

# Was die Welt zusammenhält - die Suche nach den fundamentalen Bausteinen der Natur

Thomas Müller, Institut für Experimentelle Kernphysik IEKP,  
Centrum für Elementarteilchenphysik und Astroteilchenphysik CETA

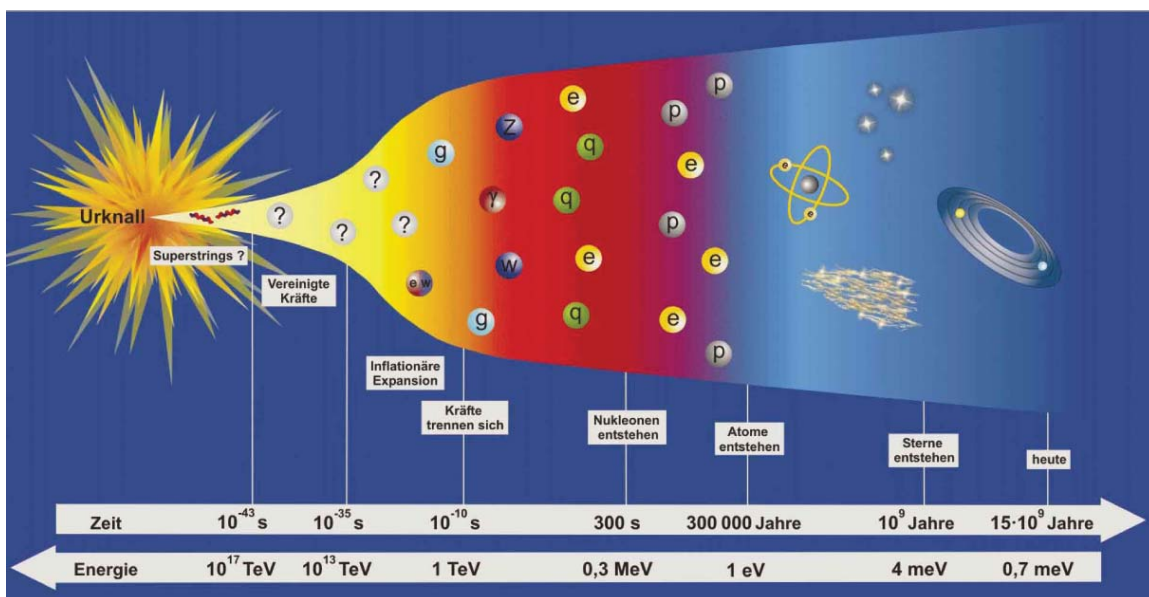
## 1. Einleitung

Die Frage nach den fundamentalen Bausteinen der Natur haben sich Menschen seit Urzeiten gestellt. Insbesondere die Griechen haben Denkansätze gegeben, die unser modernes Weltbild entscheidend geformt haben. Vergleichen wir die Aussage von Anaxagoras (500 – 425 v. Chr.): „Denn weder gibt es beim Kleinen ja ein Kleinstes, sondern stets ein noch Kleineres (denn es ist unmöglich, daß das Seiende zu sein aufhöre) – aber auch beim Großen gibt es immer ein Größeres“ mit der von Demokrit (460 – 370 v. Chr.): „Der gebräuchlichen Redeweise nach gibt es Farbe, Süßes, Bitteres, in Wahrheit aber nur die Atome und das Leere“. Beide scheinen sich zu widersprechen. Einerseits glauben wir wie Demokrit an die Existenz fundamentaler Bausteine. Blicken wir aber zurück, so haben wir auf der Suche nach den fundamentalen Bausteinen ganz im Sinne von Anaxagoras noch stets neue „kleinere“ Bauteile gefunden. Eng verknüpft mit dieser Suche ist die Suche nach den fundamentalen Gesetzen, die das Zusammenwirken der Bausteine beschreiben. Das erlangte Wissen erlaubt uns Rückschlüsse auf die frühe Entstehungsgeschichte des Universums, so wie umgekehrt astronomische Beobachtungen, denen wir überhaupt die Kenntnis einer explosionsartigen Entstehung verdanken, Voraussagen über die Teilchen und ihre Kräfte erlauben. Diese Interdependenz ist erst in den letzten Jahrzehnten deutlich geworden, und eine zunehmende Zusammenarbeit der verschiedenen Forschungsrichtungen Elementarteilchenphysik, Kernphysik, Astroteilchenphysik, Astrophysik und Astronomie ist nunmehr die Grundlage für die Schaffung unseres modernen Weltbildes.

Abb. 1 zeigt das Schema, wie vor 13,6 Milliarden Jahren das Universum in einem Urknall entstanden ist und sich bei der explosionsartigen Ausdehnung auf die heutige Temperatur von 2,7 K abgekühlt hat [1]. Dabei ist die Temperatur des Universums ein Maß für die Geschwindigkeit (bzw Energie) der sich in ihm befindenden Teilchen und deren Stoßhäufigkeit. In Abb. 1 ist die mittlere Energie der Teilchen im Universum in Einheiten von Elektronvolt (eV) angegeben. 0,7 meV (Millielektronvolt) entsprechen einer Temperatur von 2,7 K. Wie aus der grundlegenden Formel Einsteins  $E = mc^2$  hervorgeht, können Masseteilchen und deren Antiteilchen paarweise aus Energie entstehen; ebenso können sich solche Teilchenpaare auch zu Energie in Form von Strahlung vernichten, wenn sie aufeinandertreffen. Zu dieser Strahlung gehören Photonen. Bei der Abkühlung durchlief das Universum sämtliche Phasen der Entstehung fundamentaler Teilchen

(und ihrer Kräfte), die sich schließlich entweder in Photonen vernichteten oder gebundene Objekte bildeten.

Bereits 300000 Jahre nach dem Urknall entstanden die uns vertrauten Atome – allerdings fast ausschließlich Wasserstoff und Helium – mit dem Resultat, daß das Universum durchsichtig wurde und die zuvor im heißen Plasma gefangenen Photonen frei wurden. Die in großen Radioantennen beobachtete Kosmische Hintergrundstrahlung entspricht dieser während der Expansion des Universums „abgekühlten“ Strahlung. Die schwereren Elemente, aus denen auch die Erde und alles Leben bestehen, sind erst in den später gebildeten Sternen durch Fusionsprozesse entstanden und in Supernovaexplosionen freigeworden.



**Abb. 1: Geschichte des Urknalls. Moderne Teilchenbeschleuniger erzeugen Energien, wie sie 10<sup>-10</sup> s nach dem Urknall im Universum geherrscht hatten. Dies erlaubt uns, den Urknall im Labor nachzuempfinden. Ein genaueres Verständnis der Vorgänge bei niedrigeren Energien erlaubt uns eine Extrapolation zu den Anfängen des Universums.**

Wenden wir unsere gesicherten heutigen Kenntnisse an, können wir die Vorgänge bis zu etwa einer Zehnmilliardenstel Sekunde nach dem Urknall zurückverfolgen. Allerdings wissen wir bereits, daß diese Kenntnisse unvollständig sind – zum einen, weil die Beschreibung fundamentaler Prozesse in der subatomaren Welt zu viele willkürlich erscheinende Parameter erfordert, zum anderen, weil das Universum und seine Entstehung uns Rätsel aufgeben:

- Warum haben Teilchen eine Masse, wie bekommen sie sie?

- Woraus besteht die unsichtbare „Dunkle“ Materie, deren Masse die der sichtbaren um einen Faktor 10 übertrifft? Welcher Natur ist die „Dunkle Energie“? (Die Präsenz Dunkler Materie und Dunkler Energie im Weltall läßt sich aus der Geschwindigkeitsverteilung der Sterne in Galaxien und der Galaxien selbst schließen. Ohne Dunkle Materie bzw. Energie wären die Sterne in den Außenbereichen der Galaxien deutlich langsamer, als es den Beobachtungen entspricht)
- Wie kam es dazu, daß es heute Materie aber keine Antimaterie gibt, während aus Strahlung, wie sie zu Beginn des Universums vorgelegen haben mußte, in gleichen Mengen Antimaterie und Materie hervorgehen?

