



# Die Geburt der Protonen

Etwa eine tausendstel Sekunde nach dem Urknall war das Universum so weit abgekühlt, dass Quarks und Gluonen verklumpt erschienen. Protonen und Neutronen hatten sich gebildet.

In jedem Proton und Neutron befinden sich jeweils drei Quarks. Quarks sind die kleinsten uns bekannten Bausteine der Atomkerne. Sie sind seit diesem Zeitpunkt in den Protonen und Neutronen eingeschlossen und wurden bisher noch nie als freie Teilchen beobachtet.

**Wir haben uns dem Urknall bis auf eine tausendstel Sekunde genähert. Eine tausendstel Sekunde, in der jedoch gewaltige Prozesse abgelaufen sind!**



# Der Aufbau der Protonen



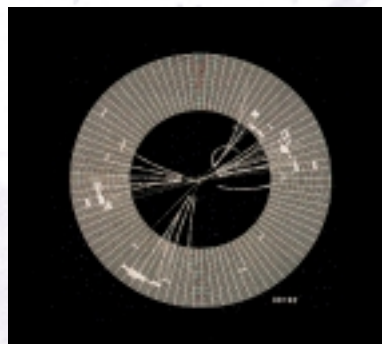
Protonen sind zusammengesetzte Teilchen. Sie bestehen aus up-Quarks und down-Quarks.

## Was hält die Quarks in den Protonen zusammen?

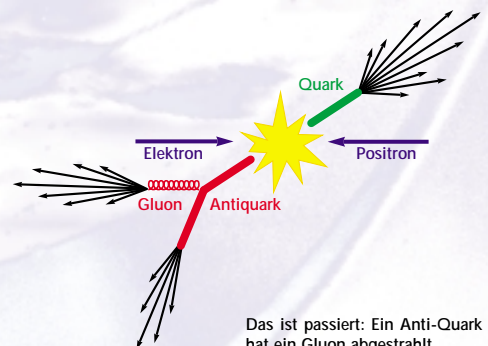
Die Quarks in den Protonen werden durch die starke Kraft zusammengeschweisst. Diese Kraft wird durch **Gluonen** (engl. to glue = kleben), die Kraftteilchen der starken Kraft, vermittelt.

Die Gluonen binden die Quarks so fest zusammen, dass diese im Proton eingeschlossen sind und sie nicht als freie Teilchen auftreten.

Außerdem können Gluonen sich für winzige Augenblicke in Quarks und deren Antiteilchen verwandeln. Daher ist das Proton mit einem ganzen „See“ von Quarks, Anti-Quarks und Gluonen gefüllt.



So zeigte sich das Gluon das erste Mal 1979 als eines von drei Teilchenbündeln in Experimenten am DESY-Beschleuniger in Hamburg



Das ist passiert: Ein Anti-Quark hat ein Gluon abgestrahlt.



Murray Gell-Mann

Der Name „Quark“ geht auf eine unübersetzbare Wortschöpfung aus James Joyces Roman „Finnegans Wake“ zurück:

## „Three Quarks for Mister Mark.“

wobei aus einem Quart (Viertelliter) des Wortklangs wegen ein „Quark“ wurde. Murray Gell-Mann, einer der Begründer des Quark-Modells, gefiel dieses Wortspiel so gut, dass er „Quark“ als Name für die Proton-Bausteine wählte. Vermutlich war ihm auch das deutsche Wort Quark bekannt.

### Die starke Kraft:

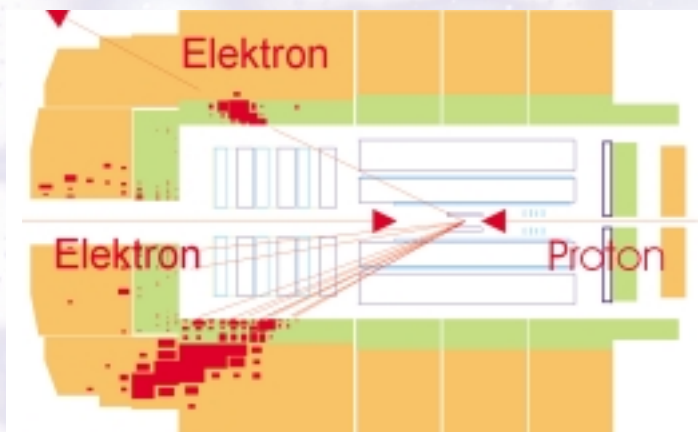
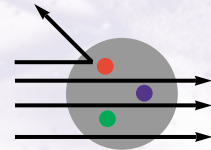
- ist die stärkste uns bekannte Kraft,
- hält die Atomkerne zusammen,
- hat nur eine sehr kurze Reichweite von etwa einem Protodurchmesser.



# Kann man Quarks sehen?

**Nein. Quarks lassen sich nur indirekt durch Streuexperimente nachweisen.**

Bei einem Streuexperiment wird ein punktförmiges Teilchen, z.B. ein Elektron, an einem Proton gestreut. Aus der Winkelverteilung der gestreuten Elektronen lassen sich Rückschlüsse über den Aufbau der Protonen ziehen.



Kollision eines Elektrons und eines Protons in einem der Nachweisgeräte an HERA. Das Elektron wird unter einem großen Winkel zurückgestreut. Ein Zeichen für einen Frontalaufprall auf ein sehr kleines Quark.



Blick in den HERA-Tunnel am DESY in Hamburg.

## Wie groß ist ein Quark?

Wenn das Atom die Größe der Erde hätte, dann wäre ein Proton so groß wie ein Fußballstadion und ein Quark kleiner als ein Tennisball. Anders ausgedrückt: Quarks sind kleiner als  $0,00000000000000000001\text{m}$ !

## HERA

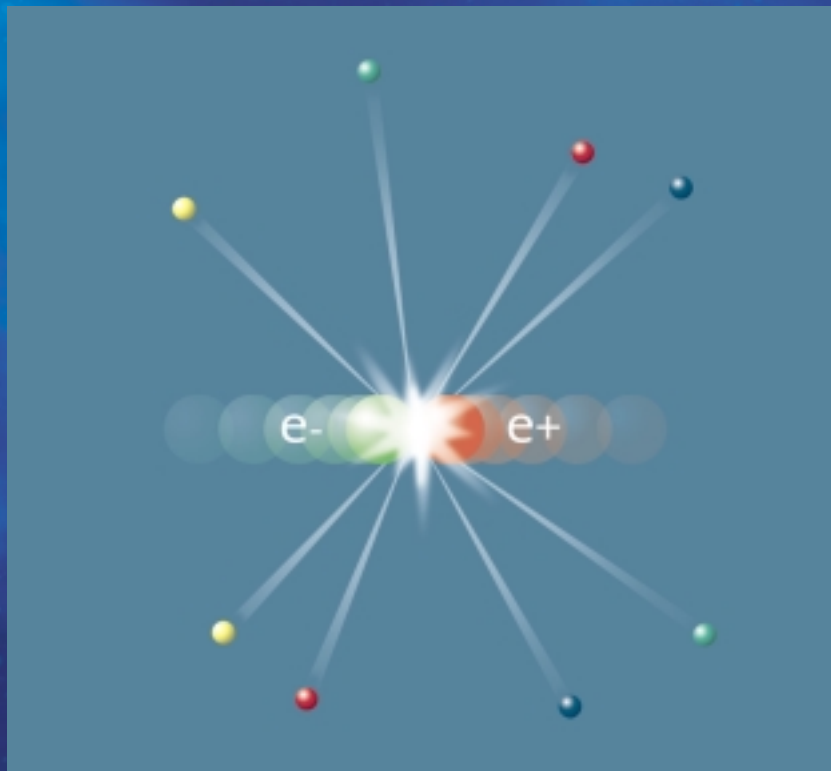
Eine weltweit einzigartige Anlage zur Untersuchung der Struktur des Protons befindet sich am Deutschen-Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg – der 6.3 km lange Elektron-Proton-Beschleuniger HERA.

HERA ermöglicht einen Blick in das Proton mit einer Genauigkeit von  $1/1000$ stel des Protondurchmessers und ist damit sicherlich das präziseste Mikroskop der Welt. Bei dieser Genauigkeit zeigt sich ein erstaunlich komplexer Aufbau des Protons aus Quarks, Anti-Quarks und Gluonen.



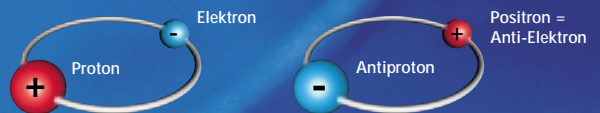
# Die Vernichtungsschlacht

Ungefähr eine millionstel Sekunde nach dem Urknall, bei einer Temperatur von etwa  $10^{13}$  Grad, vernichten sich die Teilchen und die Antiteilchen gegenseitig. Nur ein verschwindend kleiner Überschuss von Teilchen – Konsequenz einer winzigen Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie – überlebt. Es ist der Stoff aus dem wir gemacht sind.



Vernichten sich ein Elektron und ein Positron bei hoher Energie, so entsteht ein winziger Feuerball, der in verschiedene Teilchen und Antiteilchen zerplatzt.

## Teilchen und Antiteilchen:



Die elektrischen Ladungen sind bei Teilchen und Antiteilchen vertauscht – alle anderen Eigenschaften sind gleich.





