte, die DESY unter den am ILC beteiligten Forschungszentren auszeichnen.

Die DESY-Forscher am Standort Zeuthen sind vor allem in der Astroteilchenphysik aktiv. Im Rahmen großer internationaler Projekte nutzen sie verschiedene Himmelsboten – Neutrinos und hochenergetische Gammastrahlung –, um den Geheimnissen von Sternexplosionen, kosmischen Teilchenbeschleunigern oder dunkler Materie auf die Spur zu kommen. Dazu beteiligen sie sich am Neutrinoteleskop Ice Cube am Südpol sowie an den Entwicklungsarbeiten für das geplante Gammateleskop CTA.

„Die Teilchenphysik schafft die Verbindung zwischen der Welt des Allerkleinsten und des Allergrößten."

Ohne die entsprechende theoretische Untermauerung sind die besten Experimente nicht viel wert. DESY bildet einen der Grundpfeiler der theoretischen Teilchenphysik in Europa und weltweit. In Hamburg und Zeuthen erforschen die Theoriegruppen bei DESY die Hintergründe, welche die Welt der kleinsten Teilchen und ihre physikalischen Gesetze erklären. Sie ergründen die vielfältigen Facetten des Standardmodells und streben darüber hinaus nach neuen Erkenntnissen, die das Modell in eine umfassende Theorie der Materie und Kräfte einbetten – Ideen, die für die Experimente am LHC und ILC von höchstem Interesse sind.

Als führendes Zentrum für Teilchenphysik in der Helmholtz-Gemeinschaft hat DESY im Jahr 2007 die Helmholtz-Allianz „Physik an der Teraskala" initiiert, die alle an LHC und ILC beteiligten deutschen Universitäten und Institute vereint. Ziel ist, das in Deutschland vorhandene Expertenwissen in der Teilchenphysik zu bündeln und langfristig zu stärken. In kurzer Zeit hat die Allianz zu einer deutlich verbesserten Vernetzung und weltweiten Sichtbarkeit der Teilchenphysik in Deutschland geführt – was auch dazu beiträgt, die Position von DESY in der Spitzenriege der Teilchenphysik weiter zu festigen.

„Mit seiner 50-jährigen Erfolgsgeschichte in der Teilchenforschung und seinen einzigartigen Anlagen spielt DESY in der Teilchen- und Astroteilchenphysik eine maßgebliche Rolle. Die vielfältigen Aktivitäten von DESY tragen dazu bei, die Zukunft von DESY als eines der führenden Forschungszentren der Welt auf diesem Gebiet zu sichern und auszubauen."

Prof. Dr. Joachim Mnich
DESY-Direktor für den Bereich
Hochenergiephysik und Astroteilchenphysik

WELT BILD.

Die großen Rätsel des Universums

Im letzten Jahrhundert sind die Physiker in immer kleinere Dimensionen vorgedrungen. Das Standardmodell der Teilchenphysik beschreibt heute mit großem Erfolg die Grundbausteine unserer Welt und die Kräfte, die zwischen ihnen wirken. Dennoch lässt es zentrale Fragen offen. Woher kommt die Masse? Woraus besteht dunkle Materie? Was geschah nach dem Urknall? Gibt es Extradimensionen? Antworten dazu erhoffen sich die Physiker von den Experimenten an den großen Teilchenbeschleunigern LHC und ILC. Damit würden sie auf dem Weg zu einer umfassenden Weltformel (*Theory of Everything*) einen entscheidenden Schritt vorankommen.

Unser Universum entstand vor knapp 14 Milliarden Jahren in einer gewaltigen Explosion, dem Urknall.

Woher kommt die Masse?

Wie Teilchen überhaupt zu ihrer Masse kommen, ist eine gewichtige Frage. Im Standardmodell erlangen die Teilchen ihre Masse erst, indem sie mit einem so genannten Higgs-Feld wechselwirken. Soweit die Theorie. Gibt es dieses Feld, sollte es sich durch mit ihm verbundene Higgs-Teilchen verraten. Und nach denen wird fieberhaft gefahndet. Besonders gute Chancen auf diese sensationelle Entdeckung haben die Experimente am Protonenbeschleuniger LHC in Genf. Doch um den Mechanismus, der die Masse macht, wirklich aufzuklären, müssen die Eigenschaften des Higgs-Teilchens genau untersucht werden. Das ist die Stärke eines Elektron-Positron-Linearbeschleunigers wie des geplanten ILC.

Woraus besteht dunkle Materie?

Ein weiteres Rätsel geben uns astronomische Beobachtungen auf: Die gewöhnliche Materie, aus der wir und die für uns sichtbare Welt bestehen, macht tatsächlich nur vier Prozent des Universums aus. Die verbleibenden 96 Prozent bestehen wahrscheinlich aus der unbekannten dunklen Materie und dunklen Energie. Die dunkle Materie ist äußerst schwer nachzuweisen und zu untersuchen, da sie nur schwach mit Materie wechselwirkt. Die dunkle Energie erscheint wie eine bisher völlig unbekannte Eigenschaft des Raumes – sie treibt den Kosmos immer schneller aus-

einander. Die Natur von dunkler Materie und dunkler Energie aufzuklären, ist eine der größten Herausforderungen der modernen Teilchenphysik und Kosmologie.

Was geschah nach dem Urknall?

Wir leben in einer Welt aus Materie. Beim Urknall sollten Materie und Antimaterie eigentlich in gleichen Mengen entstanden sein. Da sich beide aber in einem Energieblitz vernichten, wenn sie aufeinandertreffen, muss ursprünglich mehr Materie als Antimaterie im Universum vorhanden gewesen sein – sonst würde es uns und unsere Materiewelt nicht geben. Offensichtlich hat die Natur der Materie gegenüber der Antimaterie den Vorzug gegeben – aber warum?

Heutzutage besteht herkömmliche Materie aus Atomen, deren Kern aus Protonen und Neutronen aufgebaut ist. Diese sind wiederum aus Quarks zusammengesetzt, die von Gluonen zusammengehalten werden. Unmittelbar nach dem Urknall war das Universum jedoch so heiß und energiegeladen, dass die Gluonen die Quarks nicht aneinander binden konnten. Stattdessen war das Universum während der ersten Mikrosekunden nach dem Urknall wahrscheinlich mit einer Art kosmischen Ursuppe gefüllt, einem unvorstellbar heißen und dichten Gemisch aus Quarks, Gluonen und anderen Elementarteilchen. Ein so genanntes Quark-Gluon-Plasma zu erzeugen und seine Eigenschaften zu messen, würde nicht nur ein neues Licht auf die zwischen den Quarks wirkende starke Kraft werfen, sondern auch die Frage beantworten, warum sich im jungen Kosmos überhaupt Sterne und Galaxien bilden konnten.

Gibt es Extradimensionen?

Existiert unser Universum womöglich in mehr als drei Raumdimensionen? Diese Idee ist nicht nur eine Spekulation von Science-Fiction-Autoren. Einige Theorien, die über das Standardmodell hinausführen, zum Beispiel die Stringtheorie, postulieren, dass unser Universum neben den uns bekannten noch zusätzliche Raumdimensionen besitzt, die uns nur bisher verborgen geblieben sind. Bei sehr hohen Energien ließen sich solche Extradimensionen möglicherweise experimentell nachweisen. ●

Die Grundbausteine der Welt

Das Standardmodell der Teilchenphysik beschreibt den Aufbau unserer Welt aus zwölf Materieteilchen: sechs Quarks und sechs Leptonen. Sie treten in drei Familien zu jeweils zwei Quarks und zwei Leptonen auf. Die uns bekannte gewöhnliche Materie besteht ausschließlich aus Teilchen der ersten Familie: den up- und down-Quarks, aus denen alle Atomkerne zusammengesetzt sind, und den Elektronen, die zu den Leptonen der ersten Familie gehören. Die Teilchen der anderen Familien existierten nur im Frühstadium des Universums. Sie können heute in Beschleunigern erzeugt werden, sind jedoch allesamt instabil, d.h., sie „leben“ nur sehr kurz, bevor sie zerfallen.

Zu jedem der zwölf Teilchen gibt es ein entsprechendes Antiteilchen, zum Elektron beispielsweise das Positron. Das Higgs-Teilchen (H) ist für die Masse der Teilchen verantwortlich. Die Materieteilchen werden von drei Kräften zusammengehalten: der elektromagnetischen, der starken und der schwachen Kraft. Die vierte bekannte Kraft, die Gravitation, lässt sich im Rahmen des Standardmodells bislang nicht beschreiben.

WELT FORSCHUNG.

DESY
Ein internationales Zentrum der Teilchenphysik

Die großen Fragen nach dem Ursprung und der Beschaffenheit unseres Universums beschäftigen Wissenschaftler weltweit. Sie sind nur zu lösen, wenn alle Kräfte in nationalen und internationalen Forschungsnetzwerken gebündelt werden. Beim Teilchenphysik-Forschungszentrum DESY hat diese Vernetzung – über politische und kulturelle Grenzen hinweg – seit langem Tradition.

Teilchenphysik goes global

Der Bau des HERA-Beschleunigers bei DESY in den 1980er Jahren war ein Paradebeispiel für erfolgreiche internationale Zusammenarbeit: Insgesamt elf Länder trugen dazu bei – ein Novum in der Geschichte der Teilchenforschung. Bis dahin wurden die Detektoren zwar in internationaler Zusammenarbeit gebaut, der Beschleuniger war jedoch Aufgabe des Gastgeberinstituts. Das internationale Interesse an HERA dagegen war so groß, dass der Beschleuniger zu über 20 Prozent aus dem Ausland finanziert wurde, die vier HERA-Experimente, die auch weiterhin von großen internationalen Teams von Physikern aus aller Welt betrieben wurden, zu etwa 60 Prozent. Dieses „HERA-Modell“ der internationalen Zusammenarbeit funktionierte so gut, dass es zum Vorbild für die Durchführung großer, internationaler Forschungsprojekte wurde.

Auch nach der Abschaltung von HERA kommt DESY diese langjährige internationale Einbindung zugute. Ähnlich wie in der Astronomie, wo Forscher aus aller Welt mit einigen wenigen, in internationaler Zusammenarbeit gebauten und betriebenen Teleskopen arbeiten, verschiebt sich der Schwerpunkt in der Teilchenphysik hin zu einigen wenigen Großgeräten, die nicht mehr von einem Land alleine getragen werden können, sondern nur noch in breit aufgestellter internationaler Zusammenarbeit zu realisieren sind. Die Teilchenphysiker bei DESY bringen ihr Wissen nun bei einer Reihe solcher großer internationaler Anlagen ein: den Teilchenbeschleunigern LHC und ILC, dem Neutrinoteleskop IceCube sowie dem Gammateleskop CTA. Dabei entstehen neue Formen der Zusammenarbeit auf nationaler und internationaler Ebene.

Helmholtz-Allianz „Physik an der Teraskala“

Unter der Federführung von DESY haben sich alle deutschen Universitäten und Institute, die am LHC und ILC mitarbeiten, zu einer Helmholtz-Allianz zusammengeschlossen. Gemeinsam wollen die Partner der Allianz „Physik an der Teraskala“ das in Deutschland vorhandene Expertenwissen in der Teilchenphysik bündeln und langfristig stärken. Der Begriff „Teraskala“ bezieht sich dabei auf Energien von Tera-Elektronenvolt, also Billionen Elektronenvolt, die LHC und ILC erreichen sollen. In diesem Energiebereich erwarten die Teilchenphysiker entscheidende neue Entdeckungen.

In der Helmholtz-Allianz sollen insbesondere die über Deutschland verteilten Infrastrukturen der Teilchenphysik, wie z.B. Hochtechnologielabore oder Hochleistungscomputer, gebündelt und gemeinsam genutzt werden. Außerdem fördert die Allianz den wissenschaftlichen Nachwuchs und schafft zahlreiche neue Stellen. DESY bringt seine Stärken maßgeblich in den Verbund ein. Dazu gehören umfangreiches Know-how ebenso wie wichtige Infrastrukturen für die Entwicklung von Beschleunigern und Detektoren, umfassende Erfahrung mit der Analyse der physikalischen Daten sowie große Computing-Ressourcen. So entsteht bei DESY beispielsweise ein Zentrum für die Analyse von LHC-Daten.

Die fünf Teilchenphysik-Schwerpunkte bei DESY:

> HERA

Mit den am „Super-Elektronenmikroskop“ HERA aufgenommenen Daten enträtseln die Teilchenphysiker den Aufbau des Protons und die fundamentalen Naturkräfte. Fünfzehn Jahre lang prallten in dem Teilchenbeschleuniger HERA tief im Hamburger Untergrund Elektronen und Protonen aufeinander. Im Sommer 2007 endete die Datennahme an Deutschlands größtem Forschungsinstrument, das Physikgeschichte schrieb. Die bis ins nächste Jahrzehnt dauernde Auswertung der Messdaten wird ein umfassendes Gesamtbild des Protons und der darin wirkenden Kräfte offenbaren.

> LHC

DESY ist auch am derzeit leistungsfähigsten Beschleuniger der Welt mit dabei: dem neuen *Large Hadron Collider* LHC am CERN in Genf. Im LHC stoßen Protonen mit bislang unerreicht hohen Energien von 14 Tera-Elektronenvolt, also 14 Billionen Elektronenvolt zusammen. Damit wird der LHC den Physikern erlauben, weit in das Neuland der Teraskala vorzudringen: Von den Teilchenkollisionen am LHC erhoffen sich die Physiker Antworten auf eine ganze Reihe von offenen Fragen der gängigen Teilchentheorie. Als Grundlage für solche Entdeckungen sind die Erkenntnisse von HERA über das Proton unverzichtbar.

> ILC

Die Entdeckungen des LHC vervollständigen kann nur ein Elektron-Positron-Beschleuniger, dessen einzigartige Präzision es ermöglicht, die Geheimnisse der Teraskala in all ihren Facetten auszuleuchten. Ein solches großes Zukunftsprojekt ist der *International Linear Collider* ILC – ein Linearbeschleuniger, in dem Elektronen und ihre Antiteilchen, die Positronen, mit Energien von 500 bis etwa 1000 Milliarden Elektronenvolt kollidieren. DESY beteiligt sich maßgeblich an diesem Beschleuniger der Zukunft. So basiert das Konzept des ILC auf der bei DESY entwickelten supraleitenden Beschleunigertechnologie.

> IceCube und CTA

Am Standort Zeuthen ist DESY in der Astroteilchenphysik aktiv. Die DESY-Forscher nutzen verschiedene Botenteilchen aus dem Kosmos, um den Geheimnissen von Sternexplosionen, kosmischen Teilchenbeschleunigern oder dunkler Materie auf die Spur zu kommen. DESY beteiligt sich insbesondere an dem internationalen Neutrinoteleskop IceCube – dem größten Teilchendetektor der Welt, der tief im Eis des Südpols eingeschmolzen ist. Zukünftig werden die Wissenschaftler zudem mit dem geplanten Gammateleskop CTA auf die Jagd nach hochenergetischer elektromagnetischer Strahlung aus dem Weltraum gehen.

> Theorie

Die theoretische Teilchenphysik ergründet das große Bild, das den experimentellen Ergebnissen zugrunde liegt. Um die Welt der kleinsten Teilchen und ihre physikalischen Gesetze zu erklären, nutzen die Theoretiker bei DESY zahlreiche mathematische Hilfsmittel und speziell entwickelte Höchstleistungsrechner. Nur gemeinsam sind Theoretiker und Experimentalphysiker in der Lage, der Natur ihre Geheimnisse abzuringen und – so die Hoffnung der Forscher – nach und nach eine umfassende Theorie aller Teilchen und Kräfte auszuarbeiten.

So komplexe und aufwändige Unterfangen wie die heutigen Teilchenphysik-Experimente lassen sich nur noch in breit aufgestellter internationaler Zusammenarbeit realisieren.

WEG WEISER.

HERA
Das Super-Elektronenmikroskop

Die Hadron-Elektron-Ring-Anlage HERA war der größte Teilchenbeschleuniger bei DESY und zugleich Deutschlands größtes Forschungsinstrument: ein riesiges Super-Elektronenmikroskop, das den Physikern den weltweit schärfsten Blick ins Proton eröffnete. Fünfzehn Jahre lang prallten in dem kreisrunden Teilchenbeschleuniger tief im Hamburger Untergrund Elektronen und Protonen bei höchsten Energien aufeinander. Im Sommer 2007 wurde der Forschungsbetrieb beendet und HERA abgeschaltet. Doch die Auswertung der aufgezeichneten Daten ist weiterhin in vollem Gang, sie wird bis weit ins nächste Jahrzehnt hinein andauernd. Es bleibt also spannend, denn was die HERA-Physiker nun vervollkommnen, ist ein umfassendes Gesamtbild des Protons und der darin wirkenden Kräfte – in einer Präzision, die über Jahre hinweg von keinem Beschleuniger der Welt übertroffen werden kann.

Präzisionsmaschine HERA

Der Speicherring HERA bei DESY war der einzige Beschleuniger weltweit, in dem zwei unterschiedliche Teilchensorten getrennt beschleunigt und zum Zusammenstoß gebracht wurden. In einem 6,3 Kilometer langen Tunnel tief unter Hamburg kollidierten die leichten Elektronen – bzw. ihre Antiteilchen, die Positronen – mit den fast 2000-mal schwereren Wasserstoffkerne, die Protonen aus der Familie der Hadronen. In solchen Elektron-Proton-Kollisionen wirkt das punktförmige Elektron wie eine winzige Sonde, die das Innere des Protons abtastet und sichtbar macht. Je höher die Energie beim Zusammenstoß der Teilchen ist, desto tiefer können die Physiker in das Proton hineinblicken, desto schärfer können sie die Details erkennen. Daher auch die Bezeichnung „Super-Elektronenmikroskop“: Dank der hochpräzisen „Elektronen-Sonden“ von HERA können die Teilchenphysiker den inneren Aufbau des Protons und die fundamentalen Naturkräfte genau erforschen.

Bild einer Teilchenkollision: Dieses Ereignis registrierte der ZEUS-Detektor beim Zusammenstoß eines Protons und eines Positrons (Antiteilchen vom Elektron). Gemessen wurden die Richtung der Spuren und die Energie der Teilchen.

HERAs scharfe Augen

Vier große unterirdische Hallen gibt es am HERA-Speicherring – in jeder Himmelsrichtung eine. Sieben Stockwerke tief unter der Erde standen hier die Detektoren, mit denen die interna-

tionalen Forscherteams die kleinsten Bausteine der Materie untersuchten. 1992 gingen die ersten zwei Experimente an HERA in Betrieb: H1 in der HERA-Halle Nord und ZEUS im Süden. Beide Experimente beobachteten die hochenergetischen Zusammenstöße von Elektronen und Protonen, die Aufschluss über das Innenleben des Protons und die Grundkräfte der Natur geben. In der Halle Ost stand ab 1995 das Experiment HERMES, das den Elektronenstrahl von HERA benutzte, um dem Eigendrehimpuls – dem Spin – der Protonen und Neutronen auf die Spur zu kommen. Im Westen der Anlage machte sich HERA-B von 1999 bis 2003 den Protonenstrahl des Speicherrings zunutze, um die physikalischen Geheimnisse schwerer Quarks zu lüften.

Einzigartige Einsichten

Bis Mitte 2007 waren die haushohen Nachweisgeräte in Betrieb und haben riesige Datenmengen aufgezeichnet. In dieser Zeit haben viele der mit HERA gewonnenen Erkenntnisse Eingang in die Lehrbücher gefunden. Heute gehören sie zum Grundlagenwissen über den Aufbau unserer Welt. Doch damit ist noch lange nicht Schluss. Zwar ist die aktive Datennahme beendet, doch die HERA-Experimente laufen weiter: Die Auswertung der aufgezeichneten Messdaten wird bis weit über 2010 hinaus einzigartige Einsichten in das Innenleben des Protons und die Natur der fundamentalen Kräfte liefern.

Damit wird sich den HERA-Physikern schließlich ein globales Bild des Protons offenbaren, eine umfassende experimentelle Beschreibung des Protons, wie es sie in dieser Präzision und Vielseitigkeit noch nie gab – und die aufgrund der Einzigartigkeit von HERA über Jahre und womöglich Jahrzehnte unangefochten Bestand haben wird.

HERA: Hadron-Elektron-Ring-Anlage

Elektron-Proton-Speicherringanlage bei DESY in Hamburg
Forschungsbetrieb: 1992 bis 2007
Auswertung der gesammelten Daten: bis über 2010 hinaus
Länge: 6336 m
Energie der Elektronen: 27,5 Giga-Elektronenvolt (GeV)
Energie der Protonen: 920 Giga-Elektronenvolt (GeV)
longitudinal polarisierter Elektronenstrahl
Experimente: H1, ZEUS, HERMES, HERA-B

- Elektron-Proton-Kollisionsexperimente H1 und ZEUS
  Entschlüsselung der inneren Strukturen des Protons
  Erweiterung des Verständnisses der fundamentalen Kräfte
  Suche nach neuen Formen der Materie
  Suche nach in der Teilchenphysik unerwarteten Phänomenen
- H1-Experiment
  Datennahme: 1992-2007; HERA-Halle Nord
  Universaldetektor: 12 m x 10 m x 15 m; 2800 Tonnen
- ZEUS-Experiment
  Datennahme: 1992-2007; HERA-Halle Süd
  Universaldetektor: 12 m x 11 m x 20 m; 3600 Tonnen

- Strahl-Target-Experiment HERMES
  Untersuchung der Herkunft des Spins der Nukleonen
  Nutzung des longitudinal polarisierten Elektronenstrahls
  Datennahme: 1995-2007; HERA-Halle Ost
  Detektor: 3,50 m x 8 m x 5 m; 400 Tonnen

- Strahl-Target-Experiment HERA-B
  Untersuchung der Eigenschaften schwerer Quarks
  Nutzung des Protonenstrahls
  Datennahme: 1999-2003; HERA-Halle West
  Detektor: 8 m x 20 m x 9 m; 1000 Tonnen

H1 UND ZEUS.