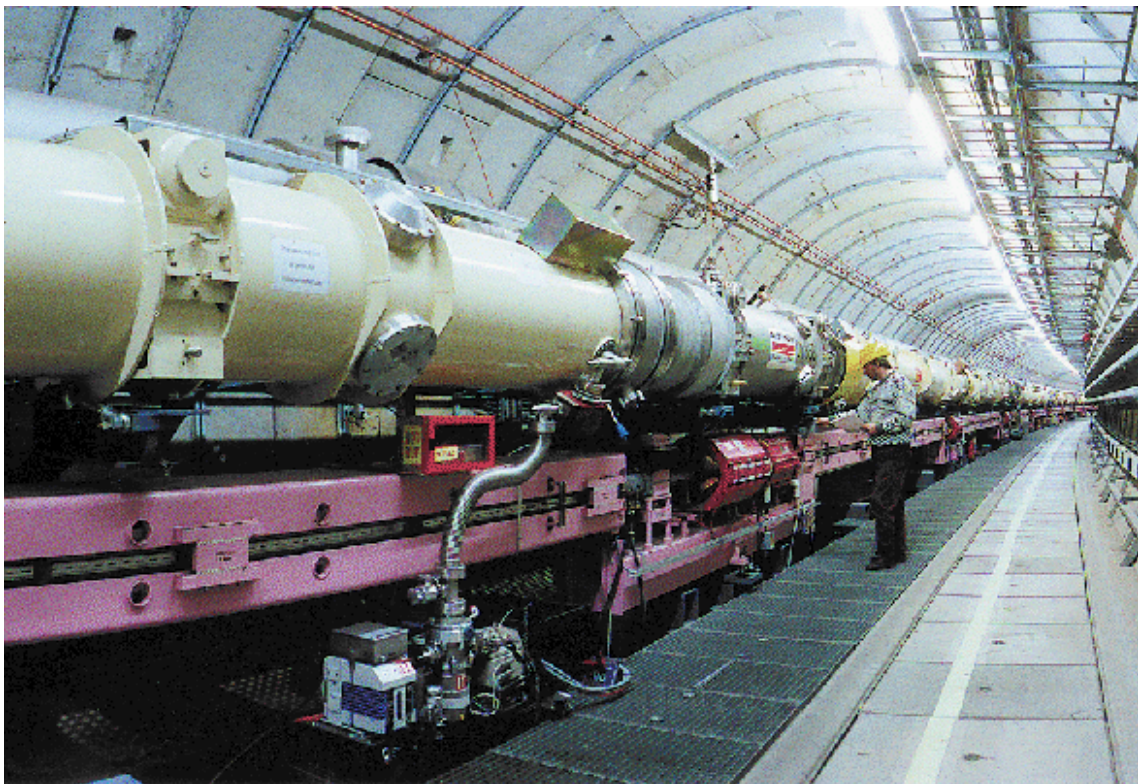
Diese Fragen legen den Schluß nahe, daß wir nach fundamentaleren Gesetzmäßigkeiten forschen müssen. Das an der Universität Karlsruhe neugegründete Centrum für Elementarteilchenphysik und Astroteilchenphysik CETA, an dem auch Forschergruppen aus dem Forschungszentrum Karlsruhe FZK beteiligt sind, hat sich zur Aufgabe gemacht, mit unterschiedlichen Methoden diesen Fragen nachzugehen [2]. Dieser Artikel beschreibt diejenige Forschungsrichtung von CETA, die sich mit immer leistungsfähigeren Teilchenbeschleunigern Zustände im Labor zu schaffen sucht, wie sie im frühesten Universum geherrscht hatten. Detailliertere Ausführungen, an denen auch Kollegen des Instituts für Experimentelle Kernphysik IEKP (einer der an CETA teilnehmenden Institute) mitgewirkt haben, sind in [3] zu finden.

## **2. Die Struktur der Materie**

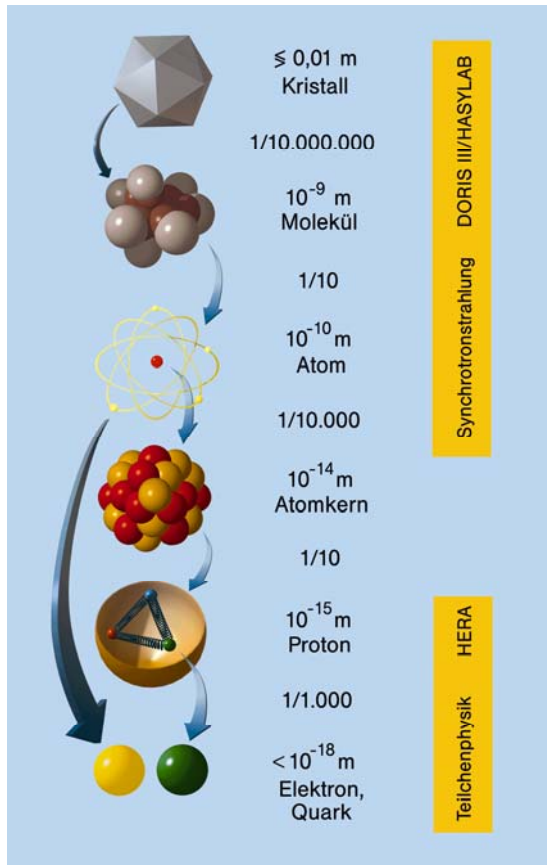
Das moderne Weltbild wurde von Dalton um 1803 dadurch geprägt, daß er den Begriff des Atoms in Zusammenhang mit der Vielfalt der chemischen Elemente gebracht hatte. Erweitert wurde es von Lothar Meyer (Professor der Chemie in Karlsruhe) und Dimitri Mendelejev, die um 1870 das Periodensystem der Elemente aufstellten. Eine der wichtigsten Erkenntnisse über die Zusammensetzung der Atome erlangten Rutherford, Geiger und Marsden, als sie 1909 Alphateilchen auf eine dünne Goldfolie schossen. Aus der Winkelverteilung der an den Goldatomen gestreuten Partikel konnten sie schließen, daß fast die gesamte Masse des Atoms in einem sehr kompakten Kern konzentriert ist, der von einer Elektronenwolke umhüllt ist. Diese Erkenntnis widerlegte die damalige Vorstellung, daß Atome homogene Gemische von positiven und negativen Ladungen (letztere die schon bekannten Elektronen) sind. Beobachtet wurde, daß zuweilen die streuenden Teilchen unter einem großen Winkel abgelenkt wurden, was nur bei einer Streuung an einem schweren festen Kern möglich ist. In vergleichbaren Experimenten der modernen Elementarteilchenphysik wurden hochenergetische (d.h. fast lichtschnelle) Elektronen auf Kerne, später auf Protonen geschossen und in den Sechziger und Siebziger Jahren auf die Existenz von fundamentalen Konstituenten

- sog. Quarks - in Protonen, Neutronen und generell allen Kernteilchen („Hadronen“) geschlossen.

Die Elektronen wiederum gehören, ebenso wie die ungeladenen Neutrinos, zur Gruppe der sog. Leptonen und gelten nach heutigen Kenntnissen ebenfalls als fundamental. Der heute leistungsfähigste Elektron-Proton-Beschleuniger HERA steht im Deutschen Elektron Synchrotron Labor DESY in Hamburg (siehe Abb. 2). Aus dem Streuverhalten der Elektronen an den Quarks im Proton konnte geschlossen werden, daß Quarks und Elektronen punktförmig wechselwirken und höchstens einen Durchmesser von  $10^{-18}$  m (ein Tausendstel eines Protonradius) besitzen können. Damit wurden die nach heutigem Wissen fundamentalen Bausteine der Materie, die uns umgibt, identifiziert (vgl. Abb. 3).