# Wie die Materie entstand

Experimente an Teilchenbeschleunigern zeigen uns, dass **Teilchen und Antiteilchen stets paarweise erzeugt** werden. Darum hätte man erwartet, dass im Urknall ebenso viel Antimaterie wie Materie gebildet wurde. Es gibt jedoch keinerlei Beobachtungen, die auf größere Mengen von Antimaterie im Universum deuten.

## Warum gibt es nur Materie?

Eine überraschende Entdeckung lieferte 1964 den entscheidenden Hinweis: Das Universum enthält mindestens eine Milliarde mal so viele Strahlungsteilchen wie Materieteilchen! Die Energie der Strahlungsteilchen liegt im Mikrowellenbereich.

Der russische Physiker und Menschenrechtler Andrej Sacharow hatte 1968 die richtige Idee:



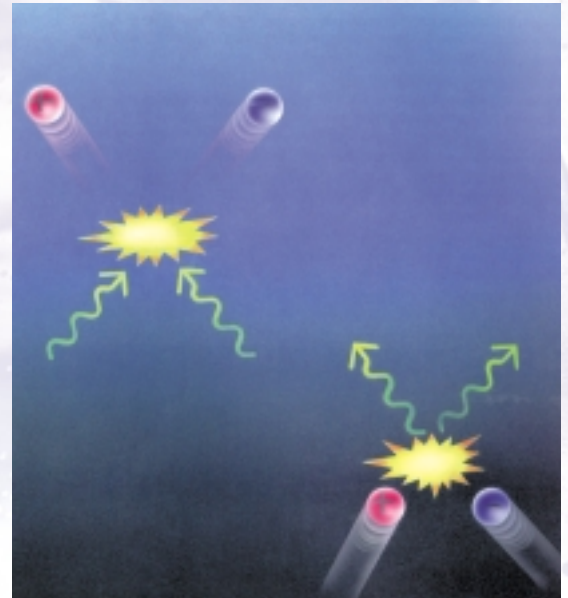
Andrej Sacharow

„Falls die Symmetrie zwischen Teilchen und Antiteilchen im Verhältnis von nur etwa

**1 000 000 001 : 1 000 000 000**

verletzt ist, dann wäre im Urknall auf jeweils eine Milliarde Teilchen und Antiteilchen im Schnitt ein überzähliges Teilchen entstanden. Diese überzähligen Teilchen wären der anschließenden Vernichtungsschlacht von Teilchen gegen Antiteilchen entkommen.

**All unsere Materie besteht aus diesen übriggebliebenen Teilchen. Die kosmische Mikrowellenstrahlung ist das Nachglimmen der kosmischen Vernichtungsschlacht.“**



Die kosmische Mikrowellen-Strahlung wird mit großen irdischen Antennen sowie von Satelliten gemessen.



Die Nobelpreisträger R. Wilson und A. Penzias vor der Antenne, mit der sie 1964 die kosmische Mikrowellenstrahlung entdeckten.



Der Satellit COBE (Cosmic Microwave Background Explorer), mit dem 1990 die Temperatur der Mikrowellenstrahlung auf ein tausendstel Grad genau gemessen wurde.

# „Schöne“ Quarks – asymmetrisch?

Sacharows Idee erklärt das Fehlen von Antimaterie. Sie wäre aber nicht ernst genommen worden, wenn man nicht vorher in Beschleuniger-Experimenten ein Anzeichen für die Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie entdeckt hätte: In einem nobelpreis-gekrönten Experiment maßen die Amerikaner Jim Cronin und Val Fitch einen winzigen Unterschied beim Zerfall von Teilchen und Antiteilchen, die „seltsame“ Quarks („strange“-Quarks, den drittleichtesten Quarktyp) enthalten.

**Die Naturgesetze lassen also grundsätzlich eine Verletzung der Teilchen-Antiteilchen-Symmetrie zu.**

Wenn das die richtige Fährte ist, erwartet man bei Zerfällen von Teilchen, die das zweitschwerste Quark („beauty“-Quark) enthalten, eine größere Asymmetrie. Da diese Teilchen wegen ihrer großen Masse und ihrer komplizierten Zerfallsmöglichkeiten schwer zu erzeugen und zu vermessen sind, stellen diese Experimente die Wissenschaft vor ganz neue Herausforderungen. Gegenwärtig wetteifern mehrere große Gruppen in Europa, den USA und Japan darum, diese Asymmetrie auch bei den „schönen“ Quarks zu finden.

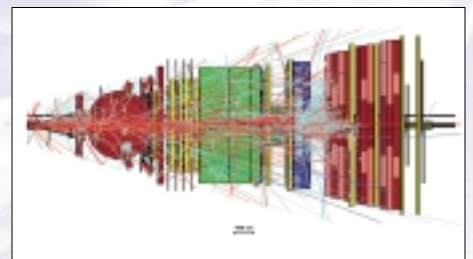
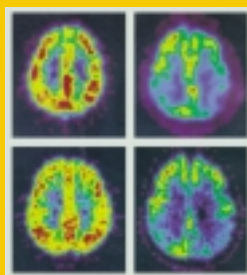


Mehrere Hundert Wissenschaftler aus der ganzen Welt bauten den HERA-B Detektor, der in diesem Jahr bei DESY in Hamburg die Suche nach der Symmetrieverletzung in Zerfällen von Teilchen mit einem „beauty“-Quark aufnimmt.

## Antiteilchen in der Medizin

Positronen, die Antiteilchen der Elektronen, werden heute schon in der medizinischen Diagnostik genutzt:

Die **Positronen-Emissions-Tomographie** zeigt Zustand und Aktivität des lebenden Gehirns, ohne die biologischen Vorgänge zu stören.



Computersimulation einer typischen Reaktion bei HERA-B. Zehn Millionen solcher Reaktionen pro Sekunde mit jeweils etwa Hundert Spuren müssen in Sekundenbruchteilen verarbeitet und gefiltert werden – neue Herausforderungen an Elektronik und Computer.



# Natur liebt Symmetrie

Überall in der Natur begegnen wir Symmetrien.

Die nahezu exakte Symmetrie zwischen positiven und negativen elektrischen Ladungen, oder genauer zwischen Teilchen und Antiteilchen, ist nur ein Beispiel. Augenfälliger sind die räumlichen Symmetrien.



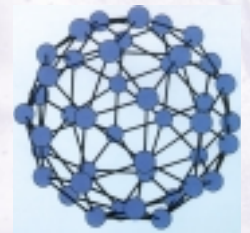
5-zählige Symmetrie von Enzianblüten



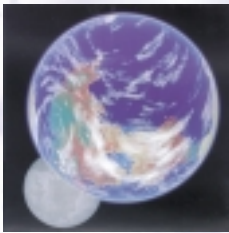
6-zählige Symmetrie einer Schneeflocke



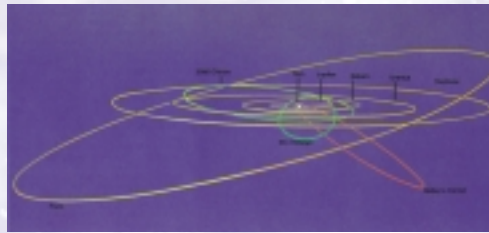
25-zählige Symmetrie einer Kieselalge



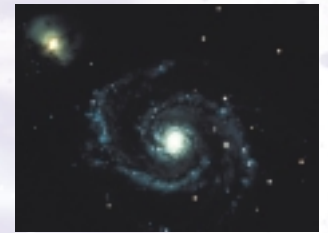
Das „Fussball“-Molekül Fulleren aus 60 Kohlenstoff-Atomen



Die Kugelgestalt von Mond und Erde zeigt die Symmetrie der Schwerkraft



Planeten des Sonnensystems auf ihren elliptischen Bahnen



Eine Spiral-Galaxie ähnlich unserem Milchstrassen-System

Überall in der Natur begegnen wir kleinen Symmetrieverletzungen.

Die Erde ist keine vollkommene Kugel, sie ist infolge ihrer Rotation an den Polen abgeplattet. Das ebenfalls durch die Schwerkraft zusammengehaltene Sonnensystem und unsere Milchstrasse zeigen noch stärkere Abweichungen von der idealen Symmetrie.



Die Symmetrie der Natur wird durch materielle Objekte nicht immer vollkommen wiedergegeben. Sie zeigt sich weniger in den Objekten, als vielmehr in den Gesetzen.