Teilchen auf Kollisionskurs

Winzige Sonden

Die Kollisionsexperimente H1 und ZEUS nahmen von 1992 bis 2007 Daten. Dazu prallten die in HERA kreisenden Elektronen in der Mitte der Detektoren frontal auf die ihnen entgegen fliegenden Protonen. Bei diesem Zusammenstoß wirkt das punktförmige Elektron wie eine winzige Sonde, die das Innere des Protons abtastet: Es dringt in das Proton ein, trifft dort auf einen von dessen Bausteinen – ein Quark – und kommuniziert mit diesem über den Austausch eines Kraftteilchens. Das Quark wird dabei aus dem Proton herausgeschlagen; es bildet sich ein ganzes Bündel neuer Teilchen, die zusammen mit dem Elektron in alle Richtungen auseinanderfliegen. Aus den Spuren, welche die Teilchen in den Detektoren hinterlassen, lassen sich Rückschlüsse darauf ziehen, was im Inneren des Protons im Detail passiert. Hierbei geht es nicht nur um die einzelnen Bestandteile des Protons, sondern auch um die Grundkräfte der Natur, die zwischen den Teilchen wirken. Die dafür verfügbare Energie war bei HERA etwa zehnmal größer als bei früheren, ähnlichen Experimenten – damit bot das Super-Elektronenmikroskop HERA den Physikern den weltweit schärfsten Blick ins Proton.

Quark-Gluon-Suppe

Ihre Hauptaufgabe, hoch aufgelöste „Bilder“ vom Inneren des Protons zu liefern, hat HERA glänzend erfüllt. Bereits in der ersten Betriebsphase offenbarten sich den HERA-Experimenten H1 und ZEUS völlig neue Einsichten in die Tiefen des Protons. Vor gut 30 Jahren entdeckten die Physiker, dass das Proton aus drei Quarks besteht. Die Quarks werden von der starken Kraft zusammengehalten. Die Botenteilchen dieser Kraft, die Gluonen, fand man 1979 bei DESY. Als HERA 1992 an den Start ging, war zwar bekannt, dass die Quarks im Proton Gluonen aussenden und dass diese wiederum Gluonen oder Paare von Quarks und Antiquarks erzeugen. Darüber hinaus hatte man jedoch nur vage Vorstellungen davon, was im Proton zu erwarten war. Meist ging man davon aus, dass sich neben den drei Valenzquarks, die für die Ladung des Protons verantwortlich sind, nur wenige Quark-Antiquark-Paare und Gluonen im Proton befinden.

Wie die HERA-Experimente H1 und ZEUS entdeckten, geht es im Proton vielmehr äußerst turbulent zu. Dank der hohen Energie von HERA konnten H1 und ZEUS die Strukturfunktion F_2 des Protons – eine Funktion, die Aufschluss über die Verteilung der Quarks und Antiquarks im Proton gibt – in einem bis zu tausendmal weiteren Bereich messen, als früheren Experimenten zugänglich war. Was sich den Physikern dabei

offenbarte, war eine große Überraschung: Wie die HERA-Messungen zeigen, gleicht das Innere des Protons eher einer dichten, brodelnden Suppe, in der Gluonen und Quark-Antiquark-Paare unaufhörlich abgestrahlt und wieder vernichtet werden. Je genauer man hinschaut, desto mehr Teilchen scheint es im Proton zu geben. Diese hohe Dichte der Gluonen und Quarks im Proton, die zu kleinen Impulsanteilen der Quarks und Gluonen hin immer mehr ansteigt, stellte einen völlig neuen, bis dahin noch nicht untersuchten Zustand der starken Kraft dar. Wie dieser zustande kommt, versuchen Theoretiker und Experimentalphysiker gemeinsam herauszufinden.

Der „See“ aus kurzlebigen Quark-Antiquark-Paaren im Proton enthält nicht nur leichte up-, down- und strange-Quarks: Dank der hohen Auflösung in der zweiten Betriebsphase von HERA konnten die HERA-Physiker im Proton erstmals auch die schweren charm- und bottom-Quarks nachweisen und ihre Strukturfunktionen getrennt vermessen. Das genaue Verständnis der Erzeugungsmechanismen schwerer Quarks ist insbesondere für das Physikprogramm am LHC-Beschleuniger bei CERN eine wichtige Grundlage.

Die rätselhafte Diffraktion

Bald nach dem Start von HERA erwartete die Physiker eine weitere Überraschung: Bei Kollisionen mit höchsten Impulsüberträgen wird mit aller Wucht ein Quark aus dem Proton herausgeschlagen. Anstatt dabei auseinanderzubrechen und in eine Vielzahl neuer Teilchen zu zerbersten, bleibt das Proton in etwa 10 bis 15 Prozent der Fälle völlig intakt. Das ist ungefähr so, als hinterließen 15 Prozent aller Frontalzusammenstöße keine Schrammen an Autos! Bei kleinen Energien waren solche Phänomene bekannt und wurden mit den Mitteln der diffraktiven Physik beschrieben. Als Hilfsmittel diente dabei ein so genanntes Pomeron, ein hypothetisches neutrales Teilchen ohne große Struktur und besonderes Eigenleben mit den Quantenzahlen des Vakuums. Bei HERA zeigten frühe Messungen jedoch, dass sich das Bild dieses Pomerons einfach nicht halten ließ, bei großen Impulsüberträgen – im Bereich der harten Diffraktion – versagte es vollständig. Welcher Mechanismus führt also zu dieser merkwürdigen Beobachtung?

Im Rahmen der QCD, der Theorie der starken Kraft, müssen mindestens zwei Gluonen an der diffraktiven Wechselwirkung beteiligt sein, weil diese sonst nicht farbneutral sein könnte, wie es im Experiment beobachtet wird. Hat dieses Phänomen also womöglich mit dem hohen Anteil von Gluonen im Proton bei kleinen Impulsanteilen zu tun? Die Ergebnisse von H1 und ZEUS waren eindeutig: Der farbneutrale Austausch wird von Gluonen dominiert. Als Folge dieser Beobachtungen entwickelte sich eine ganze „Industrie“ zur Beschreibung der harten Diffraktion. Die Auswertungen und Interpretationsversuche sind immer noch im vollen Gang. Auch wenn es erste Erfolge gibt, sind die Ergebnisse noch nicht von Grund auf verstanden. Umso wichtiger ist es, die HERA-Daten in alle denkbaren Richtungen auszuwerten, um die theoretischen Interpretationen entsprechend überprüfen zu können.

Valenzquarks, Seequarks und Gluonen

Als Super-Elektronenmikroskop machte HERA den detaillierten Aufbau des Protons sichtbar. Im Proton gibt es drei Valenzquarks, die durch den Austausch von Gluonen aneinander gebunden sind. Die Quantentheorie erlaubt den Gluonen, sich für kurze Zeit in Quark-Antiquark-Paare zu verwandeln. Das Proton erhält somit neben den Valenzquarks und Gluonen einen ganzen „See“ aus kurzlebigen Quark-Antiquark-Paaren.

Impulsanteil und Impulsübertrag

- **Impulsanteil (x): Anteil des Protonenimpulses, den das Quark trägt, mit dem das Elektron zusammenstößt.**
- **Impulsübertrag (Q^2), auch Auflösungsparameter genannt: Quadrat des Impulses, der bei der Kollision zwischen den Stoßpartnern übertragen wird; ein Maß für die Auflösung des HERA-Mikroskops (Q^2 = 1 GeV^2 entspricht einer Auflösung von einem Fünftel des Protonenradius).**

Farbige Quarks

Im Standardmodell der Teilchenphysik wird die starke Kraft durch eine abstrakte Teilcheneigenschaft namens Farbladung verursacht. Quarks z.B. tragen die Farben rot, grün und blau, Antiquarks antirot, antigrün und antiblau. Beobachtet werden allerdings nur farbneutrale Verbände: Teilchen aus drei Quarks mit den drei Farben rot, grün und blau, wie z.B. das Proton, oder Quark-Antiquark-Kombinationen mit einer Farbe und der jeweiligen Antifarbe. Nur solche farblosen Verbände existieren als freie Teilchen – bisher wurde noch nie ein einzelnes farbiges Teilchen nachgewiesen.

Die Grundkräfte der Natur

Vier fundamentale Kräfte regieren die Welt: die Gravitation, die elektromagnetische, die schwache und die starke Kraft. Die Gravitation lässt den Apfel vom Baum fallen und die Planeten um die Sonne kreisen. Die elektromagnetische Kraft verbindet Elektronen und Protonen zu Atomen und sorgt für Strom aus der Steckdose. Die schwache Kraft ermöglicht die Kernfusion in der Sonne und den radioaktiven Zerfall von Atomkernen, und die starke Kraft hält Quarks und Gluonen im Proton sowie Protonen und Neutronen im Kern zusammen.

Die Kräfte (oder Wechselwirkungen) werden durch Austauschteilchen übertragen, die für jede Kraftart spezifisch sind: die elektromagnetische Kraft durch die als Lichtquanten bekannten Photonen; die schwache Kraft durch das neutrale Z-Teilchen, das negativ und das positiv geladene W-Teilchen; die zwischen Quarks wirkende starke Kraft durch die Gluonen; die Gravitation durch das masselose, allerdings noch nicht beobachtete Graviton.

Die Physiker vermuten, dass kurz nach dem Urknall, als das gesamte Universum ein winziger Feuerball von unvorstellbarer Energie war, nur eine einzige Urkraft das Geschehen beherrschte. Experimente an Teilchenbeschleunigern wie HERA untersuchen Kräfte und Teilchen mit höchster Genauigkeit, was den Physikern erlaubt, Rückschlüsse auf die Verhältnisse bei jenen extrem hohen Energien zu ziehen, bei denen sich die fundamentalen Kräfte zu einer Urkraft vereinen – und damit quasi das Geschehen kurz nach dem Urknall zu rekonstruieren.

HERA und der Nobelpreis

Anhand des „Mikrolabors Proton“ konnten die Experimente H1 und ZEUS auch die Eigenschaften der Naturkräfte genauer unter die Lupe nehmen. So konnten sie zum Beispiel präzise vermessen, wie stark die starke Kraft zwischen den Quarks wirklich ist. Eine besondere Eigenschaft dieser Kraft ist ihr ungewöhnliches Verhalten in Abhängigkeit des Abstands zwischen den Teilchen: Im Gegensatz zur elektromagnetischen Wechselwirkung, die bei zunehmendem Abstand immer schwächer wird, verhält es sich bei der starken Kraft genau andersherum. Je dichter zwei Quarks beieinander sind, desto freier bewegen sie sich; je weiter sie sich voneinander entfernen, desto stärker zieht die starke Kraft sie – wie ein Gummiband – wieder zusammen. Die Quarks sind also quasi im Proton eingesperrt, und niemand hat bisher ein freies Quark beobachtet.

Zwar wurde die starke Kopplungskonstante – ein Maß für die Stärke der Kraft – in Abhängigkeit vom Abstand auch von anderen Experimenten gemessen, doch konnten H1 und ZEUS das besondere Verhalten der Kopplungskonstanten erstmals über einen weiten Energiebereich hinweg durchgängig in einem einzelnen Experiment nachweisen. Damit bestätigten die HERA-Ergebnisse eindrucksvoll das 20 Jahre zuvor von den Physikern David Gross, David Politzer und Frank Wilczek vorhergesagte Verhalten der starken Kraft – eine Entdeckung, für die Gross, Politzer und Wilczek im Jahr 2004 mit dem Nobelpreis für Physik geehrt wurden.

Im Zentrum des H1-Detektors

Zurück zur Urkraft

Obwohl HERA vorrangig für die Untersuchung der starken Wechselwirkung ausgelegt war, lassen sich mit den hochenergetischen Elektron-Proton-Kollisionen auch die anderen Naturkräfte gezielt untersuchen. So konnten H1 und ZEUS eine zentrale Vorhersage der gängigen Teilchentheorie, des Standardmodells, glänzend bestätigen: Sie haben gezeigt, dass zwei der grundlegenden Naturkräfte nur verschiedene Erscheinungsformen einer Kraft sind. Die elektromagnetische Kraft und die schwache Kraft wirken normalerweise unterschiedlich stark. Bei niedrigen Energien ist die schwache Kraft – wie der Name schon verrät – wesentlich schwächer als die elektromagnetische. Bei den höchsten Energien der Teilchenzusammenstöße in HERA jedoch werden beide Kräfte gleich stark. Dieses Verhalten ist eine wichtige Eigenschaft der elektroschwachen Kraft, zu der sich die beiden Kräfte bei sehr hohen, im Labor unerreichbaren Energien vereinen. H1 und ZEUS beobachteten somit unmittelbar die Auswirkungen der elektroschwachen Vereinheitlichung – des ersten Schritts auf dem Weg zur großen Vereinheitlichung aller vier Grundkräfte der Natur.

Das Standardmodell auf dem Prüfstand

Nach dem Umbau zur Erhöhung der Luminosität in den Jahren 2000 bis 2001 konnten die HERA-Experimente in der zweiten Betriebsphase das hohe Auflösungsvermögen des Super-Elektronenmikroskops voll ausschöpfen. Denn eigentlich sind Teilchenkollisionen in dem Bereich höchster Impulsüberträge, also höchster Auflösung, vergleichsweise selten. Genau dort, an den bekannten Grenzen des Standardmodells, sollten sich jedoch neue Effekte jenseits der gängigen Teilchentheorie bemerkbar machen. Dank der gesteigerten Trefferrate gab es hier ebenfalls mehr Kollisionsereignisse, so dass die HERA-Physiker auch diesen Bereich statistisch untermauert mit hoher Genauigkeit ausloten können. Dabei zeigen sich bisher keine signifikanten Abweichungen vom Standardmodell – die HERA-Experimente können somit die Gültigkeitsgrenzen des Standardmodells weit hinausschieben und den möglichen Phasenraum für neue Phänomene, neue Teilchen oder Wechselwirkungen immer mehr einschränken. Dabei verfeinern sie die Kenntnis des Standardmodells immer weiter bis zu den höchsten Impulsüberträgen.

Unentbehrliche Grundlage für den LHC

Die Ergebnisse von HERA sind unverzichtbar, um die Messungen am *Large Hadron Collider* LHC in Genf korrekt interpretieren zu können: Im LHC stoßen Protonen bei einer Energie zusammen, die etwa 50 Mal höher ist als die bei HERA. Da Protonen nicht punktförmig sind, sondern vielmehr ausgedehnte, zusammengesetzte Teilchen, sind die Kollisionen im LHC äußerst komplex und damit theoretisch schwierig zu beschreiben. Es ist deshalb unerlässlich, den Eingangszustand der Kollisionen so präzise wie möglich zu kennen – und den liefern die HERA-Experimente mit ihrem detaillierten Bild des Protons.

Gerade für die Aufklärung des Higgs-Mechanismus sind Präzisionsmessungen der verschiedenen Dichten der Quarks und Gluonen im Proton äußerst wichtig. Viele dieser für den LHC grundlegenden Messungen konnten einzig und allein an HERA durchgeführt werden. Durch die verstärkte Zusammenarbeit von DESY und CERN in den letzten Betriebsjahren von HERA ist eine aktive, langfristige Verbindung zwischen den Forschern bei HERA und LHC entstanden, dank derer die Experimente am LHC auch im Licht der HERA-Erkenntnisse optimal vorbereitet werden können.

Eine Zeitreise an den Anfang des Universums: Die Skala zeigt das Alter des Universums vom Urknall bis heute sowie die entsprechende mittlere Energie von Strahlung und Materieteilchen.

HERMES.

Der richtige Dreh

Letzte Einstellarbeiten am Rückstoßdetektor des HERA-Experiments HERMES. Im Inneren dieses Detektors befindet sich eine mit Gas gefüllte Zelle, das Target. Der polarisierte Elektronenstrahl des HERA-Speicherrings durchquert diese Zelle (im Bild von vorne nach hinten) und stößt dabei mit den Atomen des Gases zusammen. Anhand dieser Teilchenreaktionen lässt sich herausfinden, wo der Spin der Nukleonen herkommt. Im Hintergrund schließt sich der Rest des HERMES-Detektors mit dem großen Spektrometermagneten an.

HERMES und das Spinrätsel

Ähnlich wie sich die Erde um sich selbst dreht, drehen sich auch die Teilchen im Kern von Atomen, die Nukleonen (Protonen und Neutronen): Sie besitzen einen Spin. Diese Eigenschaft gibt den Physikern Rätsel auf. Denn Mitte der 1980er Jahre fanden Experimente an den Forschungszentren CERN und SLAC heraus, dass die drei Hauptbestandteile der Nukleonen – die Valenzquarks – insgesamt nur etwa ein Drittel des Spins der Nukleonen liefern. Wo kommen die restlichen zwei Drittel her? Dies herauszufinden, ist Aufgabe des HERA-Experiments HERMES, das von 1995 bis 2007 Daten nahm. Mit Hilfe des HERMES-Detektors beobachteten die Physiker, wie die Elektronen des HERA-Speicherrings eine mit Gas gefüllte Zelle durchquerten und dabei mit den Atomen des Gases zusammenstießen. Sowohl die Elektronen von HERA als auch die Gas-Atome waren polarisiert, das heißt, ihr Spin zeigte in eine bestimmte Richtung. Da die Art und Häufigkeit der Zusammenstöße von dieser Polarisation abhängen, lässt sich anhand der beobachteten Teilchenreaktionen untersuchen, wo der Spin des Protons eigentlich herkommt.

Der Spin der Quarks

Inzwischen ist klar, dass man sich bei der Erklärung des Spins nicht auf die drei Valenzquarks beschränken darf. Denn Proton und Neutron sind zusätzlich mit einem ganzen See aus Quarks, Antiquarks und Gluonen gefüllt. Alle diese Teilchen haben einen Spin; alle bewegen sich und besitzen damit auch einen Bahndrehimpuls. Möchte man den Spin der Nukleonen wirklich verstehen, so muss man die Beiträge dieser brodelnden Masse einzeln bestimmen. Genau hierin liegt die Stärke von HERMES: Sein spezielles Konzept erlaubt es, die Beiträge der verschiedenen Sorten von Quarks getrennt zu vermessen.

Diese Aufgabe hat das HERMES-Experiment bereits in der ersten Betriebsphase von HERA brillant gemeistert. Anhand von Messungen an longitudinal polarisierten Gasen gelang es den HERMES-Physikern weltweit zum ersten Mal, die Beiträge der up-, down- und strange-Quarks zum Nukleonenspin getrennt voneinander zu bestimmen. Dabei stellte sich heraus, dass die Valenzquarks den größten Anteil beisteuern. Die up-Quarks leisten einen positiven Beitrag zum Gesamtspin, da ihr Spin vorzugsweise in Richtung des Nukleonenspins zeigt, die down-Quarks einen negativen Beitrag. Die Polarisation der Seequarks ist dagegen verschwindend gering – ein besonders wichtiges Ergebnis, da frühere Experimente von einem bedeutenden Beitrag der strange-Quarks ausgegangen waren, der die Beiträge der Valenzquarks teilweise aufheben sollte. Die HERMES-Ergebnisse zeigen nun, dass die Beiträge der Seequarks allesamt gering sind – für eine solche Aufhebung gibt es keinerlei Anzeichen. Die HERMES-Messungen beweisen, dass die Spins der Quarks weniger als die Hälfte des Nukleonenspins erzeugen, und dass dieser Beitrag hauptsächlich von den Valenzquarks herrührt. Damit gelang HERMES ein erster, entscheidender Schritt auf dem Weg zur Lösung des Spinrätsels.

Gluonenspin und Bahndrehimpulse

Nach der Untersuchung der Quarkspins richteten die HERMES-Physiker ihr Augenmerk auf den Spin der Gluonen und auf die Bahndrehimpulse der Quarks und Gluonen, die ebenfalls zum Nukleonenspin beitragen können. Dabei gelang ihnen eine der ersten Messungen mit dem direkten Hinweis, dass die Gluonen einen kleinen, aber positiven Beitrag zum Gesamtspin leisten – genaueres wird die Analyse der letzten Daten zutage fördern.

Der Bahndrehimpuls der Quarks im Nukleon entzog sich bis vor kurzem jeder experimentellen Überprüfung. Neueste theoretische Überlegungen haben jedoch Wege aufgezeigt, wie man diesen Beitrag tatsächlich bestimmen kann. In der zweiten Betriebsphase von HERA führten die HERMES-Physiker deshalb Messungen an transversal, also senkrecht zur Flugrichtung der Elektronen polarisierten Wasserstoffgasen durch, anhand derer sich diese letzten Aspekte des Spinrätsels erforschen lassen. So konnten sie eine erste, allerdings modellabhängige Berechnung des Gesamtbahndrehimpulses der up-Quarks vorstellen. Anhand von 2006–2007 durchgeführten Messungen mit einem neuen Rückstoßdetektor wird das HERMES-Team diese Ergebnisse verfeinern – in der Hoffnung, in naher Zukunft den Gesamtbahndrehimpuls der up-Quarks ermitteln zu können.

Die HERMES-Physiker konnten auch erstmals die so genannte Transversitätsverteilung bestimmen, welche die Differenz zwischen den Wahrscheinlichkeiten angibt, in einem transversal polarisierten Nukleon Quarks mit dem Spin in Richtung des Nukleonenspins und in entgegengesetzte Richtung zum Nukleonenspin zu finden. Ebenso erhielten sie Zugang zu einer Funktion, die die Verteilung unpolarisierter Quarks in einem transversal polarisierten Nukleon beschreibt. Diese Funktion sollte für Quarks ohne Bahndrehimpuls gleich null sein. Wie die Auswertung der ersten Daten zeigt, scheint diese Funktion deutlich positiv zu sein – ein Hinweis, dass die Quarks im Nukleon tatsächlich einen nicht verschwindenden Bahndrehimpuls besitzen.

Über das Spinrätsel hinaus

Zwar gilt das Hauptaugenmerk von HERMES dem Spin der Nukleonen, doch das gesamte Physikprogramm reicht weit darüber hinaus. So untersuchen die HERMES-Physiker anhand von Messungen an unpolarisierten Gasen, wie Hadronen – also Teilchen, die aus Quarks bestehen –, genau gebildet werden, wie sich Quarks in Kernmaterie fortbewegen oder ob es exotische Zustände aus fünf Quarks, so genannte Pentaquarks, gibt. Die Auswertung der bis Sommer 2007 aufgezeichneten Daten wird auch in diesen Bereichen neue und einmalige Einsichten ins Proton und die Wirkungsweise der starken Kraft liefern.