**Abb. 2: Ein Blick in den HERA-Beschleunigertunnel. HERA besitzt zwei Beschleunigerringe: einen für Protonen und einen für Elektronen oder Positronen (Antiteilchen der Elektronen). Die Protonen werden durch supraleitende Magneten in eine Kreisbahn gezwungen (obere Struktur), während die niederenergetischeren Elektronen durch konventionelle Magnete geleitet werden (untere Struktur).**



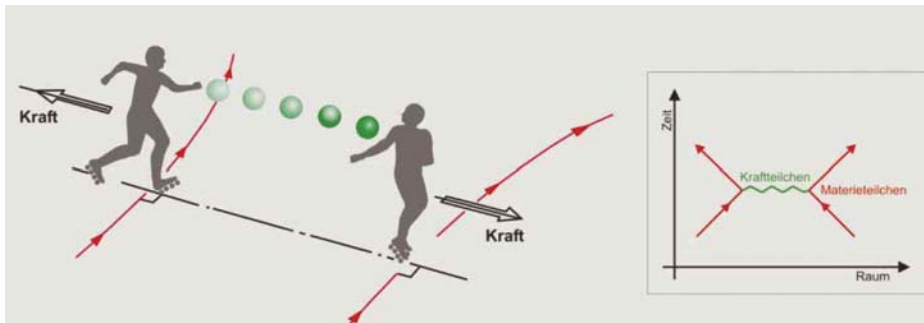
**Abb. 3: Die Größenordnungen vom Kristall zum Quark**

Allerdings stellte sich heraus, daß es neben den Elektronen und Quarks, aus denen unsere Nukleonen bestehen, weitere fundamentale Bausteine gibt, die in gleicher Häufigkeit im frühen Universum vorhanden gewesen sein müssen, aber in die uns bekannten leichteren Teilchen zerfallen sind. Um das Geheimnis dieser Elementarteilchen und ihrer Wechselwirkungen lüften zu können, werden sie künstlich in Hochenergiebeschleunigern erzeugt und deren Zerfallsprodukte mit Detektoren nachgewiesen. Je schwerer die Teilchen sind, desto höher muß die Energie des Beschleunigers sein. Daher dauerte es seit der Vorhersage seiner Existenz noch gute 17 Jahre, bis das Top-Quark am Fermilab bei Chicago im Jahre 1994 erstmals gesichtet wurde [4]. Mit der Entdeckung des Top-Quarks (s. u.), an der auch Physiker des IEKP beteiligt waren, ist nach herkömmlicher Auffassung das "Periodensystem" der Elementarteilchen vervollständigt worden.

Nach unserem heutigen Wissensstand, der im „Standardmodell“ zusammengefaßt ist [5], sind Quarks und Leptonen, sog. Fermionen, die fundamentalen Bausteine der Materie. Entsprechend ihrer Massen und Ladungen lassen sie sich in drei „Familien“ anordnen (vgl. Tabelle 1) [6]. Die stabile und uns vertraute Materie setzt sich aus Fermionen der ersten Familie zusammen, während die schwereren



Teilchen der beiden übrigen Familien bereits in den Frühzeiten nach dem Urknall in die heute beobachteten zerfallen sind. Die Fermionen wechselwirken miteinander durch den Austausch von Kraftteilchen, sog. Bosonen. Eine solche Wechselwirkung ist in Abb. 4 illustriert.



**Abb. 4: Illustration einer fundamentalen Wechselwirkung: zwei Rollschuhläufer werfen sich einen Ball zu und werden auf diese Weise abgestoßen. Im kleinen Diagramm rechts wird eine Wechselwirkung zwischen Elementarteilchen dargestellt.**

Das Photon als Träger der elektromagnetischen Wechselwirkung ist das bekannteste Kraftteilchen. Der experimentelle Nachweis einer „Fernwirkung“ zwischen schwingenden Ladungen wurde erstmals von Heinrich Hertz 1887 in Karlsruhe erbracht. Weitere fundamentale Wechselwirkungen sind die Starke Wechselwirkung, Ursprung der Kernkräfte, die durch Austausch von sog. Gluonen erfolgt, sowie die Schwache Wechselwirkung, deren Träger die sehr massereichen W- und Z-Bosonen sind (vgl. Tabelle 2).

	I	Masse	II	Masse	III	Masse	El. Ladung
Leptonen	$\nu_e$	$< 3 \text{ eV}$	$\nu_\mu$	$< 190 \text{ keV}$	$\nu_\tau$	$< 18 \text{ MeV}$	0
	e	511 keV	$\mu$	106 MeV	$\tau$	1.78 GeV	- 1
Quarks	u	4 MeV	c	1.4 GeV	t	175 GeV	+2/3
	d	8 MeV	s	130 MeV	b	4.9 GeV	-1/3

**Tab. 1: Die fundamentalen Fermionen [6]**

Die Zeichen sind Abkürzungen:  $\nu$  - Neutrino, e - Elektron,  $\mu$  - Myon,  $\tau$  - Taulepton, u - Up, d - Down, c - Charm, s - Strange, t - Top, b Bottom

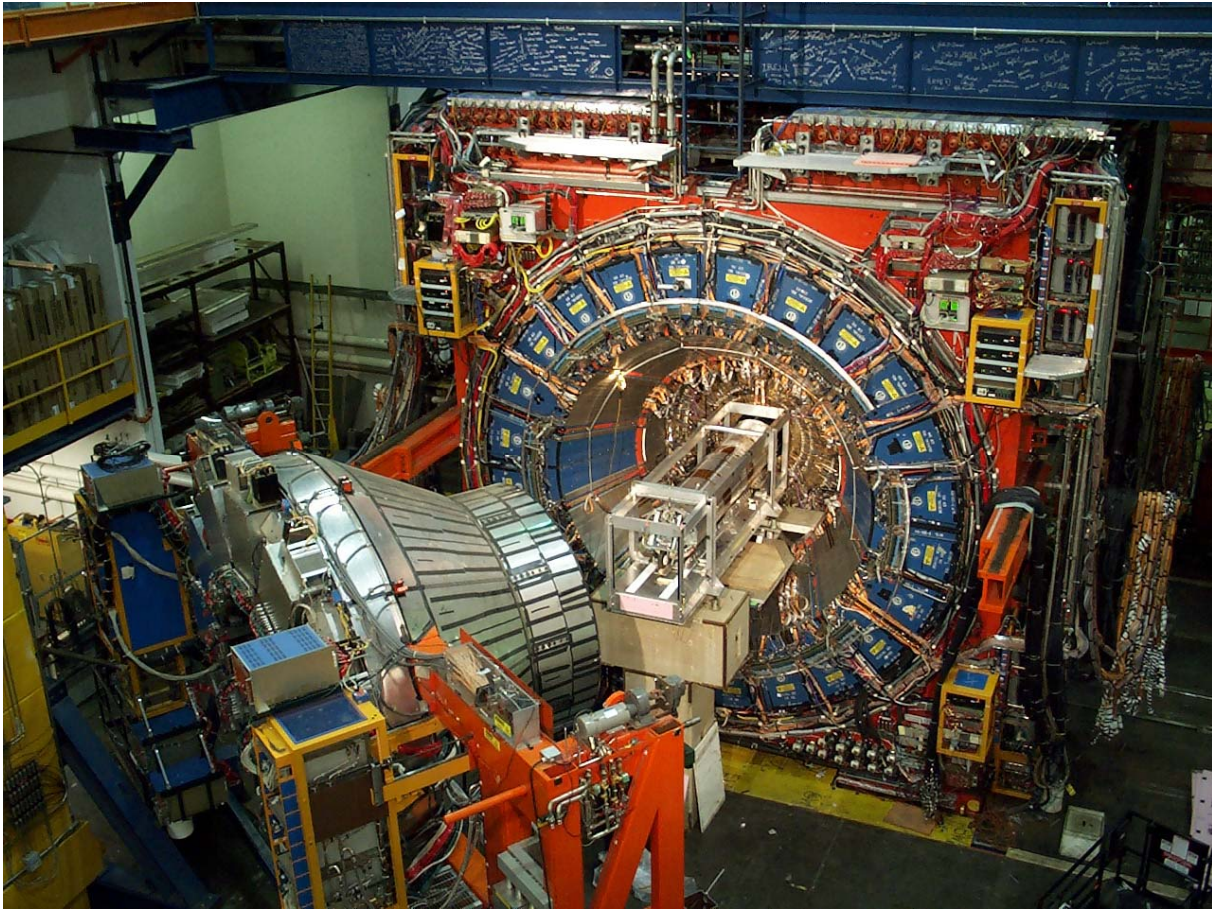
Die Einheit der Masse ist in der Teilchenphysik  $\text{eV}/c^2$  (Elektronenevolt/ $c^2$ ), wobei üblicherweise  $c = 1$  gesetzt wird. Zum Vergleich: die Masse eines Protons beträgt 937 MeV.