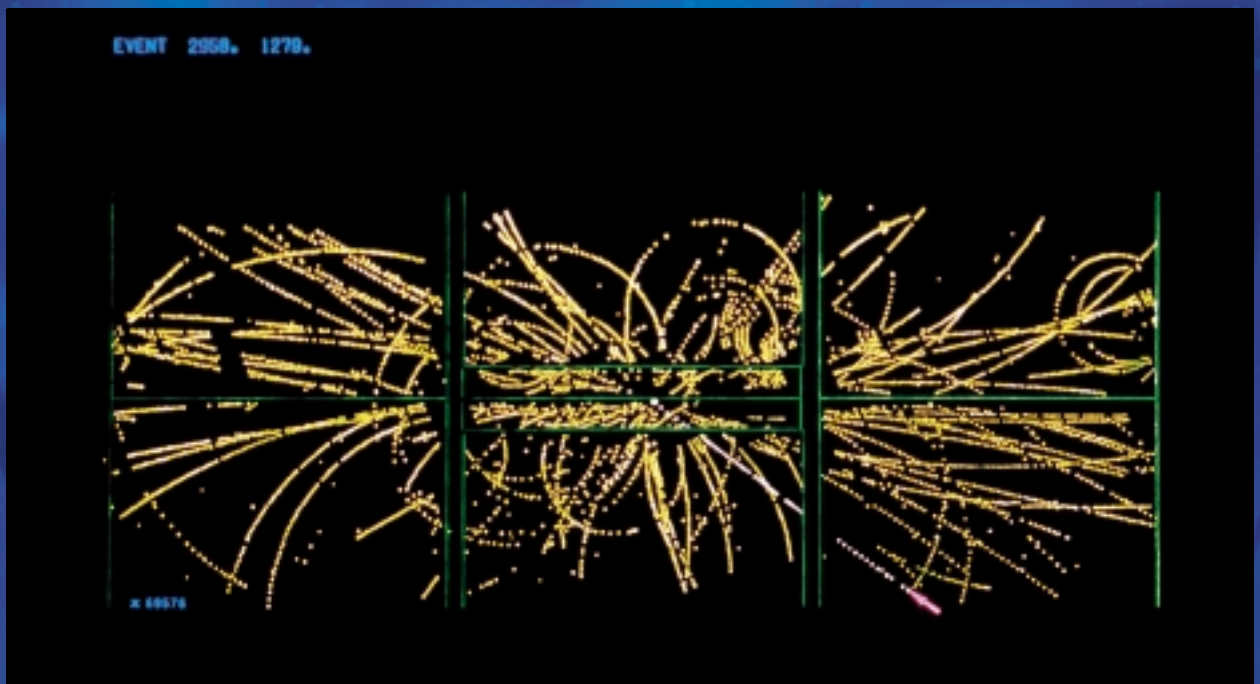
**Es sind die Gesetze der Natur, die Symmetrien am vollkommensten zeigen.**

Aus der unvollkommenen Symmetrie der materiellen Welt sucht die Wissenschaft die letztlich gültigen Symmetrien der Naturgesetze herauszulesen.



# Zwei Kräfte sind eins

Eine hundertmilliardstel Sekunde nach dem Urknall, bei einer Temperatur von tausend Billionen Grad, war die Materie eine „Urbrühe“ aus Quarks, Elektronen und Neutrinos. Zwischen diesen Teilchen wirkten Kräfte. Zwei dieser Kräfte, die schwache und die elektromagnetische Kraft waren gleich stark und zu einer Kraft, der elektroschwachen Kraft, vereint.



Millionen solcher „Ereignisse“ mussten vermessen werden, bis es 1983 am CERN gelang, die Kraftteilchen der schwachen Kraft zu finden.

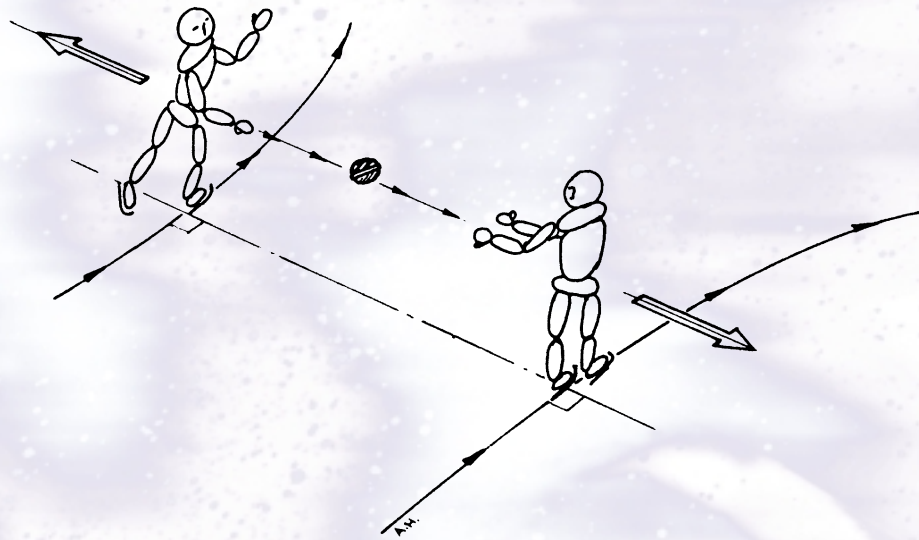




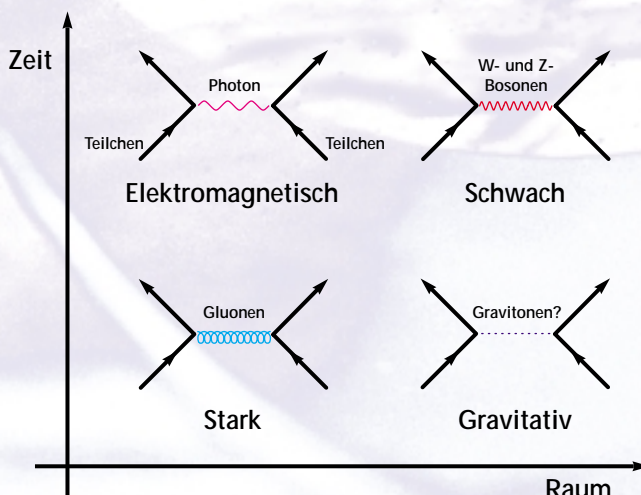
# Kräfte - Ursache allen Geschehens

## Ballspiel in der Quantenwelt

Zwei Körper üben eine Kraft aufeinander aus, indem sie Energie und Impuls austauschen. Im Mikrokosmos wird klar, wie das geht: Die Kräfte entstehen durch den Austausch von „Kraftteilchen“. Das Zustandekommen einer abstoßenden Kraft kann man sich durch einen geworfenen Ball veranschaulichen.



Wir kennen vier Arten von Kräften, die Elementarteilchen aufeinander ausüben:

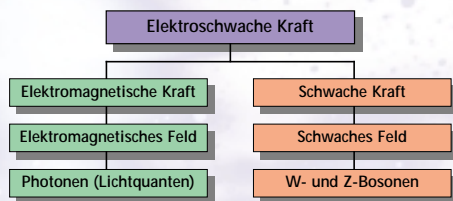


Richard P. Feynman

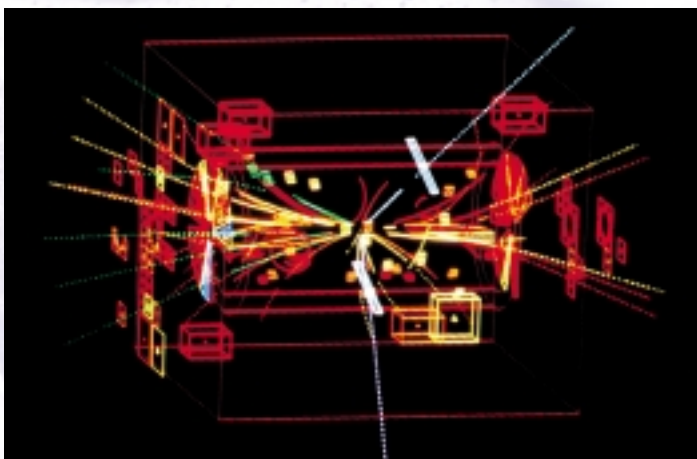
Richard P. Feynman hat mit den nach ihm benannten Feynman-Diagrammen (siehe links) eine klare und anschauliche Sprache geschaffen, alle Arten von fundamentalen Prozessen zwischen Elementarteilchen zu beschreiben.

# Die elektroschwache Kraft

Im Laufe der vergangenen 25 Jahre hat man nachgewiesen, dass schwache Kraft und elektromagnetische Kraft eins sind. Die Einheit zeigt sich allerdings erst bei Abständen von weniger als einem Tausendstel des Proton-Durchmessers. Wegen der großen Dichte der Urbrühe bei  $10^{-11}$  Sekunden waren die Abstände der Teilchen tatsächlich so klein und die Vereinheitlichung war wirksam.



W- und Z-Bosonen vermitteln die schwache Kraft – ähnlich wie Photonen die elektromagnetische. Allerdings sind sie nicht masselos, sondern fast doppelt so schwer wie ein Eisenatom. Wegen ihrer Schwere fliegen sie nicht weit: Die Kraft bleibt schwach! Bei kleineren Teilchenabständen wird die kurze Reichweite belanglos, und die schwache und elektromagnetische Kraft werden „effektiv“ gleich stark. Wie etwa  $10^{-11}$  Sekunden nach dem Urknall.



Der Nachweis des Z-Bosons, des elektrisch neutralen Kraftteilchens der schwachen Kraft, das hier in zwei Myonen (blaue Spuren) zerfällt.

## Die schwache Kraft

- zeigt sich bei der Radioaktivität,
- ermöglicht der Sonne das Leuchten,
- wirkt als einzige der Kräfte auch auf Neutrinos.



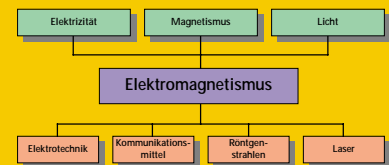
Carlo Rubbia



Abdus Salam

Abdus Salam und Carlo Rubbia: Schlüsselfiguren für die Erkenntnis, dass schwache und elektromagnetische Kräfte einen gemeinsamen Ursprung haben.