Blick in die Targetkammer von HERMES: Innovationen wie das gasförmige Target ermöglichen es dem HERMES-Team, die verschiedenen Beiträge zum Nukleonenspin einzeln aufzuschlüsseln.

WELT MASCHINE.

LHC
Der leistungsstärkste Beschleuniger der Welt

Im Jahr 2008 ging beim europäischen Forschungszentrum CERN in Genf die größte Maschine der Welt in Betrieb: der *Large Hadron Collider* LHC, ein gigantischer, ringförmiger Teilchenbeschleuniger mit 26,7 Kilometern Umfang. Bis zu 175 Meter tief unter dem Genfer Umland und dem französischen Jura stoßen hier Protonen oder schwere Ionen frontal aufeinander – bei den höchsten Energien, die je in einem Teilchenbeschleuniger erreicht wurden. Der LHC wirkt dabei wie eine Zeitmaschine, die es den Physikern ermöglicht, Milliarden von Jahren in die Vergangenheit zurückzublicken. Denn mit den hochenergetischen Teilchenzusammenstößen stellen sie im LHC die Bedingungen nach, die im Universum winzige Sekundenbruchteile nach dem Urknall herrschten. Auch die DESY-Physiker sind auf dieser aufregenden Reise an den Anfang unseres Kosmos dabei.

Vom Higgs-Teilchen zu Extradimensionen

Als das Flaggschiff der Teilchenphysik weltweit für die nächsten 15 bis 20 Jahre verspricht der LHC, unser Weltbild zu revolutionieren – vom Reich der kleinsten Teilchen bis zu den Weiten des Universums. Jahrzehntelang hat das Standardmodell der Teilchenphysik bei der Beschreibung der Gesetzmäßigkeiten der Natur hervorragende Dienste geleistet. Doch das Modell hat zahlreiche Lücken; es wirft Fragen auf, die eine umfassende Theorie der Bausteine und Kräfte im Universum eigentlich beantworten sollte. Wie kommen die Teilchen zu ihrer Masse? Gibt es das Higgs-Boson? Woraus bestehen die unbekannte dunkle Materie und dunkle Energie, die 96 Prozent des Universums ausmachen? Warum gibt es im Kosmos mehr Materie als Antimaterie? Wie sah das Universum in der ersten Sekunde nach dem Urknall aus? Gibt es mehr als drei Raumdimensionen, wie manche Theorien voraussetzen? Um diese Fragen zu klären und den Weg zu einer „Weltformel“ zu ebnen, benötigen die Physiker neue experimentelle Hinweise im Energiebereich der Teraskala – also bei wesentlich höheren Energien, als sie bisherige Teilchenbeschleuniger liefern konnten. Mit dem LHC dringen sie weit in dieses unbekannte Gebiet vor in der Hoffnung, eine ganze Reihe dieser Fragen endlich beantworten zu können.

Ein Gemeinschaftsprojekt der Superlative

Der LHC ist das komplizierteste Stück Technik, das die Menschheit jemals gebaut hat. Allein der Beschleuniger, dessen supraleitende Magnete mit Hilfe des größten Kühlsystems der Welt auf minus 271 Grad Celsius – etwa zwei Grad über dem absoluten Temperaturnullpunkt – gekühlt werden, ist eine technologische und logistische Meisterleistung. Die eine Milliarde Protonenkollisionen, die im LHC pro Sekunde stattfinden, werden von vier großen Detektoren – ATLAS, CMS, ALICE und LHCb – in riesigen unterirdischen Hallen rund um den Beschleunigerring aufgenommen und analysiert. Auch die Detektoren sind in ihrer Komplexität und schieren Größe atemberaubend. So sind an den Experimenten ATLAS und CMS jeweils über 2000 Wissenschaftler, Techniker und Ingenieure mehr als 37 Ländern beteiligt. ATLAS ist der größte Detektor, der je an einem Teilchenbeschleuniger realisiert wurde: Er ist 46 Meter lang, 25 Meter breit, 25 Meter hoch und wiegt 7000 Tonnen – damit ist er halb so groß wie die Kirche Notre-Dame in Paris. Der CMS-Detektor ist etwas kompakter, dafür bringt er stolze 12 500 Tonnen auf die Waage.

Während ATLAS und CMS als Vielzweckdetektoren konzipiert sind, mit denen ein möglichst breites Spektrum an physikalischen Fragestellungen untersucht werden kann, verfügen die beiden kleineren Experimente ALICE und LHCb über spezielle Detektoren, die auf die Untersuchung ganz bestimmter Fragen zugeschnitten sind. Auch sie werden von großen internationalen Teams von bis zu 1000 Wissenschaftlern aus aller Welt betrieben.

Der LHC-Beschleuniger mit den vier Experimentierhallen tief unter dem Umland von Genf

Deutschland – ein starker Partner

Auch deutsche Wissenschaftler sind maßgeblich in das Forschungsprogramm des LHC eingebunden: Insgesamt beteiligen sich Forschergruppen von 31 deutschen Universitäten und Fachhochschulen, zwei Max-Planck-Instituten und drei Helmholtz-Zentren – unter ihnen DESY – an den LHC-Experimenten. Auch die Helmholtz-Allianzen „Physik an der Teraskala“, die unter Federführung von DESY ins Leben gerufen wurde, sowie „Extreme Materie im Labor“ widmen sich der Physik am LHC. Der deutsche Anteil an der Finanzierung des gesamten CERN-Budgets liegt bei 20 Prozent; damit ist Deutschland der größte Beitragszahler. Zahlreiche deutsche Firmen haben Teile des LHC und der Detektoren gebaut.

LHC: Large Hadron Collider

Proton-Proton-Speicherring bei CERN in Genf
Kann alternativ mit schweren Ionen betrieben werden
Forschungsbetrieb: ab 2009
Länge: 26 659 m
Kollisionsenergie der Protonen: 14 Tera-Elektronenvolt (TeV)
Kollisionsenergie der Blei-Ionen: 1150 TeV
Experimente: ALICE, ATLAS, CMS, LHCb, LHCf, TOTEM

> ATLAS
Vielzweckdetektor für Proton-Proton-Kollisionen
46 m lang, 25 m hoch, 25 m breit; 7000 Tonnen
Beteiligung: über 2500 Wissenschaftler aus 37 Ländern

> CMS
Vielzweckdetektor für Proton-Proton-Kollisionen
21 m lang, 15 m hoch, 15 m breit; 12 500 Tonnen
Beteiligung: über 3600 Wissenschaftler aus 38 Ländern

> ALICE
Vielzweckdetektor, optimiert für Kollisionen von Schwerionen
26 m lang, 16 m hoch, 16 m breit; 10 000 Tonnen
Beteiligung: über 1000 Wissenschaftler aus 31 Ländern

> LHCb
Detektor für Proton-Proton-Kollisionen, spezialisiert auf die Messung von Teilchen mit bottom-Quarks
21 m lang, 10 m hoch, 13 m breit; 5600 Tonnen
Beteiligung: 700 Wissenschaftler aus 15 Ländern

REKORDHALTER.

Bahn frei für den LHC

Teilchen im Kreisverkehr

Am 10. September 2008 um 10:28 Uhr schossen die ersten Protonenpakete durchs Ziel: Der erste Teilchenstrahl hatte seine Runde durch den 27 Kilometer langen LHC-Beschleuniger im Genfer Untergrund absolviert. Auch DESY-Physiker sind bei der Inbetriebnahme des leistungsstärksten Beschleunigers aller Zeiten mit dabei. Die LHC-Crew profitiert dabei vom Know-how der HERA-Maschinengruppe, die das CERN-Team dank ihrer langjährigen Erfahrung mit dem Betrieb eines supraleitenden Protonenbeschleunigers unterstützt.

Der LHC-Beschleunigerring besteht aus supraleitenden Magneten, die die Protonen auf ihrer 27 Kilometer langen Kreisbahn halten, sowie aus Beschleunigungsstrukturen, in denen die Teilchen auf hohe Energien gebracht werden. Die Teilchen fliegen zu Strahlen gebündelt in gegenläufiger Richtung in zwei getrennten Strahlrohren, in denen ein ultrahohes Vakuum herrscht. Mehr als tausend Magnete unterschiedlicher Art und Größe führen die Teilchenstrahlen auf der Kreisbahn: 1232 jeweils 15 Meter lange und 30 Tonnen schwere Dipolmagnete lenken die Teilchen ab, 392 fünf bis sieben Meter lange Quadrupolmagnete bündeln die Strahlen. Die Spulen der Elektromagnete sind aus supraleitenden Kabeln gewickelt, durch die der Strom ohne Widerstand und damit ohne Energieverlust fließt. Dafür müssen die Magnete mit flüssigem Helium auf etwa minus 271 Grad Celsius heruntergekühlt werden – das ist kälter als im Weltraum. Die gesamte Steuerung des LHC und seiner Vorbeschleuniger ist im CERN-Kontrollzentrum untergebracht. Von dort aus werden die Teilchenstrahlen an vier Stellen des Beschleunigerrings zur Kollision gebracht. Dort stehen die großen Detektoren, mit denen die Kollisionen aufgezeichnet und analysiert werden.

Steckbrief CERN

CERN (*Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*), die Europäische Organisation für Kernforschung in Genf, ist das größte Zentrum für physikalische Grundlagenforschung der Welt.

- **Gründung: 1954**
- **20 Mitgliedsstaaten, Deutschland ist Gründungsmitglied**
- **Gesamtbudget 2007: rund 650 Millionen Euro, davon 20 Prozent aus Deutschland**
- **Gastwissenschaftler am CERN: mehr als 8000 aus 85 Nationen**
- **größter Beschleuniger: *Large Hadron Collider* LHC. Am LHC forschen fast 1000 deutsche Wissenschaftler.**

Der LHC – Ein Teilchenbeschleuniger der Superlative

> Die größte Maschine der Welt ...

Der *Large Hadron Collider* LHC bei CERN in Genf ist der leistungsfähigste Teilchenbeschleuniger der Welt. Sein Umfang beträgt 26 659 Meter. Der Beschleuniger beinhaltet insgesamt 9300 Magnete. Das Kühlsystem des LHC ist der größte Kühlschrank der Welt. Alle Magnete im LHC werden mit 10 080 Tonnen flüssigem Stickstoff auf -193°C (80 K) vorgekühlt, bevor sie mit etwa 60 Tonnen flüssigem Helium gefüllt und anschließend auf -271,3°C (1,9 K) heruntergekühlt werden.

> Die schnellste Protonenrennbahn auf unserem Planeten ...

Läuft der LHC mit Höchstleistung, rasen die Protonen 11 245 Mal pro Sekunde durch den Beschleunigerring und erreichen dabei 99,999999 Prozent der Lichtgeschwindigkeit. Zwei Protonenstrahlen kreisen mit einer maximalen Energie von 7 Tera-Elektronenvolt (TeV) und prallen mit 14 TeV aufeinander. Insgesamt wird es pro Sekunde bis zu einer Milliarde Proton-Proton-Kollisionen geben, mehr als je zuvor an einem Teilchenbeschleuniger erreicht wurden.

> Der leerste Raum im Sonnensystem ...

Damit die Teilchenstrahlen im LHC-Beschleuniger nicht mit Gasatomen zusammenprallen, fliegen sie in den beiden Strahlrohren in einem ultrahohen Vakuum. Diese Rohre sind so leer wie interplanetarer Raum. Der Innendruck im LHC beträgt 10^{-13} atm, das ist zehnmal geringer als der Druck auf dem Mond.

> Der heißeste Ort der Galaxis, aber noch kälter als das All ...

Der LHC ist eine Maschine der Extreme von Heiß und Kalt. Wenn zwei Protonenstrahlen kollidieren, erzeugen sie Temperaturen, die 1 000 000 000 Mal höher sind als die im Innern der Sonne, allerdings konzentriert auf allerkleinstem Raum. Im Gegensatz dazu sind die umgebenden Magnete kälter als das All.

> Die größten und modernsten Detektoren, die je gebaut wurden ...

Damit die bis zu einer Milliarde Protonenkollisionen pro Sekunde erfasst und gespeichert werden können, haben Physiker und Ingenieure gewaltige Geräte gebaut, deren hochentwickelte elektronische Systeme die Flugbahnen der Teilchen mit einer Präzision von wenigen tausendstel Millimetern messen. Die Teilchendichten, die in den Kollisionen am LHC auftreten, übertreffen alles bisher Dagewesene. Aus diesem Grund mussten die Detektoren mit sehr hoher Auflösung gebaut werden. Auch die Anzahl der auszulesenden Kanäle, über die die Informationen aus den Detektoren nach außen geleitet werden, übertrifft die Größe bestehender Systeme um ein Vielfaches.

> Der leistungsstärkste Supercomputer ...

Die Daten, die von den LHC-Detektoren aufgezeichnet werden, würden jährlich mehrere hunderttausend DVDs füllen. In den kommenden Jahren werden tausende von Physikern überall auf der Welt diese Daten auswerten und analysieren. Um dies zu ermöglichen, sind zehntausende Computer auf der ganzen Welt in einem Computernetzwerk, dem Grid, zusammengeschaltet. Obwohl das Grid für den LHC entwickelt wurde, kann es auch in anderen Wissenschaftsbereichen eingesetzt werden, in denen große Datenmengen verarbeitet werden müssen.

Start des LHC am 10. September 2008

ATLAS UND CMS.

Die Universaldetektoren

Zwei Giganten für die Forschung

Die DESY-Physiker beteiligen sich insbesondere an den beiden größten LHC-Experimenten, ATLAS und CMS. Diese sind als Universaldetektoren konzipiert, mit denen ein möglichst breites Spektrum von physikalischen Fragestellungen erforscht werden kann. So erhoffen sich die Forscher von ATLAS und CMS Antworten auf einige der zentralen offenen Fragen in unserem Weltbild (siehe S. 8 und 48): Ist der Higgs-Mechanismus dafür verantwortlich, dass Teilchen eine Masse haben? Gibt es zu jedem Teilchen des Standardmodells ein supersymmetrisches Partnerteilchen? Besteht die dunkle Materie im Universum aus solchen Superpartnern? Existiert unser Universum womöglich in mehr als drei Raumdimensionen?

ATLAS und CMS verfolgen die gleichen physikalischen Ziele – sie fahnden nach dem Higgs-Teilchen, nach supersymmetrischen Teilchen und nach Extradimensionen des Universums. Dazu messen sie die Spuren, Energie und Identität der Teilchen, die bei den Kollisionen im LHC entstehen. In der technischen Umsetzung ihrer Komponenten und insbesondere dem Aufbau ihrer Magnetsysteme unterscheiden sich die beiden Detektoren jedoch völlig. Damit sind ATLAS und CMS unabhängig voneinander und können ihre Ergebnisse gegenseitig überprüfen – was für die Bestätigung von neuen Entdeckungen unerlässlich ist.

ATLAS – A Toroidal LHC ApparatuS

Mit seinen gewaltigen Abmessungen von 46 Metern Länge und 25 Metern Breite und Höhe ist ATLAS der größte Detektor, der je an einem Teilchenbeschleuniger gebaut wurde. Er ist in drei Bereiche gegliedert. Der innere Detektor dient der Messung von Teilchenspuren. In der Mitte befinden sich Kalorimeter zur Bestimmung der Energie der Teilchen. Außen schließen sich so genannte Myonkammern an, mit denen Myonen, die schweren Verwandten der Elektronen, aufgespürt werden. Hauptmerkmal des ATLAS-Detektors ist sein gewaltiges Magnetsystem. Es besteht aus acht 25 Meter langen supraleitenden Magnetspulen, die zylinderförmig um das Strahlrohr in der Mitte des Detektors angeordnet sind. Innerhalb dieses zylindrischen Raums wird ein homogenes magnetisches Feld erzeugt, in dem die in den Kollisionen erzeugten Teilchen abgelenkt werden. ATLAS ist der größte der vier LHC-Detektoren, wiegt allerdings nur knapp halb so viel wie CMS.

CMS – Compact Muon Solenoid

Wie der Name schon verrät, ist der CMS-Detektor kompakter und damit deutlich kleiner als ATLAS. In seinem Inneren befindet sich ein großer Solenoidmagnet, dessen zylindrische Spule aus supraleitendem Kabel die zentralen Komponenten des Detektors umschließt. Die vom Kollisionspunkt davonfliegenden Teilchen treffen zunächst auf einen Spurdetektor aus Silizium und dann auf die Kalorimeter, in denen ihre Energie gemessen wird. Das enorme Gewicht des Detektors – 12 500 Tonnen – entsteht vor allem durch das massive

Der LHC-Detektor ATLAS im Aufbau

Der LHC-Detektor CMS im Aufbau

Stahljoch des Magneten. Es besteht aus drei Ringen, deren Zwischenräume mit gasgefüllten Myonkammern bestückt sind. Der Nachweis dieser Teilchen ist ein Schwerpunkt des Experiments. Im Gegensatz zu den anderen LHC-Detektoren wurde CMS nicht direkt an seinem unterirdischen Standort, sondern an der Oberfläche gebaut. Anschließend wurde der Detektor, der aus elf einzelnen Scheiben besteht, in die unterirdische Halle hinabgelassen und dort endgültig zusammengebaut.

DESY-Beteiligung am LHC

Seit 2006 sind DESY-Gruppen aus Hamburg und Zeuthen am LHC und speziell an den Experimenten ATLAS und CMS beteiligt. Sie leisten wesentliche Beiträge zu den Detektoren, aber auch zur Rechnerinfrastruktur für die Datenauswertung und zur Inbetriebnahme des LHC-Beschleunigers selbst. Ein bedeutender Beitrag von DESY ist zum Beispiel die Einrichtung eines Rechenzentrums für ATLAS, CMS und seit neuestem auch LHCb im Rahmen des weltumspannenden Computernetzwerks zur Verarbeitung der LHC-Daten, des LHC *Computing Grid* (LCG) (siehe S. 28). DESY betreibt dazu ein so genanntes Tier-2-Zentrum, dessen große Rechen- und Speichersysteme Wissenschaftlern aus aller Welt für die Analyse der LHC-Daten zur Verfügung stehen. Eng an das Tier-2-Zentrum angebunden ist auch die *National Analysis Facility* bei DESY, ein Rechnerkomplex, der allen deutschen, an LHC und ILC beteiligten Forschergruppen im Rahmen der Helmholtz-Allianz „Physik an der Teraskala“ Computerressourcen für die Physikanalyse zur Verfügung stellt – insbesondere auch der Daten von ATLAS, CMS und LHCb.

Die DESY-Forscher sind darüber hinaus sind an verschiedenen Aspekten der Experimente ATLAS und CMS beteiligt. Einige von ihnen besetzen wichtige Leitungsfunktionen im Top-Management der großen internationalen Teams von über 2000 Wissenschaftlern, Technikern und Ingenieuren, welche die Detektoren betreiben. Die DESY-Gruppen arbeiten an der Entwicklung, dem Aufbau und dem Betrieb von Detektorkomponenten mit, so zum Beispiel einem Luminositätsmonitor für ATLAS zur Messung der Kollisionsrate oder einem Kalorimeter für CMS, mit dem in Vorwärtsrichtung fliegende Teilchen nachgewiesen werden. Neben dem Aufbau des Grid-Computings zur Auswertung der LHC-Daten sind die DESY-Forscher auch an der Entwicklung von Softwarewerkzeugen für die Datennahme sowie für die Simulation, Rekonstruktion und Analyse der Kollisionen beteiligt. Ein weiterer Schwerpunkt sind Studien zur Physik am LHC. Einige Mitglieder der HERA-Maschinengruppe unterstützen zudem das LHC-Team bei der Inbetriebnahme des Beschleunigers.

Bei DESY entstehen außerdem Kontrollzentren, von denen aus der Betrieb und die Datennahme von ATLAS und CMS aus der Ferne überwacht werden sollen. Den Anfang machte das *CMS Centre DESY*, das im Oktober 2008 in Betrieb genommen wurde. Während die LHC-Experimente aus Sicherheitsgründen von Kontrollräumen vor Ort in der Nähe der Detektoren aus gesteuert werden, kann die Überwachung der Datennahme auch aus der Ferne erfolgen. Dabei wird vom CERN-Gelände, von Fermilab in Chicago und nun auch von DESY aus überprüft, ob die komplexen Detektoren so funktionieren, wie sie sollen. Über eine spezielle Audio- und Videoverbindung sind die Forscher in Genf, Chicago und Hamburg ständig in Kontakt. Dank dieser Kontrollzentren bei DESY können die an ATLAS und CMS beteiligten deutschen Forscher ihrerseits Schichten für die Datenkontrolle übernehmen, ohne dafür nach Genf reisen zu müssen.

ALICE UND LHCb.

Urknall und Antimaterie

ALICE – A Large Ion Collider Experiment

Mit dem ALICE-Experiment wollen die Physiker den Zustand der Materie unmittelbar nach dem Urknall untersuchen. Dazu wird der LHC-Beschleuniger nicht wie sonst mit Protonen, sondern mit Blei-Ionen betrieben, die mehr als 200 Mal schwerer sind als die Protonen. Bei diesen Kollisionen von Bleikernen im LHC werden Temperaturen erzeugt, die über 100 000 Mal höher sind als im Zentrum der Sonne.

Entsprechend der gängigen Teilchentheorie sollten sich die Quarks und Gluonen, aus denen zum Beispiel Protonen und Neutronen bestehen, bei so hohen Temperaturen und Dichten frei bewegen können, während sie bei niedrigeren Temperaturen in komplexen Teilchen wie den Protonen und Neutronen „eingesperrt“ sind und sich nicht voneinander lösen können. Bei den Kollisionen von Bleikernen im LHC werden deren Quarks und Gluonen freigesetzt; es entsteht ein Materiezustand, der wenige millionstel Sekunden nach dem Urknall existiert haben muss, als das Universum noch extrem heiß war: ein Quark-Gluon-Plasma. Die erzeugte Quark-Guon-Wolke dehnt sich sofort aus und kühlt sich dabei innerhalb von Sekundenbruchteilen bis zu der Temperatur ab, bei der sich die Quarks und Gluonen wieder zu herkömmlichen Materieteilchen zusammenschließen.