	Photon	$W^\pm$	$Z^0$	Gluonen
Wechselwirkung	elektromagnetisch	schwach	schwach	stark
Masse	0	80.4 GeV	91.2 GeV	0
Ladung	0	$\pm 1$	0	0

**Tab. 2: Die fundamentalen Bosonen [6]**

### 3. Der experimentelle Nachweis des Top-Quarks

Der erste direkte Hinweis auf die Existenz des Top-Quarks wurde 1994 von dem CDF - Experiment (Collider Detector at Fermilab bei Chicago, USA) geliefert. Ein Jahr später wurde - mit deutlich erhöhter Datenmenge - die Entdeckung des Top-Quarks von beiden am Fermilab Speicherring "Tevatron" laufenden Experimenten CDF und D0 offiziell verkündet [7]. In diesem zur Zeit leistungsfähigsten Teilchenbeschleuniger der Welt prallen Strahlen von Protonen und Antiprotonen frontal aufeinander. Während es Protonen, Kerne des Wasserstoffs, im Überfluß gibt, müssen Antiprotonen - die Antiteilchen von Protonen, erst noch mit einem separaten Beschleuniger am Fermilab erzeugt und aufgesammelt werden. Beim Betrieb des Tevatron finden pro Sekunde typischerweise rund 500000 inelastische Kollisionen je eines Protons mit einem Antiproton statt, bei denen jeweils eine Energie von 2 TeV (Teraelektronenvolt,  $10^{12}$  eV) frei wird. Diese Kollisionsereignisse, bei denen oft mehr als hundert Sekundärteilchen entstehen, werden von den Detektoren nachgewiesen und von leistungsfähigen Rechnern rekonstruiert. Abb. 5 ist ein Photo von CDF in der Montagehalle. Die zylindrische Öffnung gewährt Einblick auf eine im Zentrum befindliche Spurenkammer, entlang deren Achse während der Datennahme die Protonen bzw Antiprotonen laufen. Die Spurenkammer weist elektrisch geladene Partikel nach, während die sie umgebenden Detektoren, sog. Kalorimeter, neutrale Teilchen nachweisen und deren Energie vermessen. Während der Datennahme umschließt der Detektor den Kollisionsort in allen Raumrichtungen, um Ereignisse möglichst vollständig rekonstruieren zu können.



**Abbildung 5: Fotografie des CDF-Detektors in der Wartungshalle. Hinter der zylindrischen Verschlußkappe befindet sich die Spurenkammer, in deren Zentrum während der Datennahme die Protonen und Antiprotonen gegeneinanderprallen. Dem Aufbau einer Zwiebel gleich umhüllen weitere Detektorlagen den Zentralbereich, um alle Arten von bei einer Kollision erzeugten Teilchen registrieren zu können. Während des Meßbetriebes umschließt der Detektor den Kollisionsort der Strahlen fast vollständig.**

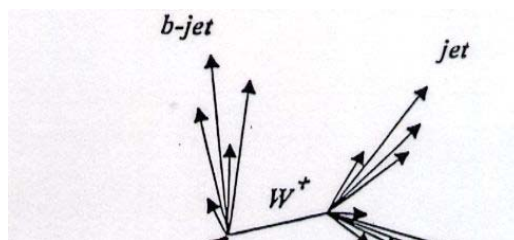
Für die Entdeckung des Top-Quarks war eine insgesamt vier Jahre dauernde Meßphase nötig, bei der ca.  $6 \cdot 10^{12}$  inelastische Proton-Antiproton-Kollisionen stattgefunden hatten. Hiervon hat jeder Detektor ca.  $10^8$  Ereignisse anhand besonderer Topologie ausgewählt und auf Band geschrieben. In diesen Ereignissen, die überwiegend aus elastischen Streuungen von Quarks oder Gluonen in Proton und Antiproton herrühren (s.u.), sollten sich auch einige Dutzend Top-Quarkereignisse befinden.

Top-Quarks werden vorwiegend als Teilchen-Antiteilchenpaar bei der Annihilation je eines der Quarks in Proton und Antiproton erzeugt (vgl. Abb. 6). Obwohl dieser Prozeß durch die starke Wechselwirkung vermittelt wird, ist der Wirkungsquerschnitt wegen der Punktförmigkeit der Quarks sehr klein. Er läßt sich theoretisch recht genau berechnen und ist etwa  $10^{10}$ -mal kleiner als der totale



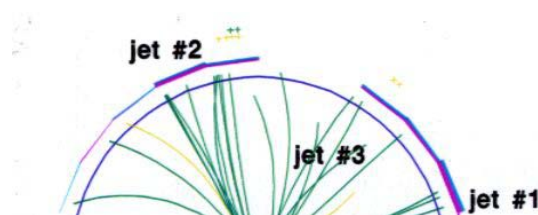
Wirkungsquerschnitt von Proton-Antiproton-Kollisionen! Das bedeutet, daß im Mittel in zehn Milliarden Kollisionsereignissen ein einziges versteckt ist, bei dem ein Top-Quark und sein Antiteilchen erzeugt worden ist. Top-Quarks lassen sich anhand ihrer charakteristischen Zerfallssignatur identifizieren. Gemäß dem Standardmodell zerfällt es fast ausschließlich in das nächstschwere Bottom-Quark und ein W-Boson, welches seinerseits in ein geladenes Lepton + Neutrino (33%) oder in zwei leichtere Quarks zerfällt (67%). Von den geladenen Leptonen lassen sich Elektronen und Myonen mit großer Effizienz im Detektor nachweisen. Neutrinos, die nicht im Detektor wechselwirken, führen zu einem Fehlbetrag in der Energiebilanz im rekonstruierten Ereignis und lassen sich so indirekt vermessen. Die leichteren Quarks sind übrigens nicht direkt beobachtbar, sondern nur die aus ihnen in Folge der Starken Wechselwirkung hervorgegangenen Teilchenschauer, die sog. Jets.

Um die seltenen Top-Ereignisse aus der großen Datenmenge zu extrahieren, muß man sich auf Signaturen beschränken, die bei den sehr viel häufigeren Untergrund-Ereignissen so gut wie nicht auftreten. Die verbleibenden Untergrundereignisse rühren dann von Fluktuationen oder von Meßfehlern des Detektors her, die die Signatur des Signals vortäuschen. Am vielversprechendsten ist der Zerfallsweg des einen W-Bosons in Leptonen, des zweiten in Quarks. In diesem Fall erwarten wir also Ereignisse mit einem Elektron oder Muon, fehlender Energie und vier Jets, von denen zwei je ein Bottom-Hadron (oder kurz B-Hadron) enthalten. B-Hadronen setzen sich aus einem B-Quark und einem leichteren Antiquark zusammen.



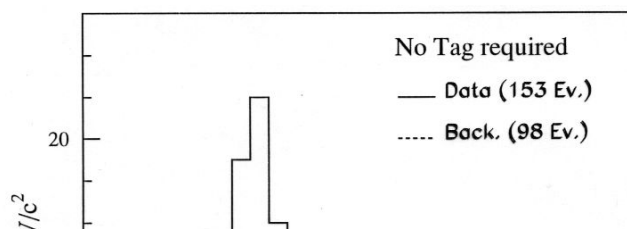
**Abbildung 6: Erzeugung und Zerfall eines Paares von Top-Quarks am Tevatron. Je ein Quark in Proton und Antiproton vernichten sich zu einem hochenergetischen Gluon – hier als einlaufende Schlangenlinie symbolisiert, aus dem das Top-Quark  $t$  und das Top-Antiquark  $\bar{t}$  hervorgehen. Beide wandeln sich ("zerfallen") in je ein Bottom-Quark und ein W-Boson um, welches selbst in ein geladenes Lepton ( $e$  oder  $\mu$ ) und ein Neutrino  $\nu$  oder in zwei leichte Quarks zerfällt.**

Um die Präsenz dieser B-Hadronen nachzuweisen, nutzen wir ihre "hohe" Lebensdauer von typischerweise 1,5 Picosekunden ( $10^{-15}$ s) aus. Diese führt dazu, daß sie erst nach einigen mm Flugstrecke in leichtere Teilchen zerfallen. Eine sehr präzise Vermessung aller Teilchenbahnen mit Hilfe von Siliziumstreifendetektoren (dabei handelt es sich um Anordnungen von typischerweise  $100\ \mu\text{m}$  breiten und 10 cm langen Dioden in Sperrichtung, die ionisierende Teilchen nachweisen können) erlaubt den Nachweis solcher versetzter Zerfallsorte. Ein rekonstruiertes Top-Antitop-Ereigniss ist in Abb. 7 gezeigt.