## Kräfte wurden schon einmal vereinheitlicht:



Michael Faraday fand im 19. Jahrhundert das Induktionsgesetz. Es zeigt, dass elektrische und magnetische Kräfte zwei verschiedene Erscheinungsformen einer einheitlichen Naturerscheinung sind – des Elektromagnetismus.

James C. Maxwell bewies später, dass auch das Licht elektromagnetischer Natur ist.



Michael Faraday



James C. Maxwell



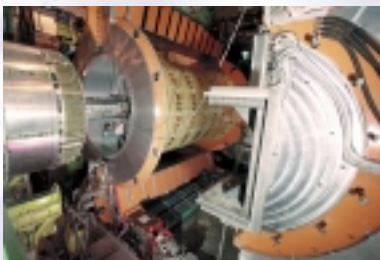
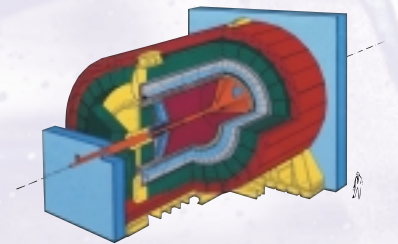
# Wie untersucht man die elektroschwache Kraft?

Um die vereinheitlichte elektroschwache Kraft zu untersuchen, braucht man große Beschleuniger wie HERA in Hamburg, LEP in Genf oder TEVATRON bei Chicago. Mit ihnen können die Kräfte bei Abständen von etwa einem Tausendstel der Größe des Protons untersucht werden.

Dies ist ein typisches Nachweisgerät, auch Detektor genannt, am Elektron-Positron-Beschleuniger LEP in Genf. Solch ein Detektor hat etwa die Größe eines Zweifamilienhauses.

Ähnlich einer Zwiebel sind die einzelnen Komponenten schalenförmig um den Kollisionspunkt von Elektronen und Positronen angeordnet. So lassen sich die Flugbahnen aller in den Kollisionen entstandenen Teilchen, deren Impulse und Energien vollständig vermessen. Die Größe dieser Detektoren ergibt sich aus der erforderlichen Messgenauigkeit.

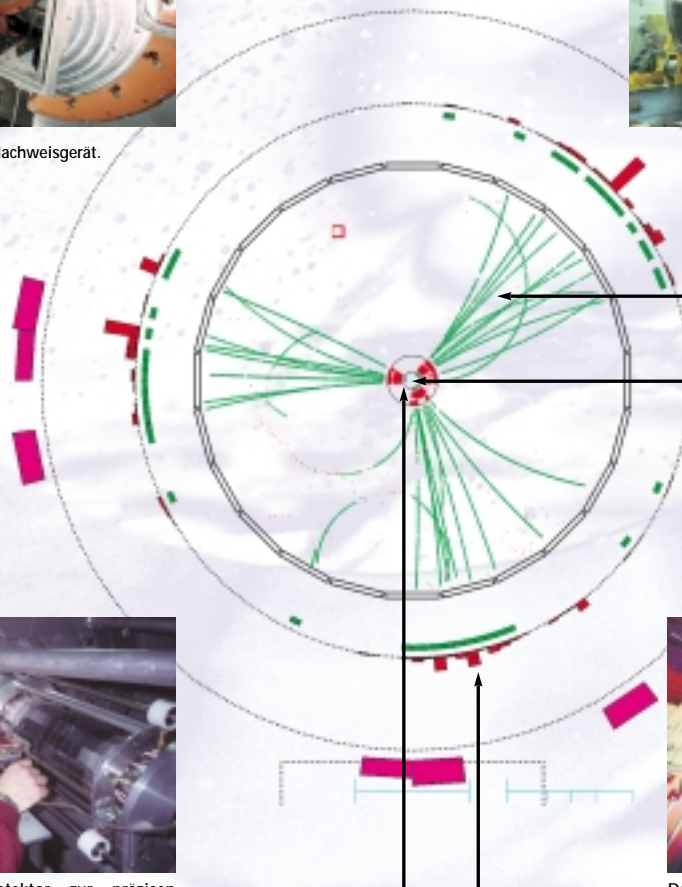
Detektoren wie dieser werden zehn Jahre oder länger von mehreren Hundert Physikern aus vielen Ländern der Welt genutzt.



Ein Blick in das geöffnete Nachweisgerät.



Der zentrale Spurdetektor zum Vermessen der Flugbahnen der Teilchen.



Kollisionspunkt, an dem ein Elektron und Positron (beide senkrecht zur Bildebene) aufeinandergeprallt sind.



Der Silizium-Halbleiterdetektor zur präzisen Vermessung der Spuren nah am Kollisionspunkt.



Das elektromagnetische Kalorimeter zur Messung der Energie von Teilchen.



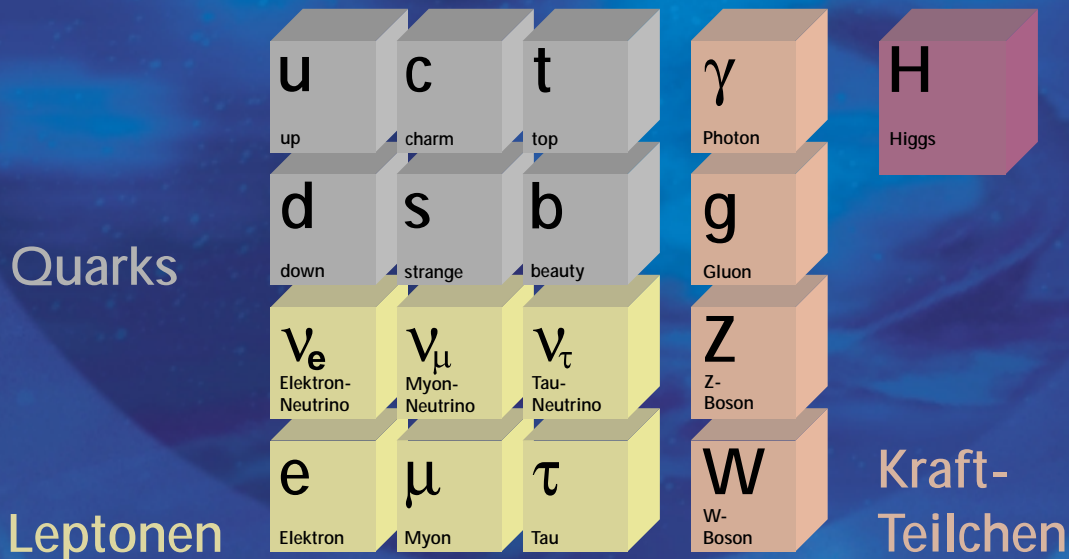
# Das kosmische Inventar

Fast die gesamte Materie im heutigen Kosmos besteht aus vier Bausteinen:

- up-Quarks und down-Quarks: Sie bilden Protonen und Neutronen und damit die Atomkerne.
  - Elektronen: Sie kreisen um die Atomkerne
  - Elektron-Neutrinos: Sie werden von der Sonne ausgestrahlt.
- Dies ist die erste „Familie“ von Teilchen.

$10^{-12}$  Sekunden nach dem Urknall gab es noch weitere Teilchen, die aufgrund ihrer großen Masse jedoch nicht überlebensfähig waren.

Es gab 12 Bausteine, mehrere Kraftteilchen und vermutlich das Higgs-Teilchen.



Teilchen wie Elektron und Neutrino bezeichnet man als Leptonen. Sie spüren die starke Kraft nicht, die Quarks zusammenschweißt.

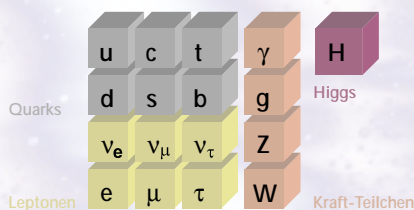




# Drei Familien von Teilchen

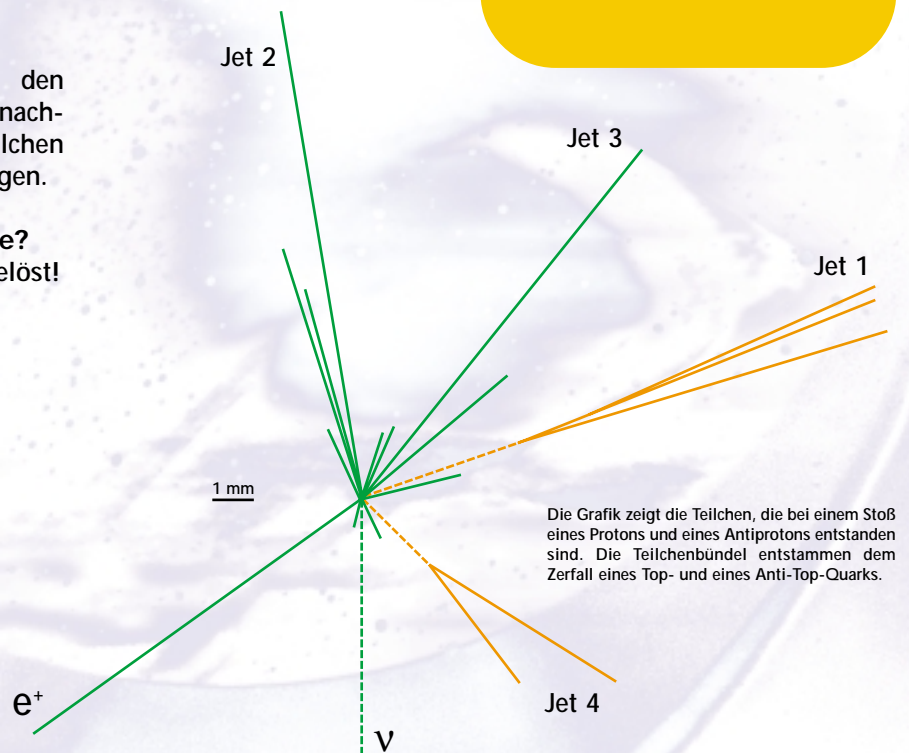
## Baukasten der Natur

$10^{-12}$  Sekunden nach dem Urknall zeigte die Natur eine bemerkenswerte Vielfalt. Über die erste Teilchenfamilie hinaus kündigte die Entdeckung des Myons eine **zweite Familie** an. Sie besteht aus zwei schwereren Quarks (strange und charm), dem Myon und dem Myon-Neutrino. Noch schwerer sind die Teilchen der **dritten Familie**. Die schweren Teilchen zerfallen Sekundenbruchteile nach ihrer Erzeugung in die leichteren. Deshalb beobachten wir heute im Kosmos (fast) nur die Teilchen der ersten Familie.