Mit Hilfe des ALICE-Detektors untersuchen die Wissenschaftler die Ausdehnung und Abkühlung des Quark-Gluon-Plasmas und beobachten, wie sich die Teilchen bilden, aus denen das Universum heute besteht. Sie versprechen sich davon Antworten auf zwei grundlegend wichtige, bisher noch offene Fragen zur starken Kraft: die Frage, warum die Quarks und Guonen stets in zusammengesetzten Teilchen eingesperrt sind und noch nie einzeln beobachtet wurden (siehe S. 51); und den Ursprung der Masse von Protonen und Neutronen. In der Tat ist zwar bekannt, dass Protonen und Neutronen aus drei Quarks bestehen. Addiert man jedoch die Massen dieser drei Quarks, so ergibt dies gerade mal ein Prozent der Masse von Proton oder Neutron. Wie die restlichen 99 Prozent zustande kommen, ist bisher ungeklärt. Womöglich ist der Mechanismus, der die Quarks und Gluonen im Proton einsperrt, auch für die Erzeugung des Großteils der Masse herkömmlicher Materie verantwortlich? Das ALICE-Experiment wird helfen, diese zentralen Fragen zu beantworten.

Der ALICE-Detektor am LHC im Aufbau

Der LHCb-Detektor im Aufbau

LHCb – Large Hadron Collider beauty

Mit dem LHCb-Experiment gehen die Forscher der Frage nach, warum im Universum die Materie gegenüber der Antimaterie überwiegt. Denn eigentlich sollte im Urknall genauso viel Materie wie Antimaterie entstanden sein. Da Materie und Antimaterie sich gegenseitig vernichten, wenn sie aufeinandertreffen, müssten sich beide letztlich vollständig ausgelöscht haben. Dies ist offensichtlich nicht der Fall. Es muss also winzige Unterschiede im Verhalten von Materie und Antimaterie geben, die dafür gesorgt haben, dass ein Bruchteil der Materie übriggeblieben ist – jener Teil, aus dem wir heute bestehen. Diese kleinen Unterschiede zwischen Materie und Antimaterie untersuchen die Physiker am LHCb-Experiment anhand von so genannten B-Hadronen, also Teilchen, die b-Quarks enthalten (das „b“ steht je nach Vorliebe für „beauty“ oder „bottom“).

Wie ATLAS und CMS fahndet auch LHCb nach neuen Teilchen, die schwerer sind als bisher bekannte Teilchen. Während ATLAS und CMS jedoch nach Teilchen suchen, die direkt in den Kollisionen entstehen, wendet LHCb eine andere Methode an. Neue Teilchen können nämlich auch indirekt produziert werden, als virtuelle Teilchen, die nur für extrem kurze Zeit im Rahmen einer quantenmechanischen Energieunschärfe existieren. Obwohl diese Teilchen so kurzlebig sind, haben sie einen Einfluss auf andere, beobachtbare Prozesse. So könnten solche Teilchen dazu führen, dass sich die Zerfallsraten von B-Hadronen und deren Antiteilchen unterscheiden. Nach solchen Unterschieden fahnden die Physiker mit LHCb.

Der Vorteil der indirekten Suche nach neuen Teilchen ist, dass bei gleichen Schwerpunktsenergien und gleicher Kollisionsrate Beiträge von Teilchen nachgewiesen werden können, deren Masse mehrfach so groß ist wie bei der direkten Suche. Voraussetzung ist allerdings, dass die untersuchten Zerfälle – hier von B-Hadronen – sehr präzise theoretisch vorhergesagt und vermessen werden. Nur wenn die Zerfallsraten, die das Standardmodell vorhersagt, genau bekannt sind, können die Wissenschaftler kleine Abweichungen in den Messergebissen als Zeichen für neue Phänomene interpretieren. Ob Supersymmetrie oder Extradimensionen – die Forscher bei LHCb erwarten, dass sich die neuen Teilchen als Abweichungen vom Standardmodell in den Präzisionsmessungen an B-Hadronen zu erkennen geben. Die indirekte Suche nach neuen Teilchen bei LHCb ergänzt damit die direkte Suche an den Universaldetektoren ATLAS und CMS.

NETZWERK.

Herausforderung Computertechnologie

Weltweites Computernetz

Der LHC erzeugt jährlich eine Datenmenge von etwa 15 Petabyte (15 Millionen Gigabyte). Das entspricht mehreren hunderttausend DVDs pro Jahr. Tausende Wissenschaftler auf der ganzen Welt werden diese Datenflut analysieren – eine enorme Herausforderung an Datenspeicherung und Rechenleistung. Um diese zu meistern, setzen die LHC-Erbauer auf das Konzept des Grid-Computing, bei dem weltweit verteilte Computer so zusammengeschlossen werden, dass sie von Nutzern aus aller Welt wie ein gewaltiger Supercomputer verwendet werden können. Die Daten der Experimente werden dabei nicht wie bisher an einem Ort gespeichert und verarbeitet, sondern auf mehrere Zentren mit ausreichender Speicherkapazität verteilt, von dort aus an verschiedene Einrichtungen und schließlich an die beteiligten Wissenschaftler weitergeleitet.

Am Aufbau dieses gigantischen Computernetzes, des *LHC Computing Grid* (LCG), sind in Zusammenarbeit mit CERN Rechenzentren auf der ganzen Welt beteiligt. Das Netzwerk besteht aus verschiedenen Ebenen, so genannten Tiers. Die vom LHC produzierten Rohdaten werden zunächst am CERN in Genf, dem Tier-0-Zentrum, auf Band gesichert. Nach einer ersten Bearbeitung werden diese Daten dann zur Speicherung und Rekonstruktion an elf internationale Tier-1-Zentren verteilt. Diese Zentren verfügen über eine ausreichende Speicherkapazität für große Datenmengen und sind rund um die Uhr über das Computernetz verbunden. Eines dieser Tier-1-Zentren ist das *Grid Computing Centre Karlsruhe* (GridKa) des Forschungszentrums Karlsruhe, das den mitteleuropäischen Hauptknoten des LCG bildet.

Die Tier-1-Zentren stellen die Daten wiederum den in der Grid-Hierarchie nachgeordneten Tier-2-Einrichtungen zur Verfügung, die aus einem oder mehreren miteinander verbundenen Rechenzentren bestehen. Diese Tier-2-Ressourcen stellen die entscheidende Ebene für die wissenschaftliche

Das CERN-Computerzentrum im März 2008

Analyse der Daten über Grid-Werkzeuge dar. DESY betreibt standortübergreifend in Hamburg und Zeuthen ein solches Tier-2-Zentrum, das große Rechen- und Speichersysteme für die LHC-Experimente ATLAS, CMS und LHCb zur Verfügung stellt. Es ist eines der größten unter den über 140 global verteilten Zentren und wird über das Grid von Forschergruppen auf der ganzen Welt genutzt. Die Wissenschaftler erhalten Zugang zum Rechnernetzwerk LCG über lokale Rechenzentren an ihren Instituten (Tier-3) oder über ihren Computer am Arbeitsplatz (Tier-4). Auf diese Weise können Forscher aus aller Welt die gespeicherten Daten mit der Rechenleistung des LCG auswerten und analysieren.

Analysezentrum bei DESY

Austausch und Zusammenarbeit innerhalb der Teilchenphysik in Deutschland zu fördern – das ist das erklärte Ziel des neuen Analysezentrums der Helmholtz-Allianz „Physik an der Teraskala“ bei DESY. Das Zentrum soll die Teilchenphysiker an den deutschen Universitäten bei der Datenanalyse der LHC-Experimente und den Vorbereitungen für den geplanten internationalen Linearbeschleuniger ILC unterstützen. Eine große Rolle spielt dabei die Ausbildung der Physikerinnen und Physiker von morgen: Das Analysezentrum unterstützt die Mitglieder der Allianz durch spezielle Ausbildungskurse, damit ihr Nachwuchs in der internationalen Forschungsgemeinschaft wettbewerbsfähig wird und bleibt. Zusätzlich zur Fortbildung in solchen Fachschulen können Nachwuchswissenschaftler ebenso wie erfahrene Physiker einen Teil ihrer Forschungszeit im Analysezentrum verbringen, um ihre Kenntnisse in bestimmten Bereichen zu vertiefen.

Eingebettet in das attraktive wissenschaftliche Umfeld bei DESY mit seiner hervorragenden Infrastruktur und hohen Expertendichte in Experimentalphysik und Theorie, bietet das Analysezentrum einen optimalen Service für die Allianz-Mitglieder, ihr wissenschaftliches Know-how zu erweitern. Zur Infrastruktur gehört auch die *National Analysis Facility*, ein Rechnerkomplex, der eng an das Tier-2-Zentrum des *LHC Computing Grid* bei DESY angebunden ist und allen Allianz-Mitgliedern Computerressourcen für die Physikanalyse zur Verfügung stellt. Neben dem Grid-Computing sowie der Detektor- und Beschleunigerentwicklung stellt das Analysezentrum bei DESY eine der zentralen Säulen der Helmholtz-Allianz „Physik an der Teraskala“ dar.

Technologietransfer

Viele Bereiche unseres Lebens kommen ohne Grundlagenforschung nicht aus. Medizin, Kommunikation, Umwelttechnik, Unterhaltungsindustrie – sie alle profitieren von den hochentwickelten Beschleunigern, Detektoren und Methoden der Teilchenphysik.

In der Grundlagenforschung geht es den Wissenschaftlern darum, neue Erkenntnisse zu gewinnen; Anwendungen stehen im Hintergrund. Doch oft brauchen sie für ihre Experimente so komplizierte Geräte oder Techniken, dass sie diese erst selbst entwickeln und bauen müssen. Viele dieser für die Grundlagenforschung neu entwickelten Technologien und Prozesse finden Anwendungen im täglichen Leben. Zum Beispiel wären viele medizinische Untersuchungen und Therapien ohne Entwicklungen aus der Teilchenphysik unmöglich. Oft wirken an den Entwicklungen für die Teilchenphysik auch Firmen mit, die die neuen Techniken in andere Bereiche übertragen und durch diese Innovationen neue Geschäftsfelder erschließen. Obwohl auch der LHC als reines Projekt der Grundlagenforschung gebaut wurde, kann er schon jetzt einige Produkte vorweisen, die inzwischen ihren Weg vom Labor ins tägliche Leben gefunden haben.

Außerdem sind Physiker in der freien Wirtschaft sehr beliebt. Sie können zielorientiert und analytisch denken und komplizierte Probleme kreativ und effizient lösen. Viele sprechen außerdem mehrere Sprachen und sind im internationalen Umfeld zu Hause – alles Fähigkeiten, die sie im Studium und bei der Arbeit in den internationalen Forscherteams gelernt haben. Am CERN und an anderen Forschungsinstituten und Universitäten in Deutschland und der ganzen Welt werden jedes Jahr tausende junger Menschen ausgebildet, die mit ihren in der Forschung erworbenen Kenntnissen und Fähigkeiten die Wirtschaft vorantreiben.

NEU LAND.

ILC
Das Zukunftsprojekt der Teilchenphysik

Während der Protonenbeschleuniger LHC die Tür zur Teraskala erstmals weit aufstößt und erste Einsichten in dieses absolute Neuland bietet, werden sich die großen Rätsel des Universums nur in Verbindung mit einer weiteren Präzisionsmaschine lösen lassen – einem Linearbeschleuniger, in dem Elektronen und ihre Antiteilchen, die Positronen, bei höchsten Energien zusammenstoßen. DESY beteiligt sich maßgeblich an der Entwicklung eines solchen Linearbeschleunigers, dem *International Linear Collider* ILC, der die Entdeckungen des LHC vervollständigen und die Geheimnisse der Teraskala im Detail offenbaren wird.

Rätselhaftes Universum

Im letzten Jahrhundert haben die Physiker die grundlegenden Bestandteile des Universums erfasst und versucht, den Ursprung der Masse zu erklären und die Existenz von Extradimensionen zu erforschen. In jüngster Vergangenheit haben Experimente und Beobachtungen eine überraschende Erkenntnis zutage gebracht: Wir können nur vier Prozent des Universums erklären. Die Wissenschaftler nehmen an, dass die verbleibenden 96 Prozent aus der unbekannten dunklen Materie und dunklen Energie bestehen und dass das Universum viel rätselhafter und vielfältiger ist als ursprünglich vermutet. Die weltweite Gemeinschaft der Teilchenphysiker ist sich darüber einig, dass ein Elektron-Positron-Beschleuniger – wie der vorgeschlagene *International Linear Collider* ILC – als Präzisionsmaschine den Durchbruch zum Verständnis der Entstehung des Universums und seiner jetzigen Form bringen wird.

Im Gegensatz zu Protonenbeschleunigern wie dem LHC in Genf, in dem zusammengesetzte Teilchen miteinander kollidieren, prallen im ILC punktförmige Elektronen auf ihre Antiteilchen, die ebenfalls punktförmigen Positronen. Sie vernichten sich gegenseitig und verwandeln sich in Energie, aus der neue Teilchen entstehen. Da die Anfangsbedingungen bei der Teilchenerzeugung genau bekannt sind und keine „Reste“ der Stoßpartner verbleiben, ist das Ergebnis viel einfacher zu interpretieren als beim LHC. Der ILC ist damit eine echte Präzisionsmaschine und macht Entdeckungen möglich, die unsere Vorstellungswelt durch neue Formen der Materie, der Naturkräfte und der Raum- und Zeitdimensionen erweitert und Albert Einsteins Vision einer Weltformel in unmittelbare Nähe rücken lässt.

Visionen verwirklichen

Der ILC wird den Physikern durch seine hohen Energien und seine unerreichte Präzision einen völlig neuen Zugang zu den Rätseln des Universums ermöglichen, der mit heutigen Anlagen unerreichbar ist. Der vorgeschlagene Elektron-Positron-Beschleuniger ergänzt den Protonenbeschleuniger LHC auf ideale Weise. Zusammen könnten sie einige der größten Rätsel des Universums lösen. Mit den Entdeckungen des LHC als Wegbereiter würde der ILC die fehlenden Teile des Puzzles liefern.

Der ILC besteht aus zwei sich gegenüber liegenden Linearbeschleunigern. Darin rasen etwa 10 Milliarden Elektronen und ihre Antiteilchen, die Positronen, mit nahezu Lichtgeschwindigkeit aufeinander zu. Supraleitende Resonatoren, die bei Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt arbeiten, bringen die Teilchen auf immer höhere Energien, bis sie in der Mitte der 35 Kilometer langen Rennstrecke mit unvorstellbarer Wucht aufeinander prallen. Die Teilchenstrahlen kollidieren 14 000 Mal pro Sekunde mit Elektronen-Rekord-

In solchen supraleitenden Hohlraumresonatoren werden die Teilchen im ILC beschleunigt.

ILC: International Linear Collider

- Elektron-Positron-Linearbeschleuniger
- in Planung
- Standort noch nicht festgelegt
- Länge: ca. 35 km
- Kollisionsenergie der Elektronen und Positronen: 500 bis 1000 Giga-Elektronenvolt (GeV)
- zwei bewegliche Experimente an einer Kollisionszone
- Beteiligung: 2000 Wissenschaftler aus über 24 Ländern

energien von 500 Milliarden Elektronenvolt (GeV). Diese Kollisionen produzieren eine Menge neuer Teilchen, die Antwort geben könnten auf die zentralen Fragen unseres Jahrhunderts. Die derzeitige Planungsgrundlage sieht eine Erweiterung des ILC auf 50 Kilometer Länge und 1000 Milliarden Elektronenvolt Energie in der zweiten Phase des Projekts vor.

Zukunftstechnologie

Der internationale Linearbeschleuniger ILC soll als globales Projekt gebaut und betrieben werden. Weltweit gab es mehrere Vorschläge für einen solchen Beschleuniger der Zukunft, die sich durch die Wahl der Beschleunigertechnologie unterschieden. Nach intensiver Begutachtung entschied das Komitee, das die Teilchenphysik weltweit vertritt: Für den künftigen Linearbeschleuniger wird die supraleitende Beschleunigertechnologie eingesetzt, die DESY und seine internationalen Partner – die *TESLA Technology Collaboration* – gemeinsam entwickelt und an der TESLA-Testanlage in Hamburg erfolgreich getestet haben. Diese Technologie kommt zudem bei dem Röntgenlaser European XFEL zum Einsatz, der derzeit in Hamburg gebaut wird – ein Beispiel für erfolgreiche Synergien bei der Mehrfachnutzung einer komplett neuen Technologie.

SUPRALEITUNG.

Beschleunigertechnologie der Zukunft

Spitzenforschung für den ILC

DESY spielt bei der Entwicklung der Beschleunigertechnologie für den ILC eine maßgebliche Rolle. Denn als das zuständige Gremium 2004 festlegte, welche Technologie beim ILC eingesetzt werden soll, fiel die Entscheidung zugunsten der supraleitenden Hochfrequenztechnologie, die im Rahmen des TESLA-Projekts unter Federführung von DESY entwickelt und erprobt worden war. Auf dieser Technologie beruht nicht nur der 35 Kilometer lange ILC; sie wird in ähnlicher Form auch bei dem knapp 300 Meter langen Freie-Elektronen-Laser FLASH verwendet, der seit 2005 bei DESY in Betrieb ist, sowie beim 3,4 Kilometer langen Röntgenlaser European XFEL, der derzeit als europäisches Projekt in Hamburg entsteht. Die Voraussetzungen bei DESY sind also ausgezeichnet, um bei der Weiterentwicklung der supraleitenden Beschleunigertechnologie weiterhin an vorderster Front mitzuwirken.

Darüber hinaus beteiligen sich die DESY-Forscher in Hamburg und Zeuthen an der Entwicklung zahlreicher weiterer wichtiger Elemente des ILC-Beschleunigers, zumeist im Rahmen internationaler Projekte wie der *TESLA Technology Collaboration* oder EU-Projekten wie EUROTeV oder ILC-HiGrade, die von DESY koordiniert werden. Das Spektrum reicht von der Entwicklung von Dämpfungsringen und polarisierten Positronenquellen über Studien zur Strahldiagnostik, -dynamik, -stabilisation und Luminositätsoptimierung bis hin zur Vermessung von Bodenbewegungen und der Entwicklung eines globalen Beschleunigernetzwerks für die Fernkontrolle und -steuerung des Beschleunigers.

Auch der Betrieb von FLASH sowie der Bau und spätere Betrieb des European XFEL liefern wertvolle Einsichten – zum Beispiel zur Herausforderung, die höchst anspruchsvolle Beschleunigertechnologie in Zusammenarbeit mit der Industrie bis zur Serienreife zu führen und in der erforderlichen hohen Qualität in großen Stückzahlen industriell zu fertigen. Auch die Erfahrungen, die beim Bau des Tunnels für den European XFEL und dem Aufbau der Anlage in seinem Inneren gesammelt werden, kommen den Entwicklungsarbeiten für den ILC zugute. Über 200 Menschen arbeiten bei DESY in Hamburg und Zeuthen an FLASH, dem European XFEL und den Vorbereitungen für den ILC, und viele von ihnen sind in alle drei Projekte involviert – das schafft wichtige Synergieeffekte, die DESY unter den am ILC beteiligten Forschungszentren auszeichnen.

Niob-Resonatoren mit höchsten Feldstärken

Im ILC werden die Elektronen und Positronen mit Hilfe von elektromagnetischen Feldern beschleunigt, die im Inneren von speziellen neunzelligen Beschleunigungsstrukturen schwingen. Diese Hohlraumresonatoren werden aus dem Metall Niob hergestellt und arbeiten supraleitend: Kühlt man sie mit flüssigem Helium auf ihre Betriebstemperatur von minus 271°C ab, verlieren sie ihren elektrischen Widerstand. Der Strom fließt dann in den Resonatoren nahezu verlustfrei – eine äußerst effiziente und energiesparende Methode der Beschleunigung. Dabei wird praktisch die gesamte elektrische Leistung auf die Teilchen übertragen.

Ein wesentliches Leistungskriterium der Resonatoren ist ihre Beschleunigungsfeldstärke, der Gradient. Dieser konnte in den letzten knapp 20 Jahren dank intensiver Entwicklungsarbeiten insbesondere bei DESY maßgeblich gesteigert werden. Während in Beschleunigern installierte supraleitende Resonatoren 1992 allenfalls Gradienten zwischen 5 und 8 Megavolt pro Meter (MV/m) lieferten, erreichen neunzellige Resonatoren, wie sie für den ILC vorgesehen sind, im Einzeltest mittlerweile bis zu 40 MV/m, in Achtergruppen innerhalb von Beschleunigermodulen eingebaut rund 30 MV/m. Ziel ist, die Teilchen im ILC mit bis zu 35 MV/m auf Touren zu bringen. Wie sich der Gradient zuverlässig reproduzierbar bis zu diesem Wert steigern lässt, wird auch bei DESY intensiv studiert.

Dabei spielen sowohl der Herstellungsprozess als auch die Oberflächenbehandlung der Niob-Resonatoren eine wichtige Rolle. So erproben die DESY-Forscher und ihre internationalen Partnern zum Beispiel die Methode der Elektropolitur, um die Innenseiten der Resonatoren spiegelblank zu polieren.

Computersimulation der Teilchenbeschleunigung in den supraleitenden Resonatoren

Dadurch lassen sich Unebenheiten vermeiden, die zu einem Zusammenbruch der Supraleitung führen könnten. Eine weitere Idee ist, die Resonatoren statt aus herkömmlichem, polykristallinem Niob aus großen Niob-Kristallen oder sogar Niob-Einkristallen zu fertigen. Deren gleichmäßig ausgebildete Kristallgitter bieten deutlich weniger Angriffspunkte für Verunreinigungen, die die Leistungsfähigkeit der Resonatoren reduzieren könnten.