**Abbildung 7: Von CDF rekonstruiertes Top-Antitop-Ereignis. Die Darstellung zeigt die Teilchenspuren der vier Jets und vom Positron eines  $W^+$  - Bosonzerfalls in der Projektion senkrecht zur Strahlachse. Eine präzise Spurrekonstruktion weist auf zwei Zerfallsorte ("Vertices") der Bottom-Hadronen, die in den Jets 1 und 4 gefunden wurden. Damit können Jet 2 und 3 dem Zerfall des zweiten  $W^-$  - Bosons zugeordnet werden. Allein dieses einzige Ereignis erlaubt bereits eine Berechnung der Masse des Top-Quarks von  $170 \text{ GeV}/c^2$  mit einer Präzision von 6%!**

Insgesamt wurden in unterschiedlichen Zerfallskanälen von CDF und D0 mehr als 100 Kandidaten gefunden, wobei der verbleibende Untergrund etwa die Hälfte der Ereignisse ausmacht. Die aus den Signalraten berechneten Wirkungsquerschnitte stimmen innerhalb ihrer Meßungenauigkeit recht gut mit der theoretischen Voraussage überein. Die wichtigste Eigenschaft des Top-Quarks, dessen Masse, wird aus der Kinematik der Zerfallsprodukte berechnet. Abb. 8 zeigt die Verteilung der rekonstruierten Massen von CDF zusammen mit der Monte-Carlo-Simulation des Untergrundes (gepunktetes Histogramm). Mit einem gemittelten Wert von  $175 \text{ GeV}/c^2$  bei einer Meßungenauigkeit von  $5 \text{ GeV}/c^2$ , der recht gut mit den Standardmodellvorhersagen übereinstimmt [6], ist das Top-Quark etwa so schwer wie ein Goldatom und erheblich schwerer als jedes andere bekannte Elementarteilchen (Zur Erinnerung: ein Proton wiegt etwa  $0.94 \text{ GeV}/c^2$ ).



**Abbildung 8: Von CDF rekonstruierte Top-Quark-Massen. Jeder Eintrag in das Histogramm entspricht einem Ereignis. Über die breite Verteilung des errechneten Untergrundes (schattiert) erhebt sich gut sichtbar die Spitze des Top-Signals.**

Es ist daher naheliegend zu fragen, ob das Top-Quark in allen meßbaren Eigenschaften den Standardvorstellungen entspricht. Dazu gehört die Überprüfung seines Produktionsmechanismus (s.o.). In Karlsruhe wurden theoretische Präzisionsrechnungen durchgeführt [8], die eine kleine Asymmetrie in der Winkelverteilung von Top-Quarks vorhersagen und jetzt experimentell überprüft werden. Auch lassen sich Top-Quarks mittels der Schwachen Wechselwirkung gemeinsam mit einem Bottom-Quark erzeugen. In den bislang genommenen Daten sind keine anomalen Meßwerte beobachtet worden, die auf anomale Vorgänge schließen ließen [9]. Für präzisere Untersuchungen, die zu einem der Forschungsschwerpunkte des IEKP zählen, ist die derzeitige Datenmenge noch zu klein. Die neue Datennahme am Fermilab mit verbesserten Detektoren wird die Ausbeute verzwanzigfachen, so daß wir dieses geheimnisvolle Teilchen sehr detailliert durchleuchten können werden.

#### **4. Sind Quarks fundamentale Teilchen?**

Das Mysterium um die Vielzahl der Elementarteilchen in Tabelle 1 bzw. 2 und deren großen Massenunterschiede legt den Gedanken nahe, daß sie aus kleineren, fundamentaleren Teilchen zusammengesetzt sein könnten. Um dieser Frage nachzugehen, wurden Ereignisse untersucht, bei denen Quarks der kollidierenden Protonen und Antiprotonen mit höchstmöglicher Energie gegeneinandergestoßen waren. Diese Ereignisse sind dadurch gekennzeichnet, daß die abgelenkten Quarks als hochenergetische Teilchenjets im Detektor auftreten. Für die Annahme, daß die beobachteten Jets von der elastischen Streuung von punktförmigen Quarks herrühren, läßt sich ihre Häufigkeitsverteilung in Abhängigkeit ihrer Energie mit



der Theorie der Starken Wechselwirkung präzise voraussagen. In der Tat wurde eine Abweichung der theoretischen Voraussage beobachtet, woraus zunächst geschlossen wurde, daß bei den höchsten Energien nicht mehr die Quarks selbst, sondern kleinere Konstituenten miteinander in Wechselwirkung treten. Die genau vermessene Winkelverteilung der Jets, sozusagen eine Wiederholung des Rutherfordexperimentes mit CDF, war aber im Widerspruch zu dieser Interpretation und bevorzugte die Hypothese der punktförmigen Quarks. Spätere Untersuchungen zeigten, daß veränderte Annahmen über die Dichteverteilung der (punktförmigen) Quarks im Proton unsere Daten erklären können. Sollten Quarks dennoch ausgedehnte Objekte sein, so können sie nach heutigem Wissen nicht größer als ein Zehntausendstel des Durchmessers eines Atomkerns sein. Übertragen in makroskopische Dimensionen: wären Atome so groß wie die Erde, so wären Quarks und Leptonen höchstens so groß wie ein Hosenknopf! Auch in diesem Fall warten wir mit Spannung auf die kommenden Datennahmen, die eine noch präzisere Vermessung der Quarks versprechen.

## **5. Die Suche nach fundamentaleren Naturgesetzen**

Insgesamt sieht es nach unserem jetzigen Wissen so aus, daß unser Bild vom Aufbau der Natur mit hoher Präzision in sich konsistent ist. Allerdings benötigen wir dazu 21 freie Parameter (!) und haben noch keineswegs die oben erwähnten Fragen beantwortet. Ein erster Meilenstein bei der Erlangung tieferen Wissens wäre die Entdeckung des nach dem Physiker Peter Higgs benannten Higgs-Bosons. Im Standardmodell ist seine Existenz zur Erklärung der Herkunft der Teilchenmassen zwingend vorgeschrieben. Wir können uns seine Wirkung so vorstellen, daß das Vakuum mit seinem Feld durchdrungen ist, das an fast alle Teilchen (die Träger der Elektromagnetischen, Starken und Gravitations- Wechselwirkung ausgenommen) koppelt und ihnen so ihre träge Masse verleiht. Die wichtigste Eigenschaft des Higgs-Bosons, seine eigene Masse, läßt sich auch ohne dessen Nachweis im Rahmen des Standardmodells aus den Eigenschaften der übrigen Elementarteilchen errechnen. Entscheidend tragen dazu die Massen der W-Bosonen und des Top-Quarks bei, Informationen, die am Tevatron erlangt werden, sowie weiterer Präzisionsmessungen an anderen Beschleunigern, denen wir entnehmen, daß das Higgs-Boson mit großer Wahrscheinlichkeit nicht schwerer als ca.  $230 \text{ GeV}/c^2$  sein kann. Andererseits muß das Higgs-Boson schwerer als  $114 \text{ GeV}/c^2$  sein, da es sonst in früheren Beschleunigern gefunden worden wäre [10].