An Beschleunigern kann man den Urknall bei  $10^{-12}$  Sekunden „nachstellen“ und die 4 Kraftteilchen sowie alle 12 Bausteine erzeugen.

**Wieso gibt es 12 Bausteine?**  
Dieses Rätsel ist noch nicht gelöst!



„Wer hat das bestellt?“

rief 1937 der Nobelpreisträger Isidore Rabi aus, als er von der Entdeckung des Myons erfuhr. Warum schuf die Natur diesen schweren Bruder des Elektrons?

## Eine schwere Geburt – Die Entdeckung des Top-Quarks

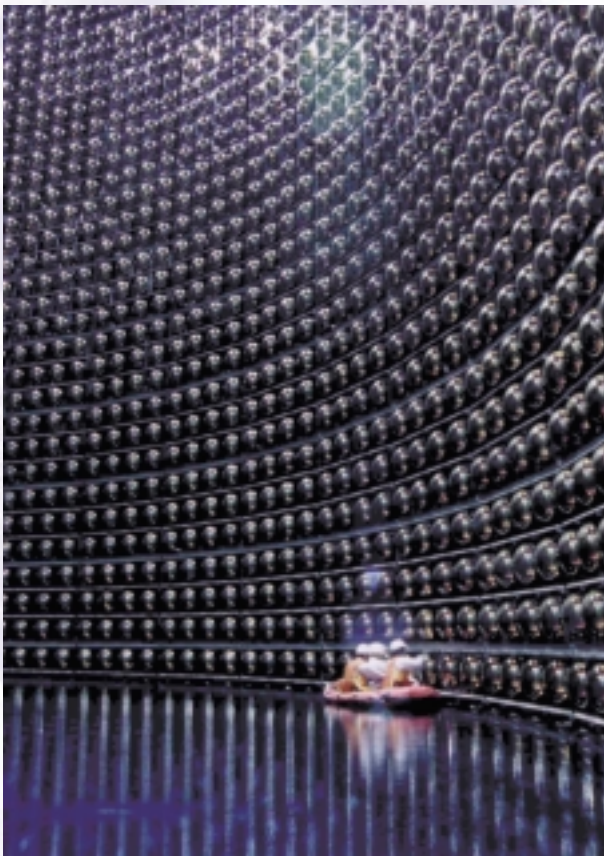
20 Jahre musste nach dem Top-Quark – dem vermutlich letzten Baustein – gesucht werden, bis es 1995 am amerikanischen TEVATRON-Beschleuniger entdeckt wurde. Die Masse eines Goldatoms in einem mehr als eine Milliarde kleinerem Volumen untergebracht!

# Neutrinos - Die Geister des Universums

Die erstaunlichsten Teilchen im Baukasten der Natur sind zweifellos die Neutrinos. Immun gegen elektromagnetische und starke Kräfte, können sie nahezu unbeeinflusst quer durch die Erde fliegen und gleichen eher Geistern als realen Teilchen.

Die im Urknall erzeugten Neutrinos erfüllen auch heute noch das Universum – mehr als 300 in jedem Kubikzentimeter in und um uns.

Neutrinos kommen auch als Boten ferner Ereignisse im Kosmos zu uns.



Im Inneren des Kamiokande-Detektors in Japan zum Nachweis von Neutrinos aus der Sonne.



Wolfgang Pauli

## Eine Idee wird Realität

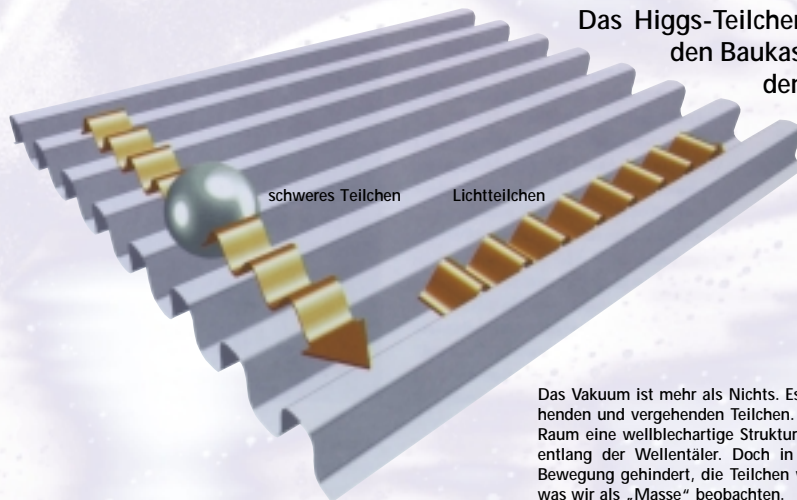
Erst 25 Jahre, nachdem Wolfgang Pauli das Neutrino „postuliert“ hatte, wurde es entdeckt. Pauli wollte mit dem unsichtbaren Neutrino erklären, wo die fehlende Energie in bestimmten radioaktiven Zerfällen bleibt.



Am Südpol entsteht das riesige Neutrinooteleskop AMANDA, bei dem die Lichtblitze von Neutrinoreaktionen mit Lichtsensoren nachgewiesen werden, die kilometertief im Eis versenkt werden.



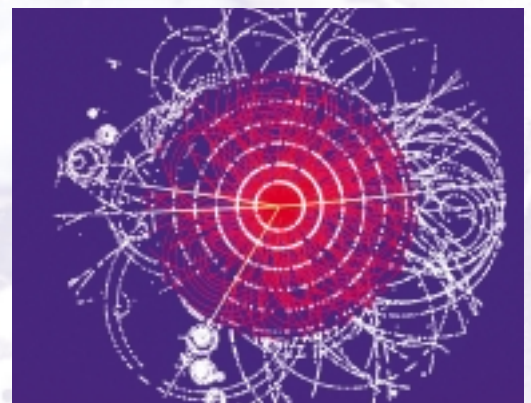
# Higgs: Warum gibt es Masse?



Das Higgs-Teilchen ist noch unentdeckt. Aber es ist für den Baukasten der Natur von zentraler Bedeutung, denn es gibt den Teilchen Masse.

Das Vakuum ist mehr als Nichts. Es ist erfüllt von spontan entstehenden und vergehenden Teilchen. Die Higgs-Teilchen geben dem Raum eine wellenartige Struktur. Lichtteilchen laufen ungestört entlang der Wellentäler. Doch in anderen Richtungen wird die Bewegung gehindert, die Teilchen werden träge – und dies ist es, was wir als „Masse“ beobachten.

Ohne Higgs-Teilchen keine Masse – so müssen wir heute annehmen. Doch wo verbirgt sich das Higgs?



## Die Suche nach dem Higgs Teilchen

hat begonnen – bisher ohne Erfolg.

Das Higgs-Teilchen ist wahrscheinlich für die gegenwärtigen Beschleuniger zu schwer. Die Hoffnung liegt darum auf den zukünftigen Beschleunigern LHC (Genf) und TESLA (Hamburg).