Beschleunigermodule auf der Testbank

Wie bei FLASH und dem European XFEL werden auch im ILC voraussichtlich je acht Resonatoren zu einem Beschleunigermodul zusammengefügt. Diese Module enthalten nicht nur die notwendige Kältetechnik, um die Resonatoren auf die erforderlichen minus 271°C zu kühlen, sondern auch zahlreiche weitere wichtige Komponenten, die alle Höchstleistungen erbringen und optimal aufeinander abgestimmt sein müssen. Dank eines neuen Teststands bei DESY können die vollständigen, 12 Meter langen Beschleunigermodule für FLASH, den European XFEL und den ILC nun auch getestet und optimiert werden, ohne sie in die FLASH-Anlage einbauen und wertvolle Nutzerzeit von FLASH für die Modulüberprüfung aufwenden zu müssen.

Eines der getesteten Module wurde beispielsweise zehnmal auf minus 271°C gekühlt und wieder auf Raumtemperatur erwärmt, um das Verhalten der Teile in seinem Inneren unter diesen extremen Bedingungen zu studieren. Denn schon kleinste Bewegungen der Komponenten aufgrund der Temperaturveränderungen können die Qualität der beschleunigten Teilchenstrahlen verschlechtern – selbst wenn es sich nur um Bruchteile eines Millimeters handelt. Weiterhin stand eine Reihe von Crash-Tests an, bei denen unterschiedliche Katastrophenszenarien – insbesondere Vakuumlecks – unter kontrollierten Bedingungen durchgespielt wurden. Ziel war es sicherzustellen, dass die Module den Bestimmungen der europäischen Druckbehälterrichtlinien entsprechen und eventuell auftretende Probleme im Falle eines Falles auf das Innere des Moduls beschränkt bleiben.

Um die Serienproduktion der Beschleunigermodule für den European XFEL und später den ILC vorzubereiten, arbeitet DESY intensiv daran, das über Jahrzehnte erworbene Wissen über den Bau der Module weiterzugeben. Schließlich wird der European XFEL 100 Module benötigen, der ILC knapp 2000. Bald müssen also Teams aus der ganzen Welt in der Lage sein, solche Module zusammenzubauen – aus jeweils 1200 Einzelteilen, die es mit höchster Präzision und unter schärfsten Reinheitsbedingungen zusammenzufügen gilt. Zahlreiche Forscher und Vertreter aus der Industrie waren deshalb bereits bei DESY, um die Montage der Module mitzuverfolgen, und dank der von DESY erstellten, hochkomplexen Bauanleitung konnte schon ein Modul bei Fermilab in den USA zusammengesetzt werden. Die Erfahrung, die DESY, die anderen Forschungszentren weltweit und die Industrie mit der beginnenden Serienfertigung der Beschleunigermodule für den European XFEL gewinnen, wird auch dem ILC entscheidend zugute kommen.

Inspektion eines supraleitenden Niob-Resonators bei DESY

FERNBEDIENUNG.

Kontrollraum zur Welt

Besprechung im neu eröffneten ILC-Kontrollraum bei DESY

Fernbedienung global

Der ILC entsteht schon heute in einer weltweiten Zusammenarbeit, die ihresgleichen sucht. 2000 Menschen aus über 25 Nationen rund um den Globus tragen zu den Entwicklungsarbeiten bei. An den Testexperimenten sind hunderte Physiker, Techniker und Ingenieure beteiligt, die Einzelkomponenten der Apparaturen stammen aus aller Herren Länder. Schlussendlich wird der 35 Kilometer lange Beschleuniger allerdings nur einmal gebaut – in welchem Land auch immer. Dies wirft schwierige Fragen auf: Wie lassen sich alle involvierten Partner gleichberechtigt einbeziehen, so dass niemand das Gefühl hat, beim Betrieb der Anlage zu kurz zu kommen? Und wie lässt sich eine Komponente möglichst rasch reparieren, wenn alle zuständigen Experten gerade am anderen Ende der Welt an einer Tagung teilnehmen?

Eine Lösung bietet das *Global Accelerator Network* (GAN), ein weltweites Netzwerk für den Betrieb von Beschleunigern. Dabei sollen nicht nur in verschiedenen Ländern der Welt Kontrollräume entstehen, von denen aus der Beschleuniger und die Experimente komplett aus der Ferne kontrolliert und gesteuert werden können. Die Beteiligten sollen vielmehr in der Lage sein, von jedem beliebigen Computer aus auf die gigantische Maschine und die hausgroßen Detektoren zugreifen zu können, beziehungsweise ihren Kollegen vor Ort bei der Lösung von Problemen unmittelbar zur Seite zu stehen. Das würde auch das Ende der zehrenden Nachtschichten bedeuten, die in der Teilchenphysik bisher gang und gäbe sind: Bei Kontrollräumen in Amerika, Asien und Europa könnten die verschiedenen Schichten jeweils von der Crew übernommen werden, bei der gerade Tag ist. Bei einer Überlappungszeit von einer Stunde für die Übergabe würde jede Schicht nur noch neun Stunden dauern, und das zu normalen Arbeitszeiten – davon können die meisten Teilchenphysiker heute nur träumen.

Erste Gehversuche mit ELETTRA

Dass eine solche Fernkontrolle tatsächlich machbar ist, demonstrierte die GAN-Arbeitsgruppe des EU-Projekts EUROTeV im Jahr 2005. Die Forscher setzten verschiedene Softwarewerkzeuge ein, um aus mehr als 1000 Kilometern Entfernung von DESY aus einen Elektronenstrahl in den ELETTRA-Beschleunigerring in Trieste, Italien, einzufädeln. Mit Hilfe von einfachen Webcams, so genannten *Remote Desktops* und aktiven Audioverbindungen konnten sie den Strahl unter den Augen der lokal anwesenden Experten zuverlässig speichern. Dabei erfolgte der komplette Netzverkehr über gesicherte Datenverbindungen.

Eine ebenfalls von EUROTeV durchgeführte Nutzerbefragung zeigte, dass die Anforderungen an ein solches Fernkontrollsystem sehr hoch sind. Kurz gesagt, darf die Fernverbindung keine Rolle mehr im Bewusstsein des Verantwortlichen spielen. Eine solche Transparenz lässt sich nur mit drastisch vereinfachten Steueroberflächen erreichen, wie sie nach und nach verfügbar werden.

Direkter Draht zu Fermilab

Der neu eröffnete ILC-Kontrollraum bei DESY beruht auf einem solchen weiterentwickelten, vereinfachten Prinzip. Zwei Computerarbeitsplätze, ein großer Bildschirm mit Bildern von drei Webcams und drei Uhren an der Wand, auf denen die Uhrzeit in Hamburg, Chicago und Tokyo abzulesen ist – jetzt können die Wissenschaftler ihre Apparaturen bequem von DESY aus überwachen, auch wenn diese am CERN in Genf oder Fermilab in Chicago stehen. Seit Mai 2008 nutzt die internationale CALICE-Gruppe, die Kalorimeterprototypen für einen ILC-Detektor entwickelt, die technische Ausstattung, um ihr am Fermilab in Chicago aufgebautes Teststrahlexperiment zu steuern und die aufgenommenen Daten zu analysieren. Dank der permanenten Videoverbindung, die wie ein Fenster in das andere Labor wirkt, können die Wissenschaftler bei Fermilab und DESY zusammenarbeiten, als befänden sie sich im gleichen Raum.

So lassen sich auch technische Probleme gemeinsam beheben. Mit Hilfe der Webcams können die Hamburger Forscher beliebig nahe an den Experimentieraufbau heranzoomen und jedes Detail des Experiments in Augenschein nehmen, um ihren Kollegen bei Fermilab entsprechende Hinweise zu geben – sei es auf ein gebrochenes Kabel oder einen falsch umgelegten Schalter. Dazu müssen sich die Experten noch nicht einmal bei DESY im Kontrollraum aufhalten: Das neue System erlaubt jedem Mitglied der CALICE-Gruppe jederzeit und von jedem beliebigen Ort Zugriff auf und – dank eines webbasierten elektronischen Logbuches – Einsicht in den aktuellen Stand des Experiments. Einzige Voraussetzung ist ein Computer mit Internetzugang.

Revolution in der Kooperation

Dass das komplette System auf dem Web basiert, ist eine bedeutende Innovation gegenüber früheren Kontrollsystemen, die spezielle technische Ausrüstung erforderten, somit teuer und langwierig zu installieren waren und nur mit Einschränkungen benutzt werden konnten. Als weltweit operierendes Team benötigte die CALICE-Gruppe jedoch einen einfachen Weg, ihre 220 Mitglieder auf der ganzen Welt zu verbinden. Daraus ist ein bequem zu installierendes und zudem kostengünstiges System entstanden, das jedem Teammitglied ermöglicht, das Experiment jederzeit zu kontrollieren, bei Bedarf Hilfestellung zu leisten oder im Fall eines Problems direkt einzugreifen.

Natürlich erfordert diese Form der Kooperation eine gewisse Eingewöhnung. Nicht jeder fühlt sich wohl, wenn er sich ständig vom anderen Ende der Welt aus beobachtet weiß. Auch die Zusammenarbeit per Videokonferenzsystem funktioniert meist nur dann optimal, wenn die Teilnehmer sich zuvor persönlich kennen gelernt haben. Darüber hinaus muss genau überlegt werden, welche Steueroptionen allgemein zugänglich sind und welche nur vom Kontrollraum aus bedient werden können.

Die CALICE-Gruppe jedoch will ihr neues Kontrollsystem nicht mehr missen – es ist zum meistgenutzten Hilfswerkzeug der Forscher geworden, das ihnen eine ganz neue Dimension der Zusammenarbeit eröffnet hat. Auch andere Gruppen und Projekte werden den ILC-Kontrollraum bei DESY in Zukunft nutzen, und beim Röntgenlaserprojekt European XFEL in Hamburg soll ein ähnliches System zur Überwachung und Steuerung der Anlage zum Einsatz kommen. Die neuartigen, webbasierten Kontrollsysteme versprechen, die virtuelle Kooperation in den verschiedensten Bereichen ebenso zu revolutionieren wie seinerzeit das *World Wide Web* – das bei CERN erfunden wurde, um den Datenaustausch zwischen Teilchenphysikern weltweit zu erleichtern. Womöglich sind solche Systeme in ein paar Jahren aus unserem Alltagsleben ebenso wenig wieder wegzudenken wie heute das WWW.

DETEKTOREN.

Hochpräzisionsdetektoren für den ILC

Computersimulation einer Teilchenkollision in einem zukünftigen ILC-Detektor

Detektortechnologie der Zukunft

Wie präzise und leistungsstark ein Beschleuniger auch sein mag – ohne entsprechende Detektoren, mit denen sich die Teilchenkollisionen bis ins Detail verfolgen und aufzeichnen lassen, ist die gesamte Hochleistungsmaschine nicht viel wert. Gerade der ILC ermöglicht mit seinen Elektron-Positron-Kollisionen extrem genaue Messungen im Neuland der Teraskala. Die zwei Detektoren, die für die Anlage vorgesehen sind, müssen dieser Präzision in all ihren Komponenten gerecht werden, damit das wissenschaftliche Potenzial des ILC voll ausgeschöpft werden kann.

Seit einigen Jahren sind deshalb auf der ganzen Welt Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu möglichen ILC-Detektoren im Gang. Auch DESY beteiligt sich maßgeblich daran. So koordiniert DESY zum Beispiel das EU-Projekt EUDET, an dem 31 europäische Institute aus zwölf Ländern sowie 24 assoziierte Institute auf der ganzen Welt mitarbeiten. EUDET stellt vor allem wichtige Forschungsinfrastrukturen zur Verfügung, die für ein einzelnes Labor zu teuer und somit nicht zu realisieren wären – zum Beispiel ein Präzisionsgerät, mit dem die Messgenauigkeit von Detektorprototypen überprüft werden kann, Ausleseelektronik oder ein universelles Softwareangebot. DESY-Gruppen in Hamburg und Zeuthen führen darüber hinaus in internationaler Zusammenarbeit Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für verschiedene Detektorkomponenten durch – wie Vertexdetektor, Zeitprojektionskammer, Vorwärtskalorimeter, hadronisches Kalorimeter sowie Polarimeter – und entwickeln Software für die komplexen Simulations- und Rekonstruktionsmethoden der zukünftigen ILC-Detektoren.

Alles im Fluss

Eine wichtiges Prinzip für die künftigen ILC-Detektoren ist das Konzept des „Teilchenflusses“: Um die Präzision der Elektron-Positron-Kollisionen optimal ausnutzen zu können, sollen die ILC-Detektoren in der Lage sein, jedes Teilchen, das die verschiedenen Detektorlagen durchfliegt, einzeln dreidimensional zu erfassen. In bisherigen Experimenten „sehen“ zwar die Spurdetektoren jedes einzelne Teilchen der in den Kollisionen entstehenden Teilchenbündel („Jets“), die Kalorimeter jedoch, mit denen die Energie der Teilchen bestimmt wird, können die Jets nur als Ganzes messen. Damit auch die Kalorimeter in Zukunft 3D-Bilder jedes einzelnen Teilchens liefern können, müssen sie quasi selbst zu Spurdetektoren werden. Dies lässt sich nur mit besonders fein unterteilten Kalorimetern erreichen, also Kalorimetern aus besonders vielen, möglichst kleinen Einzelsensoren, die es erlauben, Ort und Richtung der Teilchen mit hoher Genauigkeit zu bestimmen. Das von den DESY-Gruppen verfolgte Detektorkonzept verbindet ein hocheffizientes und präzises Spurdetektorsystem mit solchen fein unterteilten Kalorimetern.

Teilchenmessung in 3D

Das Spurdetektorsystem besteht aus einer Zeitprojektionskammer und einem Siliziumspurdetektor, die zusammen mehr als 200 Einzelpunkte pro Teilchenspur liefern. Damit lassen sich die Teilchenbahnen zehnmal besser rekonstruieren als bisher – ein Quantensprung in der erreichbaren Präzision. Wesentliche Herausforderungen liegen dabei in der Anwendung neuer Mikrostrukturen zur Gasverstärkung, die vor allem in den für die ILC-Detektoren benötigten hohen Magnetfeldern eine größere Genauigkeit bieten als bisher. Zudem müssen diese Detektoren in sehr leichter Bauweise konstruiert werden, damit die Messung der weiter außerhalb liegenden Kalorimeter möglichst wenig gestört wird.

Bei den Kalorimetern konzentrieren sich die DESY-Forscher insbesondere auf die Entwicklung von äußerst fein unterteilten Kalorimetern zum Nachweis von Teilchen aus der Familie

der Hadronen, unter anderem im Rahmen des internationalen CALICE-Projekts. Die entwickelten Prototypen werden in Teststrahlen bei DESY in Hamburg, CERN in Genf und Fermilab in Chicago getestet und vermessen. Die Tests sollen zeigen, ob ein Kalorimeter mit fünf Millionen Kanälen, wie es sich nur unter Einsatz neuester Photosensortechnologien realisieren lässt, tatsächlich machbar ist, und wie die Prototypen verändert werden müssen, um dieses hochgesteckte Ziel zu erreichen. So können die Forscher herausfinden, welches Konzept für den ILC am besten geeignet ist. In ersten Tests funktionierte der DESY-Prototyp für das hadronische Kalorimeter den hohen Erwartungen entsprechend. Mit seiner besonders feinen Unterteilung von nur 3 mal 3 Zentimetern ist er bereits präziser als all seine Vorgänger.

Mit anderen Anforderungen haben die Entwickler der Vorwärtskalorimeter für die ILC-Detektoren zu kämpfen. Diese befinden sich sehr dicht an den Strahlrohren und müssen eine jährliche Strahlendosis von mehreren Millionen Gray aushalten. Die Leistungsfähigkeit dieser Kalorimeter steht und fällt somit mit ihrer Strahlungsresistenz. Unter der Federführung von DESY in Zeuthen untersucht die internationale FCAL-Gruppe verschiedene Prototypen für solche Vorwärtskalorimeter und nimmt dazu auch Sensoren aus synthetischem Diamant unter die Lupe. Zum ersten Mal kommen solche Diamantsensoren in den LHC-Experimenten zum Einsatz. Das Zeuthener FCAL-Team hat dabei die Montage, Inbetriebnahme und Auslesesoftware eines der Strahlmonitore im CMS-Experiment übernommen, mit denen die Qualität der Teilchenstrahlen im LHC gemessen wird. Hier ergänzen sich die Forschungen zu neuen Detektortechnologien für künftige Experimente und die Anwendung in speziellen Komponenten für heutige Detektoren auf ideale Weise.

Forschungsinfrastruktur für den ILC

Im Rahmen des von DESY koordinierten EU-Projekts EUDET werden wesentliche Forschungsinfrastrukturen für die ILC-Detektorentwicklung bereitgestellt. Ein wichtiges Element ist ein spezieller supraleitender Magnet des Forschungszentrums KEK in Japan, der bei Ballonflügen in die Stratosphäre für die Suche nach Antimaterie aus dem Weltall eingesetzt wurde. Der weltraumerprobte Magnet ist sehr dünnwandig, wiegt nur 400 Kilogramm und braucht weder fest installierte Heliumleitungen noch Stromkabel. Einmal mit Helium gefüllt und durch eine externe Stromquelle aufgeladen, läuft er bis zu zwei Wochen völlig autark. Als Teil der Teststrahlinfrastruktur bei DESY fungiert der Magnet quasi als Miniversion der zukünftigen großen ILC-Detektormagnete. In seinem Inneren können die Forscher Prototypen von Detektorkomponenten – wie eine kleine Version der Spurkammer und des Vertexdetektors – installieren, um sie unter genau definierten Bedingungen zu testen.

Zu der EUDET-Infrastruktur zählt auch ein zunächst bei DESY aufgebautes so genanntes Teleskop. Damit wollen die Wissenschaftler nicht etwa Sterne beobachten, sondern die Messgenauigkeit von Detektorprototypen überprüfen. Ähnlich einem mit Siliziumdetektoren ausgestatteten Messschieber, in dessen Mitte die zu testenden Detektorprototypen installiert werden, kann das Teleskop die Lage bzw. Bahn jedes Strahlteilchens auf drei Mikrometer genau bestimmen. Die Prototypentwickler können die von ihren Detektoren gemessenen Daten dann mit denen des Teleskops vergleichen und somit testen, ob ihr Detektor korrekt funktioniert. Stimmen die Daten nicht mit denen des Teleskops überein, so wissen sie, dass etwas nicht stimmt. Das EUDET-Teleskop ist eine echte europäische Gemeinschaftsleistung. Die Chips kommen aus Frankreich, das Auslesesystem aus Italien, die Datennahmesoftware aus der Schweiz, der Trigger aus Großbritannien und die mechanischen Teile von DESY. Auch die Systemintegration, die garantiert, dass aus den einzelnen Beiträgen ein funktionierendes Ganzes wird, wurde bei DESY durchgeführt.

Dank seiner langjährigen Erfahrung und Kompetenz im Bereich der Beschleunigerexperimente hat sich DESY zu einem bedeutenden internationalen Zentrum für die Detektorentwicklung entwickelt. Mit seiner attraktiven Infrastruktur bietet es Gruppen aus dem In- und Ausland ideale Bedingungen für Forschung, Entwicklung und Testläufe. Die verfolgten Projekte fügen sich nicht zuletzt optimal in das Konzept der Helmholtz-Allianz „Physik an der Teraskala“ ein, die das in Deutschland vorhandene Expertenwissen in der Teilchenphysik bündeln und langfristig stärken will (siehe S. 10).

LEICHT GEWICHTE.

ALPS
Auf der Suche nach leichten Teilchen

Auf der Fahndungsliste der DESY-Forscher stehen nicht nur extrem schwere Teilchen, die mit großen Hochenergiebeschleunigern erzeugt werden müssen. Auch sehr leichte Teilchen am unteren Ende der Energieskala könnten den Physikern Hinweise auf unbekannte physikalische Phänomene liefern. Mit dem im Verhältnis zu den gewaltigen Apparaturen an LHC oder ILC geradezu winzigen Experiment ALPS sind die DESY-Forscher den Leichtgewichten auf der Spur.

Teilchenphysik am unteren Ende der Energieskala

Mit den großen Hochenergiebeschleunigen wie dem LHC in Genf oder dem geplanten Linearbeschleuniger ILC fahnden die Physiker nach Schwergewichten – Teilchen, die ihnen bisher entgangen sind, weil die Energie früherer Beschleuniger nicht ausreichte, um Teilchen mit solch hoher Masse zu erzeugen. In der Tat sagen die meisten Theorien, die über das Standardmodell der Teilchenphysik hinausführen, neuartige Teilchen voraus, die etwa 1000 Mal schwerer sind als das Proton. Jüngste theoretische Arbeiten sowie einige bisher

Mit einem ausgemusterten HERA-Magneten suchen die Physiker des ALPS-Experiments nach sehr leichten Teilchen, die Hinweise auf neue Physik liefern könnten.

kaum verstandene experimentelle Beobachtungen deuten nun jedoch darauf hin, dass sich die „neue Physik“ auch in einer Fülle von extrem leichten Teilchen offenbaren könnte.

Diese so genannten WISPs (für *Weakly Interacting Sub-eV Particles*, schwach wechselwirkende Teilchen mit Massen unter einem Elektronenvolt) reagieren nur sehr selten mit Materie und werden entsprechend selten erzeugt, so dass ihre Spuren an den großen Hochenergiebeschleunigern in der Flut von Standardreaktionen einfach untergehen würden. Um die hypothetischen WISPs am unteren Ende der Energieskala aufzuspüren, müssen die Physiker deshalb zu anderen Mitteln greifen. Mit dem Experiment ALPS (*Any Light Particle Search*) wird seit Sommer 2007 auch bei DESY nach den flüchtigen Leichtgewichten gesucht.