Wenn die Masse in diesem Bereich liegt und damit mit der des Top-Quarks vergleichbar ist, könnte man erwarten, daß man es am Tevatron eigentlich schon hätte finden müssen. In der Tat ist es denkbar, daß es schon erzeugt wurde. Allerdings ist es fast unmöglich, es auch nachzuweisen, weil seine charakteristische Zerfallssignatur in zwei Bottom-Quarks auch im millionenfach höheren Untergrund vorkommt. Nur seltene Zerfallsmodi erlauben es, ein Higgs-Signal zu

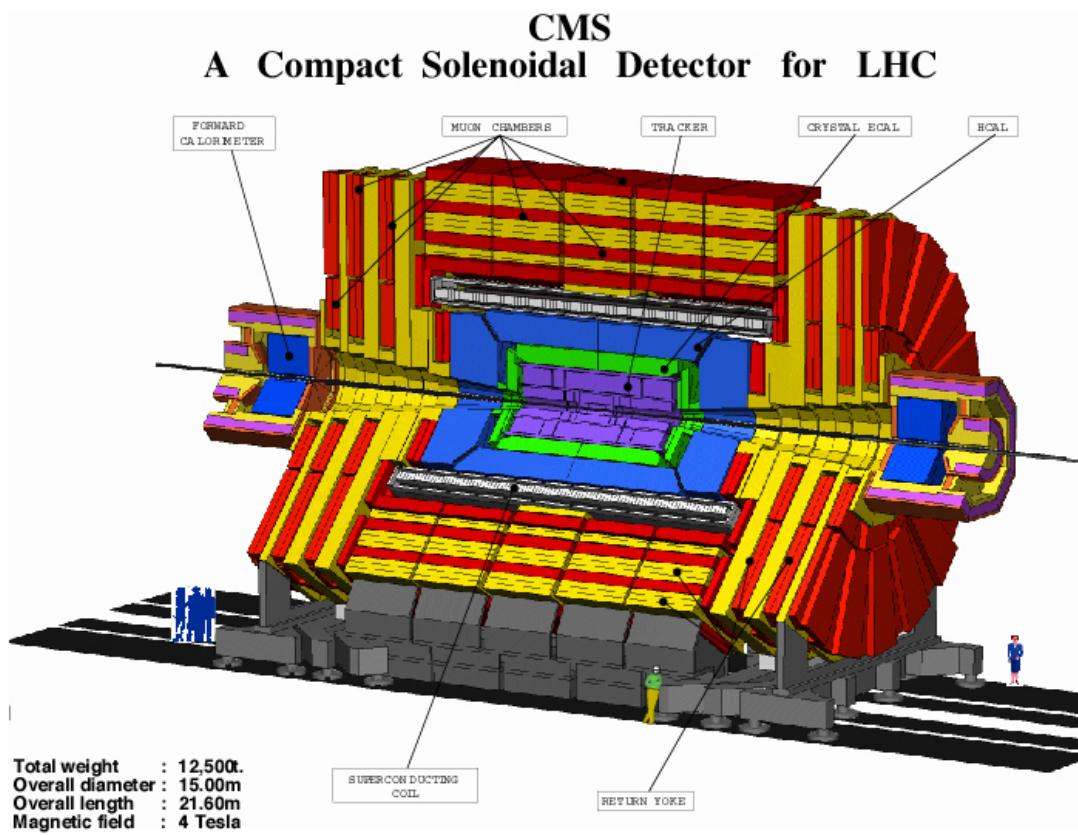
identifizieren. Sofern das Higgs-Boson überhaupt existiert, wird der im Bau befindliche Large Hadron Collider, der 2007 am CERN in Betrieb genommen wird, die entgültige Entdeckung bringen. In Abb. 9 ist eine Luftaufnahme vom CERN mit der Markierung des Verlaufs dieses unterirdischen Teilchenbeschleunigers zu sehen, der mit 27 km Umfang der größte der Welt sein wird.



**Abbildung 9: Fotografie der Region „Pays de Gex“ am Jura vor den Toren Genfs mit den Umrissen des unterirdischen Beschleunigers Large Hadron Collider LHC. Der Umfang des weltgrößten Beschleunigers beträgt 27 km, die Energie der beschleunigten Protonen wird siebenmal größer als beim Tevatron am Fermilab sein.**

In zwei getrennten evakuierten Rohren werden gegenläufig Strahlen von Protonen mit Energien von 7000 GeV zirkulieren, die durch etwa 2300 8,5 Tesla starke supraleitende Dipolmagnete auf Kreisbahnen gehalten werden. An den vier Wechselwirkungszonen werden die Protonen zur Kollision gebracht. In einer der vier Zonen wird der Compact Muon Solenoid Detektor CMS installiert (Abb. 10), an dessen Konstruktion das IEKP mit großem Einsatz beteiligt ist [11]. Über 2000 Forscher aus 36 Ländern sind am Bau von CMS beteiligt. Das Hauptinstrument des CMS-Detektors ist ein supraleitender Magnet, dessen 4 Tesla starkes Feld geladene Teilchen in gekrümmte Bahnen lenkt und so deren Impuls bestimmen lässt. Die Bahnen selbst werden mit Hilfe von hochauflösenden Spurendetektoren vermessen. Zusätzliche strahlenabsorbierende Detektoren (Kalorimeter) ermöglichen die Identifikation der Teilchen anhand ihrer Art, ihre Energie abzugeben. Der Magnet selbst ist mit einer Länge von 21,6 m und einem äußeren Durchmesser von 14,6 m

der größte und mit einem Gesamtgewicht von rund 12.000 Tonnen der schwerste jemals gebaute, sieht man von Teilchenbeschleunigern selbst ab. In der supraleitenden Spule, 13 m lang und 6 m im Durchmesser, werden 2.5 Gigajoule an Energie gespeichert. Sollte die Supraleitung einmal zusammenbrechen („Quenching“), wird diese Energie, die ausreicht, einen elektrischen Heizofen zwei Wochen lang zu betreiben, von dicken Aluminiumkabeln gefahrlos abgeleitet. Das in Abb. 11 gezeigte Foto verdeutlicht die Dimensionen und lässt verstehen, warum Teilchenphysiker heutzutage eine Werft (in diesem Falle die DWE) für die Konstruktion bemühen mußten.



**Abbildung 10: Aufbau des im Bau befindlichen CMS-Detektors am Large Hadron Collider. Das IEKP ist am Bau des inneren Spurendetektors beteiligt, der mit Lagen von etwa 220 m<sup>2</sup> von Siliziumstreifendetektoren der größte der Welt sein wird. Fertigstellung wird 2007 sein.**





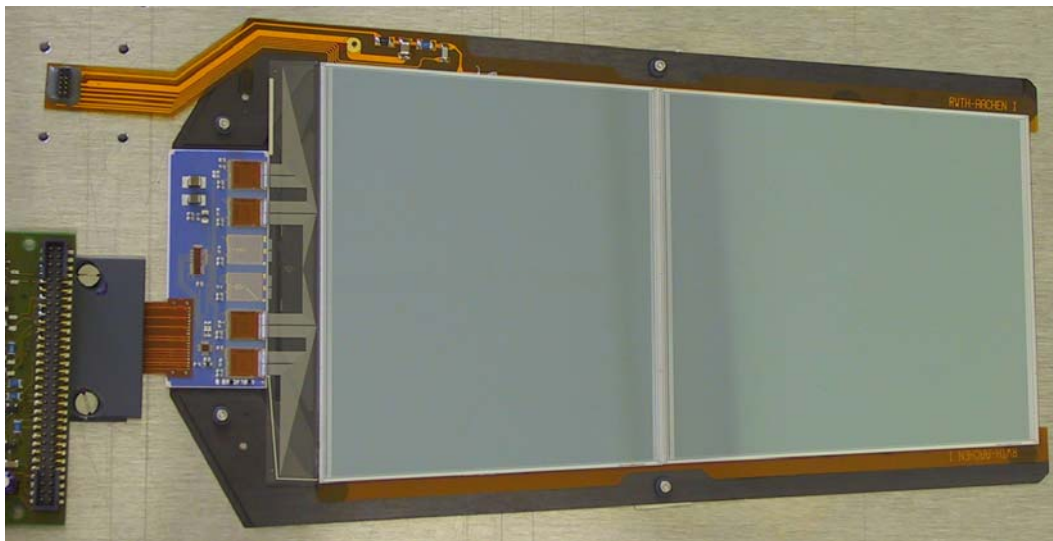
**Abbildung 11: Foto des Eisenjochs des CMS-Magneten vor Einbau der inneren Detektoren. Der Magnet hat eine Höhe von 15m und Länge von 22m.**