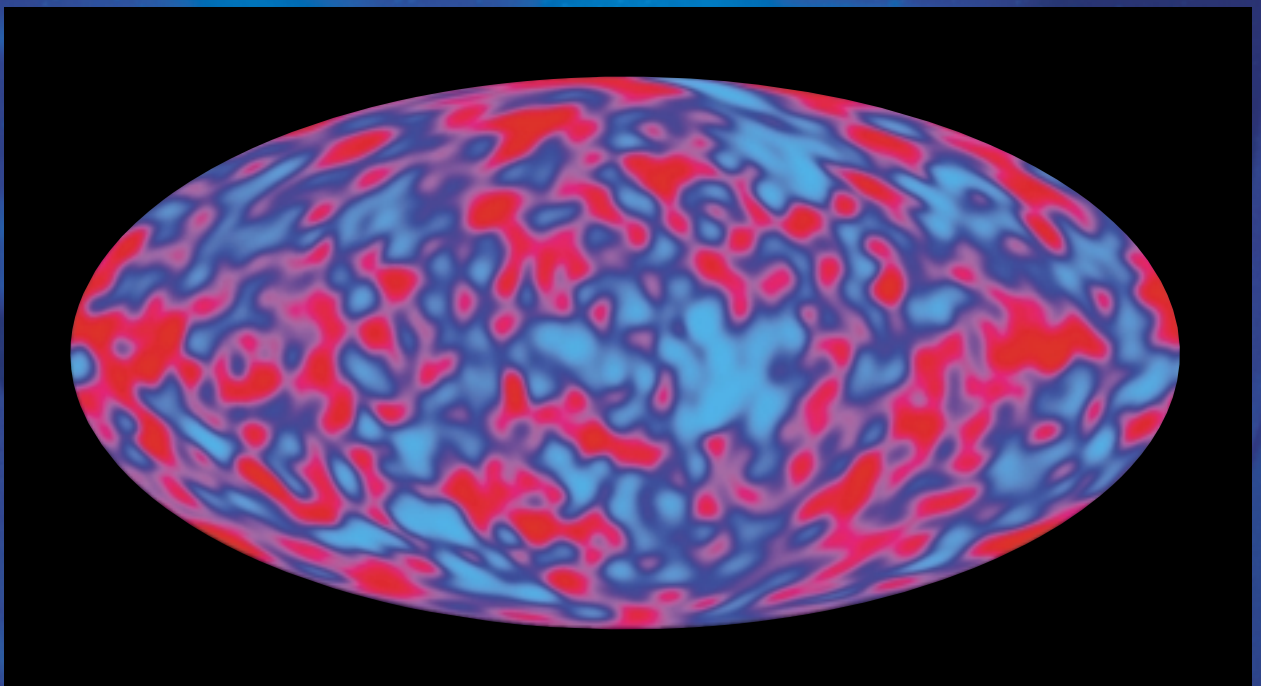
Computersimulation des Zerfalls eines Higgs-Teilchens im ATLAS-Detektor am zukünftigen Beschleuniger LHC in Genf.



# Die kosmische Inflation

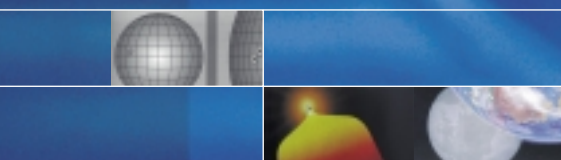
Bewegt man sich weiter in der Zeit zurück, so wird man vermutlich von einer Explosion erfasst, die alles, was danach kommt, in den Schatten stellt. Das überhitzte Universum explodierte bei einer Temperatur von  $10^{28}$  Grad wie überhitztes Wasser, das sich explosionsartig in Dampf umwandelt. Statt um Wasser handelte es sich aber dabei um eine mit Higgs-Teilchen angefüllte Brühe.

Die Explosion hat das Universum innerhalb von  $10^{-32}$  Sekunden um mindestens das  $10^{30}$ -fache aufgebläht. Erst nach dieser „Inflation“ erfolgte die Expansion des Kosmos wieder mit etwa der Rate, die wir heute beobachten. Das Bild des COBE-Satelliten ist ein Foto des Universums nach dieser Explosion.



Aufnahme mit dem COBE-Satelliten von den Temperaturschwankungen in der kosmischen Mikrowellenstrahlung.

Geistesgegenwärtig hatte Gott damals vom Urknall ein Photo geschossen, welches er immer noch recht eindrucksvoll findet.

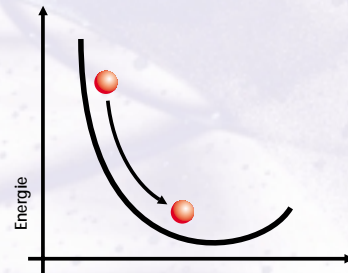




# Higgs: Treibgas der Inflation

## Das Inflationsmodell:

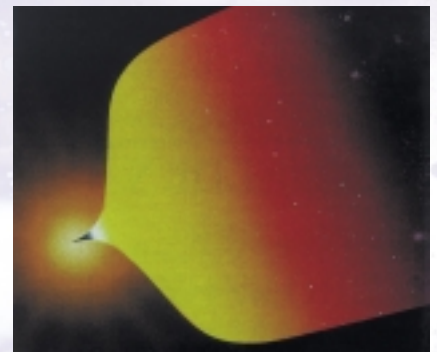
Am Anfang war das Universum von einer mit sehr viel Energie aufgeladenen „Flüssigkeit aus Higgs-Teilchen“ beherrscht. So wie ein Ball in eine Mulde, rollt das Higgs-Feld in ein Energieminimum. Die dabei abgegebene Energie war das Treibgas für ein explosionsartiges Aufblähen, die Inflation des Universums.



Nur wenn es Higgs-Teilchen gibt, können wir verstehen, weshalb unser Universum so groß und so alt geworden ist.

## Doch gibt es sie?

Auf diese Frage ist uns die Teilchenphysik die Antwort bisher noch schuldig.



Alan Guth

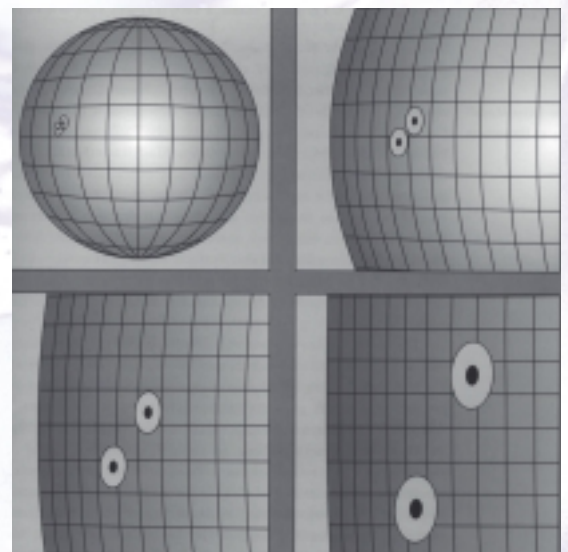


Andrej Linde

Alan Guth (USA) und Andrej Linde (damals UdSSR) kamen Anfang der achtziger Jahre auf das Inflationsmodell.

## Falten im Raum

Wenn das Inflationsmodell stimmt, dann darf die kosmische Mikrowellenstrahlung nicht völlig gleichmäßig im Raum verteilt sein. Sie muss winzige Schwankungen um einige zehnmillionstel Grad aufweisen. 1992 wurden sie tatsächlich gefunden. Die Himmelskarte des COBE-Satelliten (Tafel links) ist ein Schnappschuss des Universums  $10^{-35}$  Sekunden nach dem Urknall.



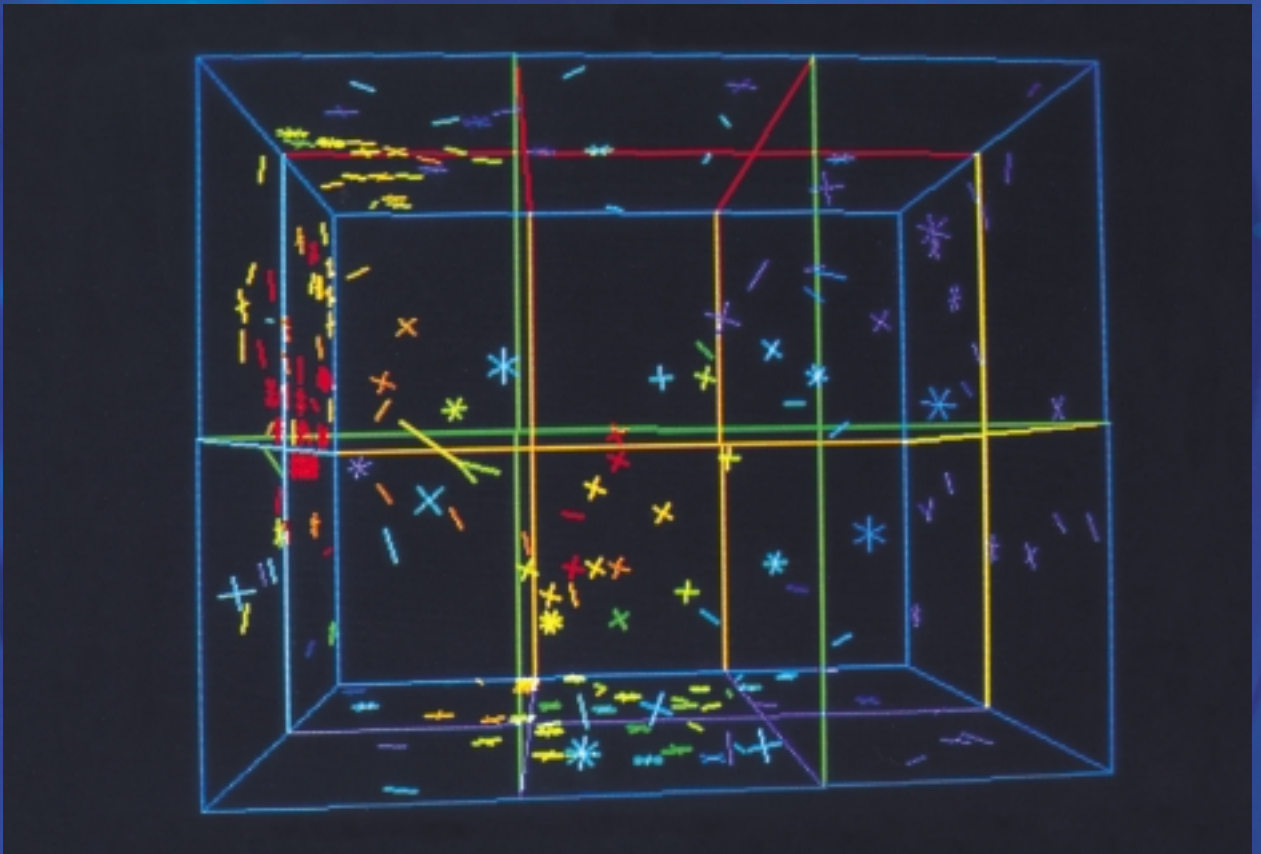
Die Inflation würde viele grundlegende Fragen der Kosmologie lösen, z.B. warum das Universum gar nicht oder nur wenig in sich gekrümmt ist. Wie immer auch die Krümmung des Universums zu Beginn gewesen sein mag: die Inflation zieht den Raum so stark auseinander, dass er danach „euklidisch“ (ungekrümmt) erscheint.