Licht durch die Wand

Die an ALPS beteiligten Physiker von DESY, der Hamburger Sternwarte, dem Laser Zentrum Hannover sowie dem Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik verfolgen den esoterisch anmutenden Ansatz, „Licht durch eine Wand“ zu schicken: Sie senden einen Laserstrahl durch das starke Magnetfeld eines ausrangierten HERA-Dipolmagneten. Sollte es tatsächlich WISPs geben, so müsste ein Teil der Photonen (Lichtteilchen) des Laserstrahls dabei verschwinden und sich in die unbekannten Leichtgewichte umwandeln. In der Mitte des Magneten stoppt eine Wand das Laserlicht. Die erzeugten WISPs könnten die Wand jedoch durchqueren – da sie so selten mit anderen Teilchen wechselwirken, ist feste Materie für sie kein Hindernis. Im Magnetfeld hinter der Wand könnten sich einige der theoretisch vorhergesagten neuen Teilchen wieder in Lichtteilchen zurück verwandeln, die sich dann mit einem Photonendetektor nachweisen ließen. Damit wäre das Licht in der Tat quasi „durch die Wand“ gegangen.

David und Goliath

Die erwartete Ausbeute solcher Photonregenerations-Experimente ist allerdings gering: Höchstens jedes milliardste Photon wandelt sich in WISPs um, davon wandelt sich wieder nur jedes milliardste in Licht zurück. Die Physiker von ALPS verwenden derzeit einen Laser mit einer Leistung von knapp 15 Watt – das entspricht rund 15 000 Laserpointern. Damit sollten sich WISPs, die leichter als ein Milli-Elektronenvolt sind, bereits jetzt mit konkurrenzfähiger Empfindlichkeit aufspüren lassen. Durch den Einbau einer so genannten optischen Kavität, mit der die Laserleistung auf 300 Watt und eventuell sogar über 1000 Watt gesteigert werden soll, wird die Empfindlichkeit von ALPS nochmals deutlich erhöht. Dann wird das DESY-Experiment den hypothetischen leichtgewichtigen WISPs mit der weltbesten Empfindlichkeit nachstellen und – so die Hoffnung der Physiker – schon bald weitere Einsichten ins Neuland niedriger Energien liefern.

Wer weiß – womöglich gelingt es den Physikern von ALPS mit ihrem ausgemusterten HERA-Magneten, noch vor ihren Kollegen an den milliardenschweren Beschleunigern die lang ersehnten Hinweise auf neue Physik zu finden. Auf jeden Fall ergänzen die Suchen nach sehr leichten Teilchen im Niedrigenergiebereich die Messungen an den Großexperimenten bei höchsten Energien auf optimale Weise – in Kombination werden ihre Ergebnisse entscheidend dazu beitragen, unser Verständnis der elementaren Bausteine des Universums und ihrer Wechselwirkungen zu vertiefen.

WELTRAUM BOTEN.

IceCube und CTA
Die Fenster zum Universum

Die DESY-Wissenschaftler forschen auch in der Astroteilchenphysik, einem Fachgebiet, das Methoden und Fragestellungen aus der Astrophysik, der Kosmologie und der Teilchenphysik vereint. Aus dem Weltall gelangen ständig unterschiedliche Arten von Teilchen auf die Erde, die Auskunft über die Geschehnisse in den fernen Weiten des Kosmos geben können. Die DESY-Forscher am Standort Zeuthen nutzen zwei dieser Himmelsboten, Neutrinos und hochenergetische Gammastrahlung, um den Geheimnissen von Sternexplosionen, kosmischen Teilchenbeschleunigern – wie zum Beispiel der Umgebung von schwarzen Löchern – oder der dunklen Materie auf die Spur zu kommen.

Auch Pulsare sind kosmische Teilchenbeschleuniger: hier die nahe Umgebung des Pulsars im Krebsnebel

Geheimnisvolle kosmische Strahlung

Die Erde ist einem Dauerregen aus dem Kosmos ausgesetzt. Unablässig prasseln Teilchen aus den fernen Weiten des Universums auf die Erdatmosphäre – Protonen, Heliumkerne, aber auch schwerere Elemente wie etwa Eisenkerne. Hoch oben in zwanzig Kilometern Höhe treten sie ganze Lawinen sekundärer Teilchen los, die die gesamte Erdatmosphäre durchqueren und schließlich auch durch uns Menschen hindurchjagen. Soweit sie elektrisch geladen sind, ionisieren diese Teilchen die Materie, die sie durchfliegen. Über Jahrmillionen haben sie dadurch zur Veränderung des biologischen Erbguts beigetragen – die kosmische Strahlung ist somit einer der Motoren der Evolution, die auch den Menschen hervorgebracht hat.

Einige dieser Teilchen aus dem Kosmos erreichen schwindelerregende Energien – bis über das Zehnmillionenfache der Energie des LHC, des leistungsstärksten je von Menschenhand gebauten Beschleunigers. Das entspricht der Energie eines mit voller Wucht geschlagenen Tennisballs, konzentriert auf ein einziges Elementarteilchen. Doch wo liegen die Quellen dieser hochenergetischen Geschosse? Wie gelingt es der Natur, die Teilchen auf derartige Energien zu beschleunigen? Sind diese Teilchen Boten aus der unmittelbaren Umgebung schwarzer Löcher, die wie gewaltige Mahlströme Materie verschlucken und dabei Energie in Form von ausgedehnten Materiestrahlen in den Raum schleudern? Oder

Bei DESY in Zeuthen wurde ein Viertel der Lichtsensoren für das Neutrinoteleskop IceCube gebaut. Die Bild-Installation deutet das geometrische Muster der Sensoren an, die tief im Eis des Südpols eingefroren werden.

kommen noch andere Himmelskörper als kosmische Teilchenbeschleuniger in Frage? Lässt sich mit Hilfe der kosmischen Strahlung etwas über die mysteriöse dunkle Materie in Erfahrung bringen?

Fenster zum Universum

Die DESY-Forscher gehen auch diesen Fragen auf den Grund. Gemeinsam mit Kollegen aus aller Welt bauen Zeuthener Wissenschaftler dazu den größten Teilchendetektor der Welt – IceCube, ein Neutrinoteleskop der Superlative am Südpol. Außerdem werden sie zukünftig mit dem Gammateleskop CTA (*Cherenkov Telescope Array*) auf die Jagd nach hochenergetischer elektromagnetischer Strahlung, der so genannten Gammastrahlung, aus dem Weltall gehen. An beiden DESY-Standorten – in Hamburg und Zeuthen – werden darüber hinaus theoretische Arbeiten zur dieser Thematik durchgeführt.

Die DESY-Forschung ist ein wesentlicher Baustein der Gesamtstrategie der Helmholtz-Gemeinschaft auf dem Gebiet der Astroteilchenphysik. Durch drei Fenster erforscht die Helmholtz-Gemeinschaft das Universum höchster Energien: DESY blickt mit IceCube auf die *Terra Incognita* des Neutrinouniversums und in Zukunft mit CTA mit höchster Genauigkeit auf die bereits abgesteckte Himmelskarte der Gammastrahlungsquellen. Das Forschungszentrum Karlsruhe betreibt in der argentinischen Pampa das Pierre-Auger-Observatorium, einen Luftschauerdetektor zum Nachweis geladener kosmischer Strahlen. Ein Universum – drei Botenteilchen, die den Wissenschaftlern drei verschiedene Blickwinkel ins Weltall eröffnen: Entsprechend dem Prinzip der *Multi-Messenger*-Astronomie, der Astronomie mit verschiedenen Botenteilchen, ergänzen sich die Forschungen der beiden Helmholtzzentren auf optimale Weise.

IceCube

Neutrinoteleskop im Eis des Südpols, ergänzt durch ein Detektorfeld an der Eisoberfläche (IceTop)

- **Fertigstellung: 2011**
- **Volumen: ein Kubikkilometer**
- **Tiefe im Eis: zwischen 1450 und 2450 Metern**
- **80 Trossen mit je 60 optischen Modulen**
- **Insgesamt 4800 optische Module**
- **Größe von IceTop: ein Quadratkilometer**
- **80 Detektorstationen von IceTop**
- **Beteiligung: über 200 Wissenschaftler aus 8 Ländern**

ICECUBE.

Geisterteilchen auf der Spur

Neutrinos als Himmelsboten

Die Astroteilchenforschung bei DESY wird vor allem am Standort Zeuthen betrieben. Dort arbeiten die Forscher schon seit zwei Jahrzehnten auf diesem Gebiet. Ihr Interesse gilt insbesondere den Neutrinos – extrem leichten Teilchen, die nahezu ungestört durch alles hindurchfliegen, was ihnen auf ihrem Weg begegnet. Neutrinos entstehen zum Beispiel bei der Kernfusion im Inneren der Sonne oder bei Sternexplosionen, so genannten Supernovae. Fast unbemerkt treffen sie auf die Erde. Pro Sekunde rasen etwa 60 Milliarden Sonnenneutrinos durch jeden Quadratzentimeter der Erdoberfläche – fast ohne jede Reaktion mit ihrer Umgebung. Die geisterhaften Teilchen lassen sich daher nur mit viel Aufwand nachweisen, beispielsweise in großen Tanks in Bergwerken oder mit Messapparaturen in Seen, Ozeanen oder im ewigen Eis des Südpols.

Neutrinos liefern wichtige Informationen über das Geschehen im Kosmos. So wie Licht bestimmte Phänomene sichtbar macht, „sieht“ man andere mit Hilfe von Neutrinos. Paradoxerweise macht gerade die Tatsache, dass diese Geisterteilchen extrem selten mit ihrer Umgebung reagieren, die Neutrinos zu idealen kosmischen Boten. Denn Teilchen, die kaum aufzuspüren sind, können fast ungehindert auch die dicksten Materieschichten durchdringen: Dass tief im Sonneninneren exakt die vorausberechneten Fusionsreaktionen ablaufen, weiß man dank Neutrinomessungen; ebenso, dass im Inneren kollabierter Sterne, aus denen Licht nicht entweichen kann, Temperaturen von 40 Milliarden Grad herrschen.

Neutrinos erreichen die Erde auf direktem Wege. Die höchstenergetischen unter ihnen, nach denen die Forscher suchen, kommen zum Beispiel von den Zentren fremder, Millionen oder gar Milliarden Lichtjahre entfernter Galaxien. Dagegen bleiben Licht- oder Gammastrahlen aus diesen Galaxien auf ihrem Weg zur Erde leicht in Materiewolken stecken; geladene Teilchen werden durch kosmische Magnetfelder von ihrer Bahn abgelenkt und verlieren die Information über ihre ursprüngliche Richtung, so dass sich ihr eigentlicher Ursprung nicht mehr feststellen lässt. Neutrinos scheren sich weder um Materiewolken noch um Magnetfelder – als nahezu unbeeinflussbare Himmelsboten können sie somit Informationen aus Regionen des Kosmos liefern, von denen kaum ein anderes Signal bis zur Erde vordringt.

Teleskope für Neutrinos

Aufgrund der gewaltigen Entfernungen treffen hochenergetische Neutrinos aus den Weiten des Alls nur selten auf die Erde. Um sie aufzuspüren, müssen die Wissenschaftler deshalb Neutrinoteleskope bauen, die hundert- oder tausendmal größer sind als die Detektoren in Schächten oder Tunneln, die für den Nachweis von Sonnenneutrinos verwendet werden. Solche gigantischen Instrumente werden tief ins Wasser oder ins Eis eingelassen. Gemeinsam mit Kollegen aus zahlreichen anderen Ländern sind die DESY-Forscher den Geisterteilchen mit Neutrinoteleskopen im Baikalsee und am Südpol auf der Spur.

In der Antarktis befindet sich tief ins Polareis eingeschmolzen das Neutrinoteleskop AMANDA, das bis 2011 zu IceCube, dem größten Teilchendetektor der Welt, ausgebaut wird. Durch den Nachweis hochenergetischer Neutrinos aus dem tiefen Weltraum wollen die Forscher die Ursprünge der kosmischen Strahlung untersuchen und die ersten Fähnchen auf die gegenwärtig noch weiße Himmelskarte des Hochenergie-Neutrinouniversums stecken. Weiterhin nutzen sie die Neutrinoteleskope, um den seltenen Supernova-Explosionen aufzulauern und nach Teilchen der dunklen Materie oder noch exotischeren Partikeln wie etwa magnetischen Monopolen zu fahnden.

Mitglieder der Crew des Neutrinoteleskops AMANDA beim Herablassen einer Kabeltrosse

Kosmische Spuren im ewigen Eis

Das Neutrinoteleskop IceCube besteht aus mehreren tausend Glaskugeln mit Lichtsensoren, so genannten optischen Modulen, die an langen Drahtseilen befestigt wie Perlschnüre knapp 2,5 Kilometer tief ins Polareis der Antarktis eingeschmolzen werden. Der dicke Eispanzer schirmt Störsignale weitgehend ab. Das kristallklare Eis erlaubt es, die Herkunftsrichtung der Teilchen zu bestimmen: Bei der Reaktion eines Neutrinos mit einem Atomkern entsteht ein Myon, ein Teilchen, das in Wasser oder Eis so genannte Cherenkov-Strahlung aussendet. Die Elektronik in den Glaskugeln zeichnet den Lichtkegel der Cherenkov-Strahlung und damit die Bahn des Myons auf. Aus den Sensordaten, die an die Messstation an der Oberfläche gesandt werden, lässt sich die Richtung des Verursacher-Neutrinos berechnen.

Verblüffenderweise führen Neutrinoreaktionen nicht nur zu optischen, sondern auch zu akustischen Signalen. Allerdings werden die winzigen Knall-Laute nur von extrem hochenergetischen Neutrinos erzeugt. Ob die Neutrinos am Südpol auch akustisch nachgewiesen werden können, wird derzeit mit der Test-Anordnung SPATS (*South Pole Acoustic Test Setup*) untersucht.

Als größter Teilchendetektor der Welt wird IceCube ein Volumen von einem Kubikkilometer umfassen und etwa 30 Mal so empfindlich sein wie sein Vorgänger AMANDA, dessen optische Module mittlerweile Teil von IceCube sind. Im Februar 2008 war IceCube zur Hälfte fertiggestellt und nimmt in dieser Ausbaustufe bereits Daten. Zusätzlich wird das Neutrinoteleskop durch ein weiteres, einen Quadratkilometer großes Detektorfeld namens IceTop an der Eisoberfläche ergänzt, dessen 80 Detektorstationen direkt oberhalb der Lichtsensoren von IceCube installiert werden. Mit Hilfe von IceTop wollen die Wissenschaftler ausgedehnte Luftschauer beobachten, die von hochenergetischer kosmischer Strahlung in der Atmosphäre ausgelöst werden. In Zeuthen wurde ein Viertel der Detektormodule von IceCube produziert. Auch an der Datenanalyse von IceCube und IceTop sind die Zeuthener Forscher maßgeblich beteiligt.

Für den IceCube-Detektor werden je 60 Lichtsensoren an einer Trosse befestigt und in einer Tiefe zwischen 1450 und 2450 Metern im Eis eingeschmolzen. Bis 2011 werden insgesamt 80 solcher Trossen installiert.

CTA.

Ein Himmel voller Gammastrahlen

Kosmische Informationen im Multipack

Die vollständige Landkarte des Hochenergie-Himmels wird sich erst erschließen, wenn wir alle Informationen, die der Kosmos liefert, konsequent ausnutzen. Die möglichen Botenteilchen (engl. *Messenger*) aus dem All sind dabei elektromagnetische Strahlung – die bei hohen Energien Gammastrahlung genannt wird – sowie geladene kosmische Teilchen, Neutrinos und in Zukunft vielleicht auch Gravitationswellen. Getreu dem Prinzip der *Multi-Messenger*-Astronomie setzen auch die DESY-Forscher auf mehrere dieser Himmelsboten.

So nimmt eine Nachwuchsgruppe in Zeuthen außer am Neutrinoteleskop IceCube auch an dem Gammastrahlungsprojekt MAGIC auf der Kanarischen Insel La Palma teil. Gammateleskope registrieren das charakteristische Leuchten von Teilchenschauern, die von hochenergetischer kosmischer Gammastrahlung in der Erdatmosphäre ausgelöst werden. Die Teleskope bestehen aus riesigen Spiegelsystemen, die das atmosphärische Leuchten dieser Luftschauer auf milliardstel Sekunden schnelle Kameras fokussieren. So lässt sich die Richtung bestimmen, aus welcher der Schauer – und damit die verursachende Gammastrahlung – kam. Solche Teleskope stehen auf hohen Bergen und möglichst weit ab von störenden Lichtquellen, zum Beispiel auf La Palma im Atlantischen Ozean (MAGIC) oder in Namibia (H.E.S.S.).

Das Gammastrahlungsteleskop MAGIC auf der Kanarischen Insel La Palma

Der Himmel im Licht der Gammastrahlung

Die Gammateleskope eröffneten in den letzten Jahren ungeahnte Einblicke in die Tiefen des Weltalls. Bisher wurde die Entdeckung von etwa 75 kosmischen Gammastrahlungsquellen veröffentlicht. Die meisten davon stimmen mit bekannten Objekten überein, die auch in anderen Wellenlängenbereichen sichtbar sind: So konnte erstmals gezeigt werden, dass Supernova-Sternexplosionen in der Tat als kosmische Beschleuniger fungieren, die in ihren Schockwellen Teilchen auf hohe Energien bringen. Auch die gigantischen magnetischen und elektrischen Felder von Pulsaren – schnell rotierenden Neutronensternen – sind offenbar kosmische Teilchenbeschleuniger, ebenso wie die Umgebung von schwarzen Löchern im Kern aktiver Galaxien.

Darüber hinaus entdeckten die Forscher auch eine Reihe von „dunklen“ Gammastrahlungsquellen, die bislang in keinem anderen Spektralbereich zu sehen sind. Insbesondere senden diese Quellen weder Röntgenstrahlung noch Radiowellen aus, die entstehen, wenn Elektronen auf hohe Energien beschleunigt werden. Womöglich handelt es sich hierbei also um eine bisher unbekannte Art von Himmelskörpern, die ausschließlich Protonen beschleunigen. Da Protonen und Kerne 99 Prozent der geladenen kosmischen Strahlung ausmachen, von der die Erde ständig aus dem Weltall bombardiert wird, könnten diese rätselhaften Gammaquellen den Forschern wertvolle Hinweise auf den Ursprung der kosmischen Strahlung geben.

Gammateleskope der nächsten Generation

Die 75 bisher veröffentlichten Quellen auf der Gamma-Himmelskarte dürften nur die Spitze des Eisbergs sein. Mit Teleskopen, die zehnmal empfindlicher sind als heute, ließen sich hier ganz neue Phänomene entdecken. Auch könnten die Forscher damit entschlüsseln, welcher Mechanismus in kosmischen Quellen in Millionen Lichtjahren Entfernung Teilchen derart beschleunigt, dass sie solch hochenergetisches Licht erzeugen. Solche Teleskope würden es erlauben, die räumliche Struktur und zeitliche Veränderung einer Vielzahl von Quellen im Detail zu untersuchen und somit ein vollständiges astronomisches Bild über das gesamte elektromagnetische Spektrum hinweg zu erhalten.

Um eine zehnmal bessere Empfindlichkeit für Gammastrahlung in einem großen Energiebereich zu erreichen, braucht man mehr als 50 Teleskope mit Durchmessern zwischen 6 und 25 Metern, die über eine Fläche von mindestens einem Quadratkilometer angeordnet sind. Ein solches Observatorium ist derzeit in Vorbereitung: Das Gammateleskop CTA (*Cherenkov Telescope Array*) soll ab 2012 von einem internationalen Konsortium gebaut werden, um mit bisher unerreichter Empfindlichkeit nach kosmischen Hochenergiebeschleunigern zu suchen. CTA wird etwa 1000 Quellen erfassen können und damit das Feld der Gamma-Astronomie auf das Niveau der Astronomie mit Radiowellen oder Röntgenstrahlen heben. Darüber hinaus wird CTA nach Anzeichen für dunkle Materie suchen und vielleicht auch helfen, die Natur der geheimnisvollen dunklen Energie im Kosmos besser zu verstehen. Im Rahmen der Prototypstudie für CTA beteiligen sich DESY-Physiker an Optimierungsrechnungen, der Konstruktion der riesigen Spiegelteleskope sowie der Konzeption eines Operations- und Datenzentrums.

Erste Aufnahme des Gammastrahlungshimmels vom *Fermi Gamma-ray Space Telescope* (früher GLAST), das am 11. Juni 2008 ins All gestartet ist. Das Bild zeigt das glühende Gas der Milchstraße, blinkende Pulsare und eine strahlende Galaxie in Milliarden Lichtjahren Entfernung.

Das erste Bild einer Supernova im Licht der hochenergetischen Gammastrahlung, aufgenommen vom Gammateleskop H.E.S.S. Die Farbskala gibt die Intensität der Gammastrahlung an, die Linien die Intensität des Röntgenlichts. Die Aufnahme beweist, dass die ringförmigen Schockwellen solcher Supernovae als kosmische Teilchenbeschleuniger fungieren.

Das Rätsel der dunklen Materie

Wie zahlreiche experimentelle Befunde nahelegen, besteht der größte Teil des kosmischen Materieinventars nicht aus jener Materie, aus der auch wir bestehen – also nicht aus Protonen, Neutronen und Elektronen –, aber auch nicht aus den anderen bekannten Teilchen, die bisher künstlich an Beschleunigern erzeugt wurden. Diese dunkle Materie ist ähnlich geisterhaft wie Neutrinos und macht sich bis jetzt nur durch ihre Gravitationswirkung bemerkbar. Beste derzeitige Kandidaten für dunkle Materie sind so genannte WIMPs (für *Weakly Interacting Massive Particles*, schwach wechselwirkende massereiche Teilchen), die vermutlich hundert- oder tausendmal so schwer sind wie Protonen.

Solche WIMPs ließen sich am LHC bei CERN möglicherweise künstlich erzeugen. Parallel dazu suchen Forscher in unterirdischen Experimenten nach den winzigen Signalen, die beim Aufprall von WIMPs auf Atomkerne entstehen. Doch auch IceCube und CTA könnten indirekte Anzeichen für WIMPs nachweisen, da diese Teilchen sich in Himmelskörpern ansammeln und bei ihren gelegentlichen gegenseitigen Vernichtungsreaktionen Neutrinos oder Gammastrahlen aussenden müssten. Damit gehen die Forscher eines der spannendsten Probleme der Physik von drei verschiedenen Seiten an.