Herzstück des CMS-Detektors ist der Spurdetektor, der sich aus 25000 Siliziumstreifensensoren (siehe Kapitel 3) zusammensetzen wird und damit weltgrößter sein wird. Die Signale von insgesamt 10 Millionen Kanälen werden mittels hochintegrierter Schaltungen verstärkt und zwischengespeichert, bis ein „Auslösesignal“ den Befehl zur Weiterverarbeitung dieser Signale (sowie der Signale von anderen Detektorkomponenten) bis zu einer vorläufigen Ereignisrekonstruktion gibt. Pro Sekunde finden 40 Millionen Kollisionsereignisse statt, von denen 100 mit interessanten Signaturen für eine spätere Datenanalyse gespeichert werden. Abb. 12 zeigt ein in Karlsruhe gefertigtes Detektormodul bei der optischen Inspektion, Abb. 13 dessen Großaufnahme. Die technischen Methoden, die dabei zur Anwendung kommen, werden auch in der Chip-erzeugenden Industrie verwandt. Interessant ist, daß hauptsächlich Karlsruher Diplomanden und Doktoranden die komplexen Testsysteme für die Detektoren erstellt haben. Ziel ist es, mehr als 1000 Module in Karlsruhe herzustellen und in Großeinheiten zu montieren. Vervollständigt wird der Spurdetektor dann am CERN.



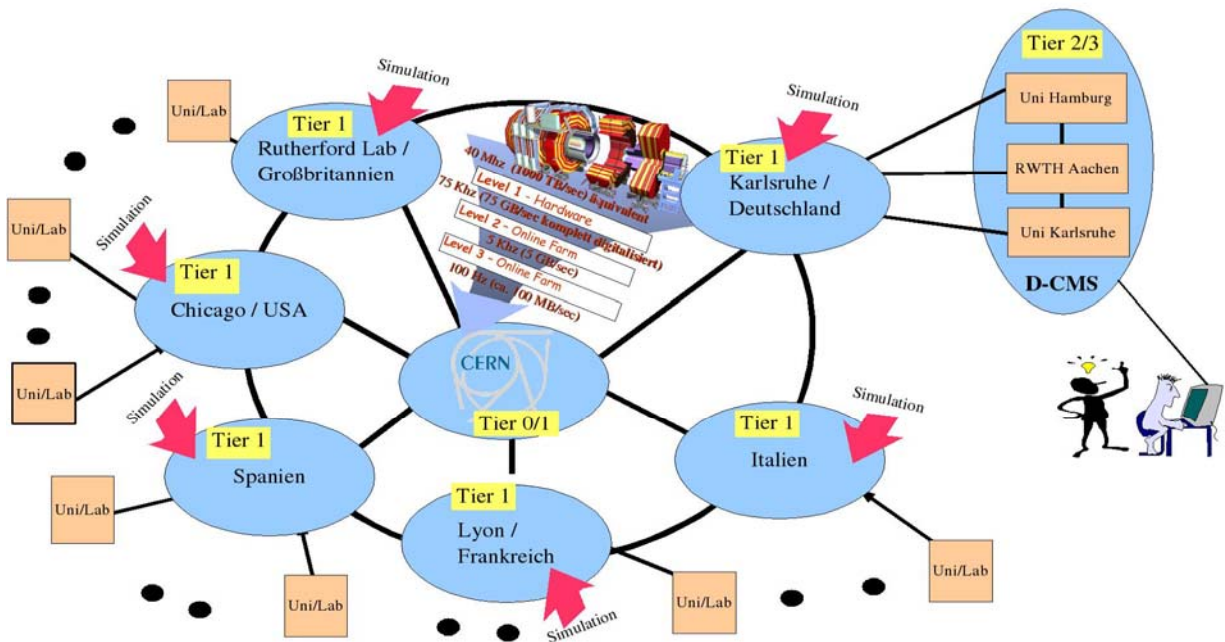


**Abb. 12: Siliziumstreifendetektor bei der optischen Inspektion mit einer Zeiss-Meßmaschine am IEKP. Sämtliche Labors des IEKP befinden sich übrigens am Forschungszentrum Karlsruhe, einige Geräte wie diese Koordinatenmeßmaschine wurden dem Institut freundlicherweise übertragen.**



**Abb. 13: Großaufnahme eines Siliziumstreifendetektormoduls. Links in Blau befindet sich der Auslesehybrid mit vier APV Chips (jeweils 128 Kanäle). Es schließt sich eine Adapterplatine aus Glas an, die die Streifenabstände der Siliziumsensoren (rechts) an die Kanalabstände auf den Chips ( $44\ \mu\text{m}$ ) anpaßt. Die 512 Sensorstreifen werden am IEKP durch Bonden (Mikroschweißen) mit den Chips verbunden. Das Modul ist etwa 16 cm lang.**

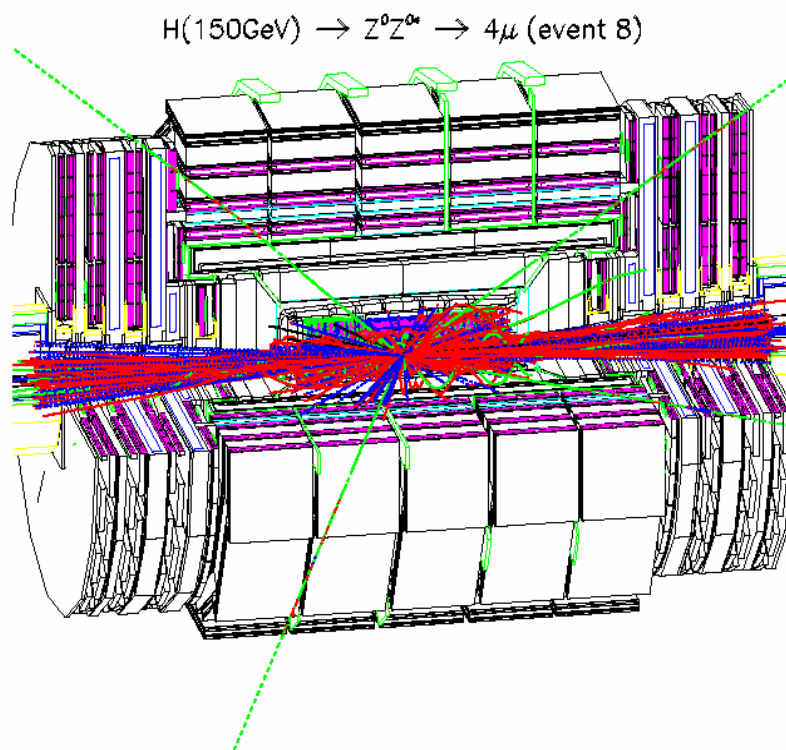
Wenn die Datennahme begonnen hat, werden pro Jahr etwa 1-2 Mrd. Ereignisse gespeichert und mit Rechnern überall auf der Welt analysiert. Die dabei entstehende Datenmenge von mehr als 1 Million Gigabyte ist so gewaltig, daß ein weltweites Netz von Rechner-Clustern, das sog. Grid, errichtet werden muß, um ihrer Herr zu werden. Das einzige Deutsche Grid-Zentrum entsteht unter starker Beteiligung des IEKP am Forschungszentrum Karlsruhe (siehe Abb. 14). Das Grid ist eine Weiterentwicklung des World-Wide-Web, das ursprünglich am CERN entwickelt wurde, um den Datenaustausch unter den Teilchenphysikern zu erleichtern. Es dient als gutes Beispiel dafür, daß die sehr aufwendige und teure Forschung mit Teilchenbeschleunigern neben der grundlegenden Erkenntnis auch technisch/ökonomische Rechtfertigungen findet. (In diesem Kontext soll aber darauf verwiesen werden, daß unserer größter und wichtigster „Spin-Off“ die gut ausgebildeten Diplomand/inn/en und Doktorand/inn/en sind, die weltweit in Forschung und Industrie ihren Einsatz leisten).