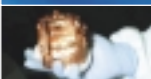
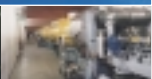
# Die große Vereinigung

$10^{-35}$  Sekunden nach dem Urknall:

Starke, elektromagnetische und schwache Kraft sind ununterscheidbar und zu einer vereinheitlichten Kraft verschmolzen.



Das Bild zeigt eine Computersimulation der Lichtflecken, die der Zerfall eines Protons auf den Wänden eines Wassertanks hervorrufen würde. Der Protonzerfall ist eine der Konsequenzen der großen Vereinigung.





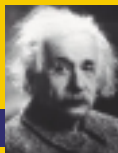
# Die Urkraft

Die Kraftteilchen der Urkraft sind so schwer, dass ihre Massen selbst die der schwersten bekannten Teilchen lächerlich erscheinen lassen. Es ist unmöglich diese Kraftteilchen in Beschleunigern zu erzeugen und damit die Urkraft direkt nachzuweisen.

## Warten auf den Proton-Zerfall

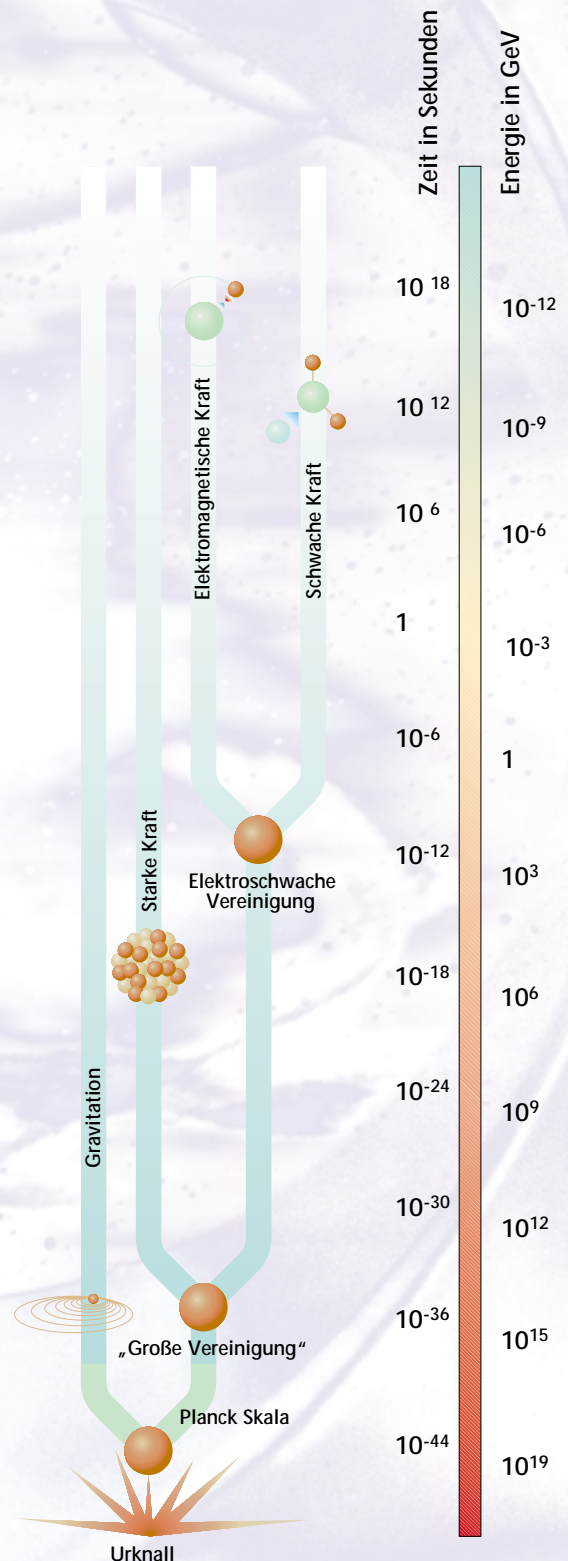
Aber nach einer Konsequenz der Urkraft lässt sich suchen: Durch die Urkraft wäre das Proton nicht stabil! Das Proton hätte eine mittlere Lebensdauer von etwa  $10^{33}$  Jahren. Das ist  $10^{23}$  mal mehr als das Alter des Universums!

Beobachtet man Protonen – etwa in einem riesigen Wassertank – über mehrere Jahre, dann hat man trotzdem eine Chance, einen solchen Zerfall zu registrieren.



Albert Einstein

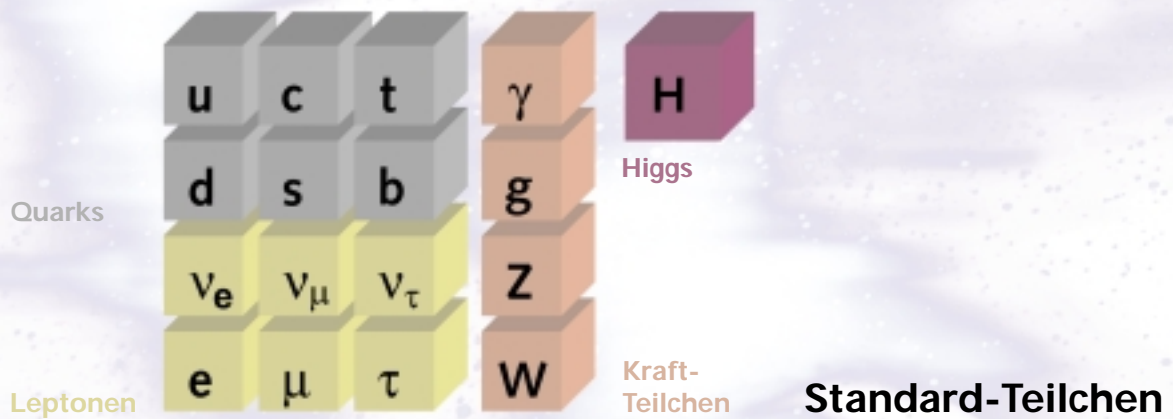
Einstein verbrachte die letzten Jahrzehnte seines Lebens mit dem Versuch, alle Naturkräfte auf ein gemeinsames Grundprinzip zurückzuführen – vergeblich.



Eine Zeitreise an den Anfang des Universums: Die Skala zeigt links das Alter des Universums vom Urknall bis heute in Sekunden, rechts die mittlere Energie (in Einheiten der Proton-Masse) von Strahlung und Materieteilchen.

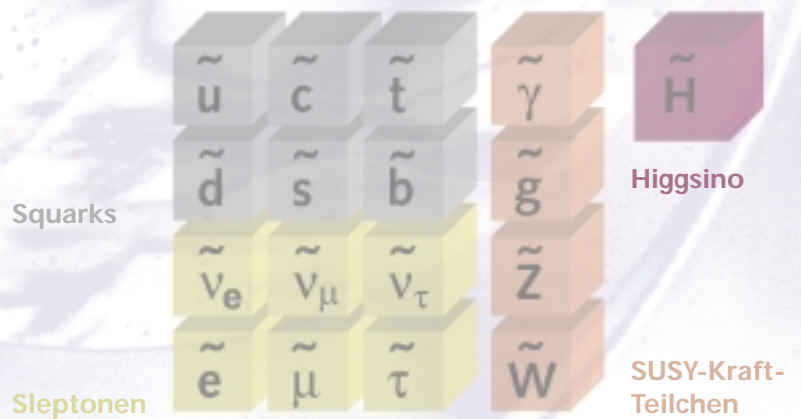
# Supersymmetrie

Der überzeugendste Weg, elektroschwache und starke Kraft zu vereinen, führt zu einem neuen, grundlegenden Naturprinzip: der **Supersymmetrie (SUSY)**.



Die Supersymmetrie verlangt, dass es zu jeder „normalen“ Teilchenart einen SUSY-Partner gibt.

## SUSY-Teilchen



Die leichtesten der SUSY-Teilchen dürften leicht genug sein, um an Beschleunigern erzeugt zu werden. Es gibt darum zwei Strategien zur SUSY-Suche: Erzeugung in Teilchenstößen in irdischen Labors und die Suche im Kosmos.