DENK FABRIK.

Theorie
Die Suche nach der Weltformel

Ohne sie wäre das beste Experiment nichts wert: Die theoretische Teilchenphysik ergründet das große Bild, das den experimentellen Ergebnissen zugrunde liegt. Um die Welt der kleinsten Teilchen und ihre physikalischen Gesetze zu erklären, nutzen die Theoretiker bei DESY zahlreiche mathematische Hilfsmittel. Diese wenden sie nicht nur mit der Hilfe von Bleistift und Papier an, sondern auch mit speziell entwickelten Höchstleistungsrechnern. Die enge Verbindung von Experiment und Theorie ist hier unerlässlich: Nur gemeinsam sind Theoretiker und Experimentalphysiker in der Lage, der Natur ihre Geheimnisse abzuringen und – so die Hoffnung der Forscher – nach und nach eine umfassende Theorie aller Teilchen und Kräfte auszuarbeiten.

Hand in Hand

Auch das überaus erfolgreiche Standardmodell, die gängige Theorie der Teilchenphysik, ist aus dem intensiven Zusammenspiel von Theorie und Experiment entstanden. So sagte zum Beispiel die Theorie der starken Wechselwirkung, die Quantenchromodynamik, voraus, dass die Kraft zwischen den Quarks von so genannten Gluonen übertragen werden sollte. Diese Klebeteilchen zwischen den Quarks wurden 1979 am PETRA-Beschleuniger bei DESY entdeckt. Auch die Existenz von Antimaterie oder Neutrinos wurde zuerst von Theoretikern gefordert und anschließend von Experimentatoren bestätigt.

Umgekehrt beobachten die Teilchenphysikexperimente ebenfalls immer wieder Phänomene, die den bekannten theoretischen Rahmen sprengen und somit eine Überarbeitung der Theorie erforderlich machen. So entdeckten die Physiker am DORIS-Beschleuniger bei DESY 1987, dass sich Teilchen namens B-Mesonen in ihre Antiteilchen umwandeln können, und zwar mit überraschend hoher Umwandlungsrate. Daraus ließ sich ableiten, dass auch die Masse des damals noch fehlenden sechsten Quarks, des top-Quarks, viel größer sein musste als bis dahin angenommen. Auch die am DESY-Speicherring HERA entdeckte „brodelnde Suppe“ von Quarks und Gluonen im Proton (siehe S. 14) hat zahlreiche neue theoretische Entwicklungen angeregt, anhand derer das Bild der starken Kraft erweitert und verfeinert wird.

Die DESY-Theoretiker erforschen die vielfältigen Facetten des Standardmodells und streben darüber hinaus nach neuen Erkenntnissen, die das Modell in eine umfassende Theorie der Materie und Kräfte einbetten – Ideen, die für die Experimente am LHC in Genf sowie am geplanten Linearbeschleuniger ILC von höchstem Interesse sind. Im Vordergrund stehen dabei fundamentale physikalische Fragen zur Erzeugung von Masse und zur Vereinigung der Grundkräfte der Natur, die letztlich auch die Gravitation mit einschließen muss.

Das Standardmodell ...

Ein Schwerpunkt der Erforschung des Standardmodells liegt auf der Quantenchromodynamik (QCD), der Theorie der starken Wechselwirkung, die die innerste Struktur der Protonen und Neutronen beschreibt. Die grundlegenden Fragen der QCD lassen sich nicht mit Standardmethoden berechnen, sondern erfordern neue Techniken, Methoden der String-

physik oder den Einsatz von Supercomputern mit extrem hoher Rechenleistung. Solche Höchstleistungsrechner wurden von DESY in Zusammenarbeit mit Einrichtungen in Italien und Frankreich entwickelt, sie werden von den Forschern im John von Neumann-Institut für Computing (NIC) und den Theoretikern in Zeuthen genutzt.

Als eine der zentralen Aufgaben im Standardmodell ergründen die DESY-Theoretiker den Higgs-Mechanismus, der den Teilchen zu ihrer Masse verhelfen soll und der das entscheidende verbleibende Problem des Modells darstellt. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Physik der B-Mesonen (Teilchen, die das zweitschwerste Quark des Standardmodells, das bottom-Quark, enthalten), die Aufschluss über das unterschiedliche Verhalten von Materie und Antimaterie in den Naturgesetzen gibt. Diese fundamentale Asymmetrie von Materie und Antimaterie ist eine Grundvoraussetzung für die Lösung eines der bedeutendsten Rätsel der Kosmologie: den Überschuss von Materie gegenüber der Antimaterie im heutigen Universum.

... und darüber hinaus

Obwohl das Standardmodell der Teilchenphysik außerordentlich erfolgreich ist, lässt es wesentliche Fragen offen. Die Physiker loten deshalb verschiedene Möglichkeiten aus, das Modell zu erweitern und in eine umfassende Theorie einzubetten, die diese Fragen beantworten kann. Eine theoretisch sehr gut begründete und physikalisch attraktive Erweiterung ist die Supersymmetrie, die jedem Teilchen ein neuartiges Partnerteilchen zur Seite stellt. Die DESY-Theoretiker suchen nach Mechanismen, die für die große Masse dieser Superpartner verantwortlich sind, und sie erforschen Wege, wie diese Teilchen am LHC, ILC und in kosmologischen Experimenten entdeckt und ihr Profil bestimmt werden kann.

Die Stringtheorie ist der wohl überzeugendste heutzutage bekannte Ansatz für eine umfassende Theorie von Materie und Kräften. Sie beruht auf der fundamentalen Idee, die Elementarteilchen nicht als punktförmige Gebilde, sondern als winzige, schwingende Fäden (engl.: *strings*) zu beschreiben. In enger Verbindung mit der Supersymmetrie führt die Stringtheorie Teilchenphysik und Gravitation in ein einheitliches Konzept zusammen. Aus Gründen mathematischer Konsistenz können supersymmetrische Stringtheorien nur in einer zehndimensionalen Raumzeit konstruiert werden. Sechs dieser Dimensionen müssen daher so klein aufgerollt sein, dass man sie zumindest bisher nicht direkt beobachten konnte. Zusammen mit den Physikern der Universität Hamburg beschäftigen sich die Theoretiker bei DESY unter anderem mit den faszinierenden Rätseln der Stringtheorie selbst. Gleichzeitig versuchen sie auch, neues Licht auf einige der grundlegendsten Aspekte der Physik zu werfen, wie etwa die Frage nach Ursprung und Entwicklung des Universums.

Das Forschungsprogramm der DESY-Theoretiker umfasst zahlreiche kosmologische Fragestellungen, die eng mit der Teilchenphysik zusammenhängen: Was ist die Struktur von Raum und Zeit bei kleinen Abständen? Können in Teilchenkollisionen in Beschleunigern oder in der Atmosphäre winzige schwarze Löcher entstehen, und wie ließen sie sich eventuell nachweisen? Gibt es superschwere Partnerteilchen der leichten Neutrinos, die zum Ungleichgewicht von Materie und Antimaterie im Universum beitragen könnten? Die DESY-Theoretiker erforschen eine ganze Reihe dieser Fragen, die den Mikrokosmos untrennbar mit der Struktur und Geschichte des Universums verknüpfen.

Theorie bei DESY

Physik des Standardmodells:
- **Higgs-Mechanismus, störungstheoretische Methoden**
- **Quantenchromodynamik (QCD), String- und Computermethoden**

Physik jenseits des Standardmodells:
- **Supersymmetrie**
- **Stringtheorie**

Kosmologie:
- **Materie-Antimaterie-Asymmetrie im Universum**
- **Dunkle Materie**

LHC UND ILC.

Physik an Beschleunigern

Ein Modell mit Lücken

Unser Wissen über die Naturgesetze im Mikrokosmos hat in den letzten Jahrzehnten enorme Fortschritte gemacht – was insbesondere den Experimenten an Hochenergiebeschleunigern zu verdanken ist. In engem Zusammenspiel mit der Theorie konnte aus den Ergebnissen ein bestechend einfaches Bild der Grundbausteine der Materie und der zwischen ihnen wirkenden Kräfte entwickelt werden, das im Standardmodell der Teilchenphysik zusammengefasst ist. Das Modell ist experimentell allerdings nicht abgeschlossen: Noch ist der Mechanismus nicht nachgewiesen, der die Masse der fundamentalen Teilchen erzeugt, und auch die Neutrinos haben ihre Geheimnisse bisher nur eingeschränkt preisgegeben.

Obwohl theoretisch konsistent, lässt das Standardmodell tiefgehende Fragen unbeantwortet – so zum Beispiel nach der Vereinigung aller Naturkräfte einschließlich der Gravitation, nach der Natur der dunklen Materie oder dem Ursprung des Ungleichgewichts von Materie und Antimaterie im Universum. Von LHC und ILC, den Teilchenbeschleunigern der nächsten Generation mit ihren Energien im Bereich der Teraskala (Tera-Elektronenvolt), erhoffen sich Experimentalphysiker wie Theoretiker entscheidende Schritte zu einer umfassenden Theorie der Materie und Kräfte sowie zur Verbindung von Mikrokosmos und Kosmologie.

Mit Analyseprogrammen, die von DESY-Theoretikern mit entwickelt wurden, kann aus Präzisionsdaten des LEP-Beschleunigers bei CERN der mögliche Massenbereich für das Higgs-Teilchen berechnet werden. Massenwerte in der Talsohle der Parabeln sind am wahrscheinlichsten. (Die grauen Bereiche wurden bereits experimentell ausgeschlossen. Die obere Grenze liegt bei etwa 160 GeV.)

Einblick in die fundamentalen Kräfte

Mit den Beschleunigern PETRA und HERA, an denen die starke Kraft experimentell erforscht wurde, und den Analysen der Theoriegruppen, die die experimentellen Ergebnisse mit den physikalischen Grundlagen verknüpfen, hat DESY insbesondere die Entwicklung der starken Wechselwirkung im Standardmodell entscheidend mit geprägt. So wurden bei PETRA 1979 Kollisionsereignisse mit drei Teilchenbündeln („Jets“) entdeckt, mit denen die Gluonen als Träger der starken Kraft zwischen den Quarks etabliert werden konnten – gerade so, wie von der Theorie vorhergesagt. Dank HERA konnte das Wissen über den Aufbau der Protonen aus Quarks und Gluonen weiter verfeinert werden, mit überraschenden Ergebnissen nicht nur im Hinblick auf die große Anzahl von Gluonen im Proton, sondern auch die Verteilung ihrer Spins (siehe S. 14 und 18). Die Analyse der Kopplung zwischen Quarks und Gluonen bestätigte eindrucksvoll die asymptotische Freiheit der QCD, d.h. die Energieabhängigkeit der starken Kraft, die im Übergangsbereich zu hohen Energien stetig schwächer wird (siehe S. 16).

Auch zum Verständnis der elektroschwachen Wechselwirkung – der vereinigten elektromagnetischen und schwachen Kraft – konnte DESY entscheidend beitragen. So bestätigte die Untersuchung von Teilchenzerfällen mit schweren Quarks die theoretische Vorhersage, dass das im Labor beobachtete unterschiedliche Verhalten von Materie und Antimaterie auf komplexe Mischungen zwischen Quarks und Antiquarks zurückgeführt werden kann – eine überzeugende Lösung für ein langjähriges Rätsel.

Der Higgs-Mechanismus

Eine der wichtigsten Fragestellungen, die von DESY-Theoretikern in den vergangenen Jahren mit entwickelt wurden, betrifft den Higgs-Mechanismus. Das Standardmodell erklärt die Masse der fundamentalen Teilchen als Wechselwirkungsenergie mit dem Higgs-Feld, das sich gleichmäßig über das gesamte Universum erstreckt. Diesem Feld ist ein Teilchen mit charakteristischen Eigenschaften zugeordnet. Ob der Higgs-Mechanismus tatsächlich für die Erzeugung von Masse verantwortlich ist, steht und fällt mit der experimentellen Entdeckung dieses Higgs-Teilchens. Aus Präzisionsmessungen am ehemaligen Elektron-Positron-Beschleuniger LEP bei CERN kann die Masse des Higgs-Teilchens im Standardmodell eingegrenzt werden (siehe Abb. links).

In Theorien, die die Gravitation mit einschließen, können sich die Massen der supersymmetrischen Partner von Quarks (D_1, Q_1, U_1) und Leptonen (E_1, L_1) sowie von Higgs-Bosonen (H_2) bei hohen Energien auf natürliche Weise zu einem universellen Wert vereinigen – ähnlich den vereinigten Kopplungsstärken der Kräfte. Präzisionsmessungen bei LHC und ILC werden es erlauben, die Massen theoretisch zu hohen Energien zu extrapolieren, so dass die zentrale Frage der Universalität experimentell überprüft werden kann.

Ist die Masse des Higgs-Teilchens festgelegt, so lassen sich all seine anderen Eigenschaften theoretisch vorhersagen: seine Produktionsmechanismen an Beschleunigern, seine Lebensdauer und Zerfallseigenschaften. Damit hat die theoretische Physik ein sehr genaues Profil dieses Teilchens gezeichnet, das eine zielgerichtete experimentelle Suche am LHC in den nächsten Jahren ermöglicht. Einige der charakteristischen Eigenschaften des Higgs-Teilchens können bereits am LHC studiert werden. Um den Higgs-Mechanismus jedoch als eindeutig bestimmten Mechanismus zur Erzeugung von Masse in all seinen Facetten erforschen zu können, bedarf es eines hochpräzisen Elektron-Positron-Beschleunigers wie des ILC. Durch konzertierte Analysen an LHC und ILC, wie sie allen voran in der DESY-Theorie entwickelt wurden, werden sich die Fragen zum Ursprung der Teilchenmasse letztlich schlüssig beantworten lassen.

Die Supersymmetrie

Die elektromagnetische, schwache und starke Kraft lassen sich auf natürliche Weise vereinigen, wenn jedem Teilchen des Standardmodells ein supersymmetrisches Partnerteilchen zugeordnet wird. Jedem Teilchen mit ganzzahligem Spin wird dabei ein Teilchen mit halbzahligem Spin an die Seite gestellt und umgekehrt. Dieses neuartige Teilchenspektrum erlaubt es, eine Brücke vom Bereich niedriger Energien, in dem das Standardmodell gültig ist, zu jenen extrem hohen Energien zu schlagen, bei denen sich die Grundkräfte der Natur zu einer Urkraft vereinigen.

Theoretische Studien haben die Massen der Teilchen in dieser neuen supersymmetrischen Welt auf die Teraskala eingeschränkt. In diesem Rahmen können die Eigenschaften der Superpartner detailliert vorhergesagt werden, so dass für ihre Entdeckung am LHC und die umfassende Erforschung der supersymmetrischen Theorie am ILC eindeutige Signaturen genutzt werden können. Wenn die Supersymmetrie mit Teilchenmassen im theoretisch erwarteten Massenbereich in der Natur realisiert ist, öffnen LHC und ILC das Tor zu einer faszinierenden neuen Welt. Diese Konzepte sind in den vergangenen Jahren unter Beteiligung von DESY-Theoretikern für den LHC und ILC entwickelt worden. Mit ihrer Hilfe wird man prüfen können, ob sich die Massen supersymmetrischer Teilchen bei extrem hohen Energien genauso vereinigen wie die Kopplungsstärken der Kräfte (siehe Abb. rechts). So lässt sich ein klares Bild der supersymmetrischen Materie bei hohen Energien entwickeln – in jenem fundamentalen Bereich, in dem die Wurzeln der Teilchenphysik und zugleich der Kosmologie liegen.

In den meisten Modellen ist das leichteste supersymmetrische Teilchen stabil oder sehr langlebig. Es ist damit ein ausgezeichneter Kandidat für die dunkle Materie im Universum. Wenn die Spuren dieses Teilchens am LHC gefunden und seine Eigenschaften am ILC bestimmt werden könnten, würde sich ein fantastischer Kreis zwischen Teilchenphysik und Kosmologie schließen (siehe S. 54).

Alternativen?

Mit dem Higgs-Teilchen würde das erste fundamentale Teilchen ohne Spin in der Natur entdeckt. Wäre es das einzige? Der Supersymmetrie zufolge müsste es mehrere Teilchen dieser Art geben. Alternative Theorien dagegen negieren die Existenz des Higgs-Teilchens und postulieren stattdessen neue Wechselwirkungen. Andere reduzieren die Vereinigungsskala – jene extrem hohen Energien, bei denen die Gravitation mit den Kräften der Teilchenphysik in Wechselwirkung tritt – auf den Bereich der Teraskala. Damit würden zusätzliche Raumdimensionen des Universums in experimentelle Reichweite rücken, und auch mikroskopisch kleine schwarze Löcher könnten an Beschleunigern wie dem LHC erzeugt werden.

Welcher dieser umfassenden Theorien der Materie und Kräfte die Natur den Vorzug gegeben hat, der Supersymmetrie oder möglichen Alternativen, werden die Experimente am LHC in Kürze enthüllen. Wie auch immer die experimentellen Antworten auf unsere theoretischen Fragen lauten werden – die Hochenergiephysik wird in den nächsten Jahren entscheidende Erkenntnisse über die Struktur des Universums liefern.

SUPERCOMPUTER.

Hochleistungsrechnen in der Teilchenphysik

Physik auf dem Gitter

Die starke Kraft, die zwischen den Quarks wirkt, spielt in der Teilchenphysik eine zentrale Rolle; sie muss bei der Interpretation nahezu aller Teilchenphysikexperimente berücksichtigt werden. Doch wie lässt sich ihr Einfluss überhaupt rechnerisch in den Griff bekommen? Ausgerechnet bei den Abständen, bei denen das für die starke Kraft charakteristische *Confinement* (siehe Kasten) einsetzt, versagen die erprobten mathematischen Methoden, die über Jahrzehnte hinweg verwendet wurden, um die Gleichungen mit Papier und Bleistift zu lösen. Glücklicherweise fand man schon kurz nach der Entdeckung der mathematischen Grundgleichungen der Quantenchromodynamik (QCD), der gängigen Theorie der starken Kraft, eine passende Lösung: die Gittereichtheorie. Dabei nutzen die Physiker einen Kunstgriff, der es ihnen erlaubt, die Gleichungen mit Hilfe von Computern mit großer Rechenleistung immer genauer zu lösen. Die grundlegende Idee ist, Raum und Zeit, die in Wirklichkeit kontinuierliche Größen sind, durch ein Gitter aus einzelnen Zellen zu ersetzen. Da die Physik dann nur noch auf diesem Gitter und nicht mehr in den Zwischenräumen stattfindet, werden die Berechnungen einfacher. Allerdings sind dafür immer noch Supercomputer mit extrem hoher Rechenleistung erforderlich.

Supercomputer in Zeuthen

Während die mathematische Struktur der Gittereichtheorie in den 1980er und Anfang der 1990er Jahren insbesondere bei DESY in Hamburg mit enträtselt wurde, liegt der Schwerpunkt der Aktivitäten mittlerweile bei DESY in Zeuthen, wo mehrere europäische Kollaborationen koordiniert werden. Hier werden in enger Zusammenarbeit mit dem John von Neumann-Institut für Computing (NIC), das DESY gemeinsam mit dem Forschungszentrum Jülich gegründet hat, die Simulationen der Gittereichtheorien durchgeführt. Die Zeuthener Forscher leisten zudem Entwicklungsarbeit für die massivparallelen Supercomputer, die bei den Rechnungen zum Einsatz kommen.

Bei der Gittereichtheorie ist die Anzahl der Gitterzellen eine entscheidende Größe: Je mehr Zellen in den Rechnungen betrachtet werden, desto genauer sind die Ergebnisse. Die Präzision der Rechnungen verbessert sich daher nicht nur dank der Weiterentwicklung mathematischer und numerischer Verfahren, sondern auch durch den enormen Fortschritt in der Rechengeschwindigkeit der Computer. Heutzutage lassen sich Multimillionen Zellen auf Supercomputern simulieren, die aus tausenden einzelnen Prozessoren aufge-

Installation eines apeNEXT-Systems bei DESY in Zeuthen

baut sind. Solche speziell für die numerischen Probleme der Teilchenphysik zugeschnittenen Höchstleistungsrechner vom Typ APE haben die DESY-Physiker in Zeuthen in Zusammenarbeit mit dem *Istituto Nazionale di Fisica Nucleare* (INFN) in Italien und der Universität Paris-Sud in Frankreich entwickelt.

Höchstleistungsrechner für die Forschung

Bei solchen Rechnungen kommt es vor allem darauf an, eine möglichst große Anzahl von Operationen mit Gleitkommazahlen durchzuführen. Das entscheidende Leistungskriterium der eingesetzten Computer bemisst sich daher in Gleitkommaoperationen pro Sekunde (FLOPS, *floating point operations per second*). Die derzeit erreichbare Rechenleistung von vielen TeraFLOPS (1 TeraFLOPS = 1 000 000 000 000 FLOPS) kann nicht von einem einzelnen Prozessor geleistet werden, vielmehr muss man zahlreiche Prozessoren durch ein schnelles Netzwerk zusammenschalten. Diese massivparallelen Rechner müssen trotz ihrer hohen Komplexität im Dauerbetrieb über viele Wochen fehlerfrei arbeiten. Für einen kostengünstigen Einsatz sind außerdem geringer Stromverbrauch und kompakte Bauweise wichtig, nicht zu vergessen eine hohe Effizienz für die Simulationen der Gittereichtheorie. Diesbezüglich können die APE-Rechner mit teilweise über 50 Prozent glänzen – selbst, wenn zum Beispiel 1024 Prozessoren zusammenarbeiten.

Die von DESY, INFN und der Universität Paris-Sud für die APE-Rechner entwickelten innovativen Konzepte haben sogar die Architektur der derzeit schnellsten Computer der Welt beeinflusst, die von der Firma IBM gebaut werden. Auch hier geht die Entwicklung unaufhörlich weiter. Zusammen mit den Universitäten Regensburg und Wuppertal sowie IBM arbeiten die DESY-Physiker an einem Computer, der für die anspruchsvollen Rechnungen der Quantenchromodynamik alle Rekorde an Energie- und Kosteneffizienz schlägt. Dazu sollen tausende Rechenchips der PlayStation 3 von Sony intelligent verknüpft werden.

