

Bausteine des Universums:

Auf der Suche nach dem Unteilbaren



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Prof. Dr.
Robert Roth

Saturday Morning Physics 2017

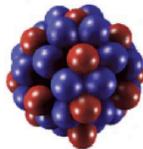
Saturday Morning Physics 2017
Prof. Dr. Robert Roth
robert.roth@physik.tu-darmstadt.de

Welt der Materie

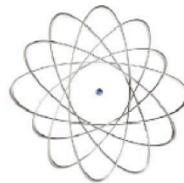
Nukleon
 10^{-15}m



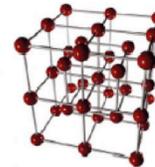
Kern
 10^{-14}m



Atom
 10^{-10}m



Kristall
 10^{-9}m



Makro
 10^{-1}m



Wir begeben uns auf die Reise in die mikroskopische Welt der Materie. Das Atom und der Atomkern sind aber nur Zwischenstationen auf der Suche nach dem Unteilbaren. Sind die Protonen und Neutronen des Atomkerns wirklich elementare Teilchen?

Die Suche nach dem Unteilbaren:

- Historie
- Experimente
- Theorien
- Aktuelles

Der Vortrag ist in vier Blöcke aufgeteilt: Nach einem kurzen Blick auf die Historie diskutieren wir moderne Experimente, die auf der Suche nach dem Unteilbaren wertvolle Einblicke liefern. Der Hauptteil des Vortrages beschäftigt sich mit den Theorien, die uns die Spielregeln der Welt der Elementarteilchen liefern.

Historie

Erste Schritte auf der Suche nach dem Unteilbaren



Die ersten Schritte auf der Suche nach dem Unteilbaren wurden schon weit in der Vergangenheit gemacht...

Naturphilosophie der Antike



- Versuch, die Formenvielfalt der Natur auf wenige einfache Bausteine zurückzuführen
- Griechenland (500 v. Chr.):
Erde, Feuer, Wasser, Luft
- China:
Erde, Feuer, Wasser, Luft,
Metall



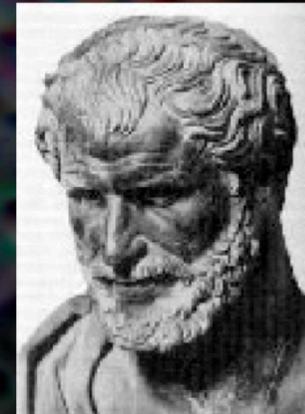
Bereits in der Antike beschäftigten sich Naturphilosophen mit der Frage nach dem innersten Aufbau der Materie. Sie versuchten, die Formenvielfalt der Natur auf wenige elementare Bausteine zurückzuführen.

Demokrit (um 400 v. Chr.)



“Materie muß aus kleinsten unsichtbaren Bausteinen aufgebaut sein.”

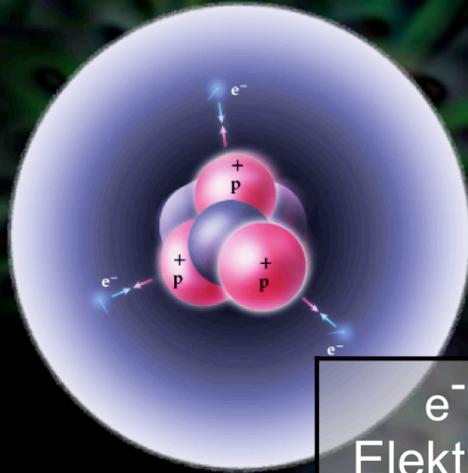
“Bausteine, aus denen sich alles andere zusammensetzt, die aber selbst nicht mehr teilbar sind.”



➔ **Atomos**

Der eigentliche Begriff des Unteilbaren (Atomos