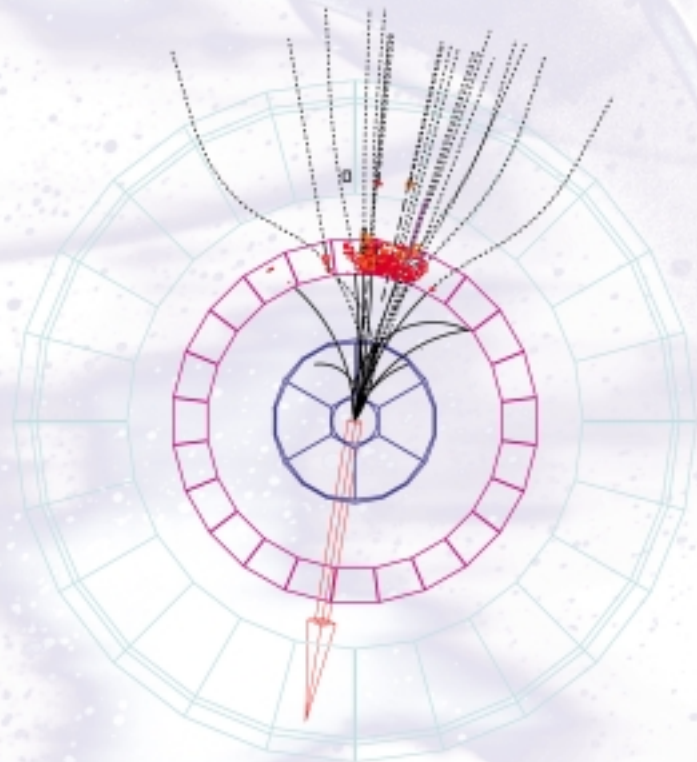


# SUSY - Der irdische Weg

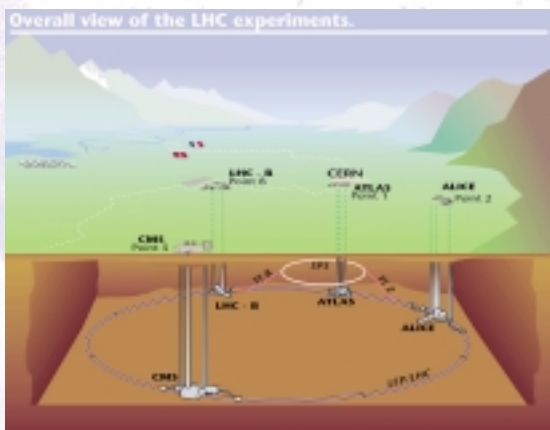
Wenn die Natur durch die Supersymmetrie beschrieben wird, dann können die leichtesten SUSY-Teilchen nicht schwerer als einige hundert Protonmassen sein – vielleicht gerade noch zu schwer, um an den gegenwärtigen Beschleunigern erzeugt zu werden, aber leicht genug, um an zwei zukünftigen Beschleunigern ins Netz zu gehen.

Zeugen des frühesten Universums noch vor der kosmischen Inflation, 15 Milliarden Jahre später in Teilchenstößen auf der Erde geboren – eine schwindelerregende Vorstellung.

Die beiden Beschleuniger sind der Large Hadron Collider LHC, der im Jahr 2005 in Genf den Betrieb aufnehmen wird, und der Beschleuniger TESLA, der am DESY in Hamburg geplant ist.



Die Beobachtung solcher Teilchenreaktionen sorgen immer wieder für Aufregung bei den Physikern: Hier könnte ein SUSY-Teilchen entstanden sein. Aber bisher sind SUSY-Teilchen noch nie zweifelsfrei nachgewiesen worden.



Der Large Hadron Collider hat einen Umfang von knapp 30 km. In der Endphase wird er Protonenstrahlen von 7 TeV aufeinanderschießen. Das bedeutet, dass die Bewegungsenergie der Protonen die Energie, die in ihrer Masse steckt ( $E=mc^2$ ), um fast das 10 000-fache übersteigt.



Blick in die 100 m lange TESLA-Testanlage bei DESY. In TESLA sollen Elektronen und Positronen mit 500 GeV (später sogar mehr) aufeinanderprallen. Die Teilchen werden auf zwei geraden, je 15 km langen Strecken beschleunigt.

# SUSY – Der kosmische Weg

## Die „Dunkle Materie“ im Weltall



Aus der Geschwindigkeit, mit der die Außenbereiche unserer Galaxis rotieren, folgt, dass sie nur zu etwa 10% aus der Materie besteht, die wir sehen. Der Rest ist die „Dunkle Materie“, in der wir wie in einem kalten, unsichtbaren Ozean schwimmen. Wie die kosmische Mikrowellenstrahlung ist auch die dunkle Materie ein Fossil des Urknalls. Bilden die SUSY-Teilchen die „Dunkle Materie“?

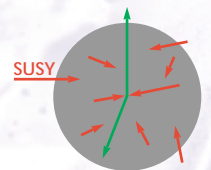
## SUSY-Teilchen im Kristall

Stößt ein SUSY-Teilchen in einem tiefgekühlten Kristall auf ein Atom, so beginnt dieses zu schwingen. Die Schwingungen pflanzen sich wie Wellen fort und erwärmen den Kristall um ein millionstel Grad. Der deutsch-englische Detektor CRESST wird, abgeschirmt gegen die kosmische Strahlung, in einem Tunnel unter dem Gran-Sasso-Massiv in Italien betrieben. Im Bild ein Prototyp des supraleitenden Detektors.



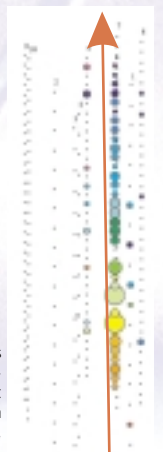
## SUSY-Teilchen aus dem Erdzentrum

Treffen zwei SUSY-Teilchen aufeinander, so können sie in zwei Bündel normaler Teilchen – darunter auch Neutrinos – zerstrahlen. Falls sich im Erdzentrum aufgrund der Schwerkraft genügend SUSY-Teilchen angesammelt haben, müssten sie gelegentlich zusammenstossen. Dann müsste man aus dieser Richtung Neutrinos beobachten. Das AMANDA-Teleskop am Südpol sucht danach.



Die AMANDA-Gruppe am Südpol.

Die Spur eines Myons, das durch ein Neutrino aus Richtung des Erdkerns erzeugt wurde. Die Kreise markieren getroffene Lichtsensoren, die Farbe die Ansprechzeit.







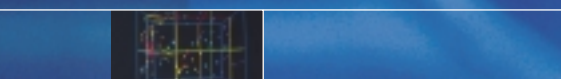
# Der Anfang?

Wenn wir uns dem Urknall auf weniger als  $10^{-43}$  Sekunden nähern, so steigt die Temperatur auf über  $10^{32}$  Grad an. Hier verlieren alle uns bekannten Gesetze ihre Gültigkeit.

Raum und Zeit – bisher die Bühne für das kosmische Drama – werden nun selbst zu Mitspielern. Sie können jetzt, wenn überhaupt, nur noch in der Sprache der Quantentheorie beschrieben werden. Raum und Zeit werden „schaumig“. Dieser Zustand übersteigt sowohl unsere Begriffe wie unsere mathematischen Modelle. Die Frage nach einem „Anfang“ bleibt daher heute rein spekulativ.



Raum-Zeit-Schaum?

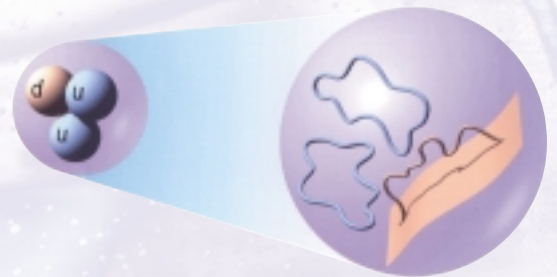


# Elementarteilchen: winzige schwingende Schleifen?

Es gibt eine Theorie, die Elementarteilchen als Schleifen („Strings“) beschreibt. Nach der Superstring-Theorie haben die Schleifen eine Ausdehnung in der Größenordnung der Planck-Länge von  $10^{-33}$  cm. Wie Töne durch eine schwingende Saite, ergibt sich die Vielfalt der Teilchen durch verschiedene Schwingungsformen der Strings.

Mit der Superstring-Theorie hoffen die Physiker, die Materie bis zu ihren kleinsten Ausdehnungen und, damit verbunden, das Universum bis zu seinem frühesten In-Erscheinung-Treten, zur Planck-Länge und Planck-Zeit hinunter, verstehen zu können.

Diese Theorie vereinheitlicht die Beschreibung aller Teilchen und aller Kräfte, einschließlich der Schwerkraft. Sie setzt die Gültigkeit der Supersymmetrie voraus – ein weiterer Anlass für die besondere Spannung, mit der Physiker darauf warten, ob supersymmetrische Teilchen an Beschleunigern oder im Kosmos tatsächlich aufgespürt werden.



Die Superstrings „lebten“ anfangs in einem 10-dimensionalen Raum.

Nur 4 der 10 Dimensionen haben an der Expansion des Universums teilgenommen und sind zu unserer Raum-Zeit geworden. Die anderen 6 Dimensionen blieben winzig und tief im Inneren der Teilchen „aufgerollt“ – so wie die Oberfläche eines sehr dünnen Zylinders, der von Ferne als Faden erscheint.



Max Planck

Die Planck-Länge geht auf Max Planck, den Begründer der Quantentheorie, zurück. Er hat als erster bemerkt, dass bei Abständen von  $10^{-33}$  cm und Zeitintervallen von  $10^{-43}$  Sekunden die Gravitation eine beherrschende Rolle spielt und die Physik dort grundsätzlich anders sein muss.