Von Gluebällen und vereinigten Kräften

Die Quantenchromodynamik stellt die Theoretiker und ihre Höchstleistungsrechner vor zahllose Herausforderungen. So weiß man seit längerem, dass es in der Welt der Hadronen auch Gluebälle geben sollte. Das sind Teilchen, die fast gänzlich aus Gluonen bestehen – jenen Klebeteilchen, die in herkömmlichen Hadronen die Quarks zusammenhalten. Experimentell ist es bisher allerdings nicht gelungen, Gluebälle eindeutig zu identifizieren, weil sie sich nur schwer von komplizierten gebundenen Zuständen aus Quarks und Gluonen unterscheiden lassen. Um die Existenz von Gluebällen zu bestätigen, sind detaillierte Rechnungen der Theoretiker sowie hochpräzise Experimente erforderlich. Dabei kann der Vergleich von theoretisch vorhergesagten und experimentell bestimmten Teilchenmassen wertvolle Anhaltspunkte geben. Letzte Gewissheit ist jedoch ohne eine genaue Analyse der möglichen Produktions- und Zerfallsmechanismen solcher Gluebälle kaum zu erreichen. Auch solche Rechnungen können nur mit Hilfe entsprechender Supercomputer durchgeführt werden, wie sie in Zeuthen mit entwickelt werden.

Eine immer höhere Präzision der QCD-Rechnungen ist zudem für theoretische Studien zur Vereinigung der Grundkräfte der Natur wichtig (siehe S. 17). Denn aus diesen Rechnungen lässt sich auch die genaue Größe der starken Kraft bestimmen. Nur so können die Theoretiker letztendlich vorhersagen, bei welchen Energien sich die starke Kraft mit der elektromagnetischen und der schwachen Kraft vereinigt.

Sonderbare starke Kraft

Teilchen aus der Familie der Hadronen – wie Protonen und Neutronen, die Bausteine der Atomkerne – bestehen aus Quarks, die durch Gluonen, die Austauschteilchen der starken Kraft, zusammengehalten werden. Noch nie hat man jedoch ein einzelnes Quark beobachtet. Dieses Phänomen wird einer besonderen Eigenschaft zugeschrieben, dem *Confinement* (engl. für „Gefängnishaft"), das die starke Kraft von den anderen Naturkräften unterscheidet. Die Schwerkraft z.B. macht sich kaum noch bemerkbar, wenn man zwei Körper weit genug voneinander entfernt – deshalb können wir Raumschiffe zu entfernten Planeten schicken. Im Gegensatz dazu behält die starke Kraft beim Versuch, zwei Quarks zu trennen, auch bei beliebig großen Abständen eine enorme Anziehungswirkung – ganz so, als seien die Quarks durch eine Feder miteinander verbunden. Solange sie sich dicht beieinander befinden, bleibt die Feder entspannt und hat nur geringe Auswirkungen. Versucht man jedoch, sie auseinander zu bewegen, macht sich die Federspannung immer stärker bemerkbar. Damit sind die Quarks quasi in den Hadronen eingesperrt.

Dieses *Confinement* lässt sich im Rahmen der gängigen Theorie der starken Kraft, der Quantenchromodynamik (QCD), nicht einfach erklären. Solange sich die Quarks dicht beieinander befinden und die starke Kraft nur schwach wirkt, liefern die QCD-Rechnungen zuverlässige Vorhersagen. Doch Hadronen können auch in extremere Situationen gebracht werden, in denen sich die Quarks weiter voneinander entfernen, z.B. in den Kollisionen bei HERA und LHC; auch im frühen Universum spielte die starke Kraft zwischen den Quarks wohl eine wesentliche Rolle. Die starke Kraft auch im Bereich großer Abstände effizient zu beschreiben, ist nach wie vor eine bedeutende Herausforderung. Um ihr zu begegnen, werden ganz unterschiedliche Ansätze verfolgt, z.B. die Gittereichtheorie und neuere Entwicklungen in der Stringtheorie (siehe nächste Seite).

STRINGS.

Stringtheorie und Physik an Beschleunigern

Quarks aus Strings?

Die starke Kraft – die insbesondere für das Verständnis der Protonenkollisionen am LHC grundlegend wichtig ist – wirkt etwa so, als seien die einzelnen Quarks durch elastische Fäden miteinander verbunden. Tatsächlich haben die Theoretiker schon früh probiert, die Eigenschaften von Hadronen, also Teilchen aus Quarks und Gluonen, durch das Schwingungsverhalten eindimensionaler Fäden oder Saiten (engl.: *strings*) zu erklären. Aus solchen Versuchen gingen um 1970 die ersten Stringtheorien hervor; deren Anwendung auf die starke Kraft blieb jedoch zunächst wenig erfolgreich.

Nahezu 30 Jahre intensiver Forschung waren nötig, bevor den Stringtheoretikern bei der Beschreibung der Hadronenphysik ein lang ersehnter Durchbruch gelang. Der Stringtheorie zufolge haben die Grundbausteine der Natur nicht die Form punktförmiger Teilchen, sie verhalten sich vielmehr wie eindimensionale Strings. Damit das Ganze mathematisch konsistent ist, muss sich das Universum der Stringtheorie in zehn Raumzeit-Dimensionen ausdehnen. Einige dieser Dimensionen lassen sich jedoch derart „aufrollen“, dass wir sie nicht direkt als tatsächlich existierende Raumrichtungen wahrnehmen. Die Möglichkeit, ein Universum aus solchen elementaren Strings aufzubauen, hat viel Aufmerksamkeit erregt, vor allem deshalb, weil die Stringtheorie seit langem bekannte theoretische Unvereinbarkeiten zwischen der Quantenphysik und Albert Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie der Gravitation auflöst.

In der Stringtheorie werden die Teilchen nicht mehr als punktförmige Objekte, sondern als winzige Fäden oder Saiten – so genannte Strings – angesehen, die in charakteristischen Mustern schwingen können. Die verschiedenen Schwingungszustände entsprechen den verschiedenen Teilchen.

Eine Frage der Sichtweise

Eine Welt aus Strings wäre von unserem vierdimensionalen Universum kaum zu unterscheiden – zumindest, wenn man nicht allzu genau hinsieht. Insbesondere lassen sich aus Strings auch Objekte bilden, die schwarzen Löchern ähnlich sind. Da sich schwarze Löcher ausgezeichnet dazu eignen, die Quantenaspekte der Gravitation zu studieren, wurden sie in den 1990er Jahren intensiv untersucht. Im Rahmen dieser Studien machten die Stringtheoretiker eine bemerkenswerte Entdeckung: Sie fanden heraus, dass die Quantenchromodynamik, also die Theorie der Quarks und Gluonen in einem dreidimensionalen Raum, keineswegs die einzig mögliche Beschreibung hadronischer Physik liefert. Tatsächlich entdeckten die Forscher ganz neue Modelle, mit denen sich die Hadronenphysik als Stringtheorie in einer fünfdimensionalen Raumzeit beschreiben lässt. (Fünf Raumrichtungen des neundimensionalen String-Universums müssen also aufgerollt sein.) Dies mag auf den ersten Blick seltsam erscheinen. Denn daraus folgt, dass wir nicht grundsätzlich unterscheiden können, ob unsere reale Welt vier- oder fünfdimensional ist – alles hängt davon ab, ob wir sie als eine Welt aus Teilchen oder Strings betrachten!

So überraschend die Existenz von zwei gänzlich verschiedenen Beschreibungen ein und derselben Realität zunächst erscheinen mag, ist das Phänomen doch nicht ganz ungewöhnlich. Ähnliches passiert zum Beispiel bei einer Fotografie, die entweder über die Chemie eines herkömmlichen Films oder als eine Folge von Bits – also Nullen und Einsen – in modernen Digitalkameras gespeichert sein kann. Obwohl

das zugrunde liegende Bild dasselbe ist, könnte dessen Darstellung in der Kamera kaum unterschiedlicher sein. Selbstverständlich lassen sich die beiden Darstellungen mit Hilfe der entsprechenden Technologie ineinander umwandeln.

Stringtheorie auf dem Vormarsch

Jede der beiden bekannten Beschreibungen der Hadronenphysik – die Quantenchromodynamik bzw. einige ihrer supersymmetrischen Verwandten sowie die Stringtheorie – hat ihre eigenen Vorzüge. Die Quantenchromodynamik bietet hochentwickelte Werkzeuge für die Untersuchung von hadronischen Systemen, die gut handhabbar sind, solange der Abstand zwischen den Quarks klein bleibt. Das intuitive Bild der starken Wechselwirkung als Federkraft lässt erwarten, dass man mit den Methoden der Stringtheorie Vorhersagen gerade im Bereich der sonst so schwer zugänglichen großen Quarkabstände machen kann, und zwar wiederum nur mit Papier und Bleistift. Der Zwischenbereich mittlerer Quarkabstände bleibt derzeit vorwiegend den Supercomputern der Gittereichtheoretiker vorbehalten. Allerdings gibt es inzwischen einige spektakuläre Beispiele, in denen Berechnungen der Stringtheorie für beliebige Abstände zwischen den Quarks ausgeführt werden konnten, ganz ohne die Unterstützung von Hochleistungsrechnern.

Neuere Experimente an Schwerionenbeschleunigern weisen darauf hin, dass die Stringtheorie große Abstände zwischen den Quarks in der Tat sehr effizient beschreibt. Wenn zwei schwere Ionen zusammenstoßen, bilden die zahlreichen Quarks und Gluonen in ihren Kernen einen Tropfen „Quark-Gluon-Suppe“, der anschließend in Form einer Vielzahl von Hadronen verdampft. Bevor es jedoch zum Verdampfen kommt, verhält sich der Tropfen annähernd wie eine Flüssigkeit. Deren Viskosität, d.h. Zähigkeit, lässt sich experimentell messen. Inzwischen ist klar, dass die in solchen Tropfen vorherrschenden Quarkabstände zu groß sind, um die Viskosität mit den üblichen Näherungsmethoden der Quantenchromodynamik noch verlässlich berechnen zu können. Auf der anderen Seite stimmen die Vorhersagen der stringtheoretischen Modelle relativ gut mit den experimentellen Messwerten überein.

Derzeit ist es immer noch sehr schwierig, die Eigenschaften von Hadronen mit Hilfe der Stringtheorie zu berechnen. Während die Rechentechniken in der Quantenchromodynamik über Jahrzehnte hinweg intensiv weiterentwickelt wurden, erfordert die entsprechende Entwicklung der Stringtheorie noch viel Arbeit. Die Stringtheoriegruppe von DESY widmet sich dieser spannenden Aufgabe in Zusammenarbeit mit zahlreichen Partnern auf der ganzen Welt.

Eine ganz neue Sichtweise: Teilchen in unserer vierdimensionalen Raumzeit sind das holographische Abbild einer fünfdimensionalen Welt aus Strings. Hologramm und Urbild enthalten im Prinzip die gleiche Information, kodieren diese aber in sehr verschiedener Weise.

TEILCHENKOSMOLOGIE.

Schnittstelle von Teilchenphysik und Kosmologie

Rätselhaftes Universum

Ein herausragender Erfolg der modernen Kosmologie ist die Bestimmung der Energiedichte des Universums anhand von Messungen des von Supernovae abgestrahlten Lichts und der Analyse der kosmischen Hintergrundstrahlung. Völlig überraschend ist die Zusammensetzung dieser Energiedichte: Die von Planeten, Sternen und interstellarem Gas her bekannte Materie – aus der auch wir Menschen bestehen – trägt nur 4 Prozent dazu bei, während 96 Prozent „dunkel“ sind, Licht also weder absorbieren noch emittieren. Dieser dunkle Anteil offenbart sich in bisherigen Beobachtungen nur indirekt durch seine Gravitationswirkung. Dabei verhalten sich 23 Prozent wie dunkle Materie, die ähnlich der sichtbaren Materie räumliche Strukturen bildet. Der überwiegende Anteil von 73 Prozent, die dunkle Energie, ist dagegen räumlich homogen – sie bildet keine Strukturen, sondern durchdringt gleichmäßig den gesamten Raum – und führt durch ihren negativen Druck zur beschleunigten Ausdehnung des Universums.

Die Frage nach dem Ursprung der sichtbaren Materie sowie der Natur von dunkler Materie und dunkler Energie ist eng mit der Teilchenphysik und ihrer theoretischen Grundlage, der Quantenfeldtheorie, verknüpft. So sind Wechselwirkungen, die bestimmte Erhaltungssätze und Symmetrien verletzen – wie sie in Experimenten an Beschleunigern entdeckt wurden –, Voraussetzung für die Entstehung eines winzigen Überschusses von Materie gegenüber der Antimaterie im frühen Universum. Diesem wiederum haben wir es zu verdanken, dass im heutigen Universum überhaupt Materie existiert. Supersymmetrische Erweiterungen des Standardmodells der Teilchenphysik sagen die Existenz neuer Elementarteilchen – wie Neutralino, Axino oder Gravitino – voraus, die als Hauptbestandteile der dunklen Materie in Frage kommen. Die dunkle Energie dagegen könnte durch Quanteneffekte des Gravitationsfelds oder weiterer Felder erzeugt werden.

Der Zusammenhang zwischen Teilchenphysik und Kosmologie, der heute so viel Interesse hervorruft, gehört bereits seit langem zum Forschungsprogramm der DESY-Theoriegruppe. Schon Ende der 1980er Jahre wurden hier Ideen entwickelt, deren weitreichende Bedeutung erst ein Jahrzehnt später deutlich wurde – so zum Beispiel die Leptogenese zur Erklärung des Materie-Antimaterie-Ungleichgewichts im frühen Universum oder bestimmte Erweiterungen der Theorie der Gravitation, die heute eine wichtige Rolle in der Diskussion über die Natur der dunklen Energie spielen.

Mehr Materie als Antimaterie

Im frühen Universum war die Dichte von Quarks, Antiquarks, Leptonen, Antileptonen und Photonen etwa gleich groß. Heute beobachtet man dagegen ein Ungleichgewicht von Materie gegenüber der Antimaterie, die so genannte

Theoretische Studien zur Leptogenese: Die Abbildung zeigt die berechnete Baryonenasymmetrie als Funktion der Masse M_1 des zerfallenden schweren Neutrinos und einer effektiven Masse $\tilde{m}_1$ der leichten Neutrinos. Der berechnete Wert muss mit der anhand der kosmischen Hintergrundstrahlung (CMB) bestimmten Baryonenasymmetrie ($\eta_{B0} = 6 \times 10^{-10}$) übereinstimmen. Entsprechend der theoretischen Analyse wurde die Materie-Antimaterie-Asymmetrie im frühen Universum für eine typische Masse von $M_1 = 10^{10}$ GeV zu einer Zeit $t = 10^{-26}$ s nach dem Urknall erzeugt.

Temperaturschwankungen der kosmischen Hintergrundstrahlung, aufgenommen von der Raumsonde WMAP.

Baryonenasymmetrie. Diese entsprach damals einem winzigen Überschuss von Quarks im Vergleich zu Antiquarks und einem entsprechenden winzigen Überschuss von Leptonen im Vergleich zu Antileptonen. Eine solche Asymmetrie kann durch den Zerfall schwerer Neutrinos erzeugt werden, die durch ihre quantenmechanische Mischung mit leichten Neutrinos deren – in Experimenten zu Neutrinooszillationen beobachtete – sehr kleine Massen hervorrufen. Entscheidend ist dabei, dass der Zerfall dieser schweren Neutrinos die CP-Symmetrie verletzt, wodurch unterschiedliche Häufigkeiten von Leptonen und Antileptonen erzeugt werden.

Die Größe der erzeugten Baryonenasymmetrie ist abhängig von den Eigenschaften der Neutrinos, ihren Massen und Mischungen. Auch hierzu führt die DESY-Theoriegruppe detaillierte Studien durch. So ergibt sich zum Beispiel aus theoretischen Analysen, dass die Materie-Antimaterie-Asymmetrie im frühen Universum für bestimmte typische Massen der Neutrinos 10^{-26} Sekunden nach dem Urknall erzeugt wurde. Damit eröffnet sich ein faszinierender Zusammenhang zwischen der Neutrinophysik und dem Frühstadium des Universums. Es ist äußerst bemerkenswert, dass der experimentelle Hinweis auf die Existenz von Neutrinomassen, der aus Experimenten zu Neutrinooszillationen gewonnen wurde, und der in theoretischen Studien ausgearbeitete Leptogenese-Mechanismus quantitativ konsistent sind. Dies hat zu einer Vielzahl von Untersuchungen geführt, die vor allem in supersymmetrischen Theorien auf die Entdeckung weiterer Prozesse hoffen lassen, die zum Verständnis des Materie-Antimaterie-Ungleichgewichts im Universum beitragen könnten.

Dunkle Materie

Ein mathematisches Konzept, das über das Standardmodell der Teilchenphysik hinausführt, ist die Supersymmetrie, die jedem Teilchen ein supersymmetrisches Partnerteilchen zuordnet. In vielen supersymmetrischen Erweiterungen des Standardmodells ist das leichteste dieser neuen Superteilchen (*Lightest Supersymmetric Particle*, kurz LSP) elektrisch neutral und stabil. Ein populärer Kandidat für das LSP ist das Neutralino, ein Superpartner von Photon, Z-Boson und Higgs-Teilchen. In den Experimenten am LHC sollten in diesem Fall charakteristische Ereignisse zu beobachten sein, die scheinbar das Gesetz der Energieerhaltung verletzen, da ein Teil der Gesamtenergie in Form von Neutralinos unbeobachtet aus den Detektoren entweicht. Über die schwache Kraft könnten Neutralinos der dunklen Materie auch an normaler Materie streuen und damit in Laborexperimenten direkt nachgewiesen werden.

Die Untersuchung des Leptogenese-Mechanismus weist auf eine weitere Möglichkeit hin: Die dunkle Materie könnte auch aus Gravitinos bestehen, den supersymmetrischen Partnerteilchen von Gravitonen, welche die Schwerkraft vermitteln, so wie Photonen die Träger der elektromagnetischen Kraft sind. Unter bestimmten Voraussetzungen könnten die Gravitinos in gewöhnliche Teilchen, insbesondere Photon-Neutrino-Paare, zerfallen. Experimentelle Hinweise zu dieser Hypothese könnten von Gammastrahlungsteleskopen und dem LHC kommen: Mit Satellitenexperimenten lässt sich der innerhalb und außerhalb der Milchstraße erzeugte Fluss von Photonen messen, der ein charakteristisches Energiespektrum besitzt. Dabei beobachtete das satellitenbasierte Gammastrahlungsteleskop EGRET Ende der 1990er Jahren eine Anomalie im Photonenfluss. Diese lässt sich mit dem von der Gravitino-Hypothese vorhergesagten Effekt erklären. Falls diese Hypothese tatsächlich stimmt und die dunkle Materie aus Gravitinos besteht, sollte auch das im Juni 2008 gestartete Weltraumteleskop *Fermi Gamma-ray Space Telescope* (früher GLAST genannt) in den nächsten Jahren ein Signal beobachten; und am LHC sollten charakteristische Zerfälle anderer schwerer Superteilchen entdeckt werden. Damit könnte es also sein, dass das Geheimnis der dunklen Materie innerhalb der nächsten fünf Jahre aufgeklärt wird. Auf der Suche nach der Weltformel wäre damit ein wichtiges Etappenziel erreicht.

Wir danken allen, die an der Entstehung dieser Broschüre mitgewirkt haben, für ihre tatkräftige Unterstützung.

IMPRESSUM.

Herausgeber
Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY
Ein Forschungszentrum der Helmholtz-Gemeinschaft

Standort Hamburg: Notkestraße 85, D-22607 Hamburg
Tel.: +49 40 8998-0, Fax: +49 40 8998-3282
desyinfo@desy.de, www.desy.de

Standort Zeuthen: Platanenallee 6, D-15738 Zeuthen
Tel.: +49 33762 7-70, Fax: +49 33762 7-7413
desyinfo.zeuthen@desy.de

Autorin
Ilka Flegel, Textlabor, Jena

Realisation und Redaktion
Ute Wilhelmsen
Ilka Flegel, Textlabor, Jena

Design
Jung von Matt/brand identity GmbH, Hamburg

Layout
Heike Becker

Druck
HeigenerEuroprint GmbH, Hamburg

Redaktionsschluss
Mai 2009

Nachdruck, auch auszugsweise, unter Nennung der Quelle gerne gestattet.

Fotos und Grafiken
DESY
Bohm und Nonnen, Büro für Gestaltung GmbH, Darmstadt
CERN
Peter Ginter, Lohmar
Rüdiger Nehmzow, Düsseldorf
David Parker, Science Photo Library, London
Option Z, Thomas Plettau, Frankfurt
Christian Schmid, Hamburg
Manfred Schulze-Alex, Hamburg

Seite 40:	NASA/CXC/ASU/J. Hester et al. (Röntgenbild), NASA/HST/ASU/J. Hester et al. (optisches Bild)
Seite 44/45:	Robert Wagner, MPI für Physik
Seite 45:	Max-Planck-Institut für Kernphysik
Seite 45:	NASA/DOE/International LAT Team
Seite 52/53:	NASA, ESA, S. Beckwith (St Scl) and the HUDF Team
Seite 55:	NASA/WMAP Science Team

HELMHOLTZ
GEMEINSCHAFT

Deutsches Elektronen-Synchrotron
Ein Forschungszentrum der Helmholtz-Gemeinschaft

Die Helmholtz-Gemeinschaft leistet Beiträge zur Lösung großer und drängender Fragen von Gesellschaft, Wissenschaft und Wirtschaft durch wissenschaftliche Spitzenleistungen in sechs Forschungsbereichen.
Sie ist mit 28 000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern in 16 Forschungszentren und einem Jahresbudget von rund 2,8 Milliarden Euro die größte Wissenschaftsorganisation Deutschlands. Ihre Arbeit steht in der Tradition des großen Naturforschers Hermann von Helmholtz (1821–1894).

www.helmholtz.de