**Abb. 14: Schema des weltweiten Grid-Verbundes mit der Einbeziehung des Forschungszentrum Karlsruhe und des IEKP**

Erst wenn Beschleuniger, Detektor und Datenverarbeitung installiert worden sind, kann das eigentliche Ziel anvisiert werden: die Suche nach fundamentalen Gesetzmäßigkeiten. Um nicht Fehler bei der Detektorbauweise zu machen und unvorbereitet die großen Datennahmen zu beginnen, haben wir bereits das ganze Experiment, d.h. die physikalischen Prozesse, die zum Signal und allen erdenklichen Untergrundquellen führen, das Verhalten des Detektors und die

Datenauswertung mit Simulationsprogrammen (Monte Carlo Programmen) durchgespielt. Als Beispiel wird in Abb. 15 ein simuliertes Ereignis dargestellt, bei dem ein mittelschweres Higgs-Boson erzeugt und in CMS nachgewiesen wird. Deutlich sichtbar sind die vier grünen Spuren vom Zerfall des Higgs-Bosons, deutlich sichtbar auch die mehr als Tausend weiteren Spuren, die von der Kollision der Protonen herrühren. Im eigentlichen Experiment werden  $10^{14}$  Kollisionsereignisse benötigt, um ein einziges Higgs-Ereignis herauszupicken! Nur mit ausgeklügelten Rekonstruktionsalgorithmen können diese Signale gefunden werden.



**Abb. 15: Simulation eines Ereignisses im CMS-Detektor, bei dem ein Higgs-Boson mit einer Masse von 150 GeV in vier Myonen zerfällt (grüne Spuren). Zusätzlich wurden in dem Ereignis weitere ca 1000 geladene Teilchen erzeugt (farbige Spuren) und ähnlich viele neutrale Teilchen (nicht dargestellt)**

Die Suche nach dem Higgs-Boson ist von fundamentaler Bedeutung für die Physik. Interessant wäre die Frage, ob die Natur evtl. auch ohne Higgs-Boson auskommt. In diesem Falle würden zwangsläufig neue Prozesse auftreten, um den fehlenden Higgs-Mechanismus zu kompensieren, die sich bei hohen Energien dramatisch im Experiment bemerkbar machen, und die unser Forschungsgebiet revolutionieren würden.

Am LHC werden aber auch andere fundamentale Fragen attackiert. Die Eingangs erwähnte Dunkle Materie fände eine sehr elegante Erklärung, wenn in der Natur eine Symmetrie existierte, die jedem Fermion (Materieteilchen) ein Boson (Kraftteilchen) zuordnen könnte und umgekehrt. Auf diese Weise müßte -wiederum im frühen Universum - eine regelrechte Schattenwelt neben der uns vertrauten Natur existiert haben, die inzwischen bis auf das leichteste Supersymmetrische Teilchen zerfallen wäre. Diese Neutralinos genannten Teilchen flögen als Dunkle Materie im Universum herum. Der Umstand, daß sie noch nicht gefunden worden sind, wäre mit ihrer nur schwachen Wechselwirkung mit Materie zu erklären, die von den Modellen postuliert wird. Die Supersymmetrische Theorie wurde übrigens in den Siebziger Jahren von Julius Wess in Karlsruhe entwickelt. Wenn tatsächlich Supersymmetrische Teilchen existierten, könnten sie bei sehr hohen Energien erzeugt und - ähnlich wie das Top-Quark oder Higgs-Boson - anhand ihrer charakteristischen Zerfallseigenschaften nachgewiesen werden.

In Karlsruhe gibt es drei Arbeitsgruppen, die sich mit der Suche nach Supersymmetrischen Teilchen befassen: eine Gruppe bereitet ein Satellitenexperiment (AMS) vor, um im Kosmos nach Reaktionsprodukten von kollidierenden Teilchen Dunkler Materie zu fahnden, eine weitere Gruppe sucht in einem unterirdischen Experiment nach elastischer Streuung solcher Teilchen mit Atomkernen, und die dritte Gruppe wird am LHC nach der direkten Erzeugung solcher Teilchen suchen. Erst mit der Zusammenführung der Resultate aller drei Experimente können die Eigenschaften dieser Teilchen, sofern sie denn existieren, genauer beschrieben werden.

Können wir auch die dritte oben genannte Frage beantworten? Es gibt eine Erklärung für das Fehlen der Antimaterie in der heutigen Welt, die auf eine sehr kleine Asymmetrie in Reaktionen von Materie mit Antimaterie bei extrem hohen Energien zurückgeführt wird und bereits 1967 von Andrej Sakharov vorgeschlagen wurde. Bei diesen Reaktionen verbleibt eine Differenz zwischen der Zahl der Leptonen und Quarks einerseits und deren Antiteilchen andererseits, die allerdings nur ein Milliardenstel beträgt. Im sich abkühlenden Universum vernichten sich schließlich bis auf diese Differenz alle Teilchen und deren Antiteilchen in Energiestrahlung. An Teilchenbeschleunigern wurde eine ähnliche Asymmetrie gefunden (sie wird CP-Verletzung genannt), zwei Arbeitsgruppen des Karlsruher Centrum für Elementarteilchenphysik und Astroteilchenphysik sind an den Experimenten beteiligt. Wir hoffen, daß wir in den kommenden Jahren durch Präzisionsmessungen auf dem Gebiet ein besseres Verständnis dieser Asymmetrie bekommen werden oder sogar am LHC mit einer neuen Symmetrieverletzung überrascht werden.

## **6. Ausblick**



Die Suche nach den fundamentalen Bausteinen der Natur ist in vollem Gange. Mit den neuen, zum Teil noch im Bau befindlichen leistungsfähigen Instrumenten der Elementarteilchenphysik und der Astroteilchenphysik erwarten wir für die kommenden Jahre einen immensen Zugewinn an Erkenntnissen. Die Universität Karlsruhe befindet sich in einer hervorragenden Position, zu diesen Erkenntnissen beizutragen, da hier Forschungsaktivitäten zu diesen Fragestellungen von sehr unterschiedlichen Gebieten zusammenlaufen.

Sollte es sich herausstellen, dass, ähnlich dem Prinzip von Anaxagoras, unsere Forschung neue Geheimnisse der Natur zutage fördert, die noch fundamentalere Erklärungen verlangen, so können wir neben unseren Beiträgen zur Kultur auf jeden Fall einen Erfolg vorweisen: die Entwicklung neuer Methoden und Technologien und die Ausbildung junger engagierter Wissenschaftler für Forschung, Industrie und Gesellschaft.

## Referenzen

- [1] Fotos und Graphiken wurden zum Teil der Denkschrift des Komitees für Teilchenphysik KET entnommen [3]. Die Referenzen hierfür sind in der Denkschrift angegeben.
- [2] Informationen zu CETA können auf dem Web gefunden werden: <http://www.ceta.uni-karlsruhe.de/index.html> ;  
Eine Übersicht über das Institut für Experimentelle Kernphysik und dessen Forschungsprogramm befindet sich in: <http://www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de>
- [3] <http://www.ketweb.de/ketStudie/ket-studie.pdf>
- [4] F. Abe et al. (CDF - Kollaboration), Phys. Rev. D50, 2966 (1994).
- [5] S.L Glashow, Nucl. Phys. 20, 579 (1961);  
S. Weinberg, Phys. Rev. Lett. 19, 1264 (1967).
- [6] S. Eidelmann et al., Phys. Lett. B 592 (2004) 1.  
Permanent aktualisiert werden die Daten der Elementarteilchen in: [http://pdg.lbl.gov/2004/tables/contents\\_tables.html](http://pdg.lbl.gov/2004/tables/contents_tables.html)
- [7] F. Abe et al. (CDF - Kollaboration), Phys. Rev. Lett. 74,2626 (1995);  
S. Abachi et al. (D0 - Kollaboration), Phys. Rev. Lett. 74,2632 (1995).
- [8] J. Kühn, G. Rodrigo, Institut für Theoretische Teilchenphysik, Universität Karlsruhe, hep-ph/9802268 und 9807420.

- [9] W. Wagner, Proc. International Conference on Hadron Collider Physics, HCP 2002, Karlsruhe, 2002, weitere Publikationen in Vorbereitung.
  
- [10] LEP Electroweak Working Group, <http://www.cern.ch/LEPEWWG>;  
G. Quast (Institut für Experimentelle Kernphysik, Universität Karlsruhe,  
private Mitteilung.
  
- [11] CMS Technical Proposal, CERN/LHCC 94-38;  
<http://cmsinfo.cern.ch/Welcome.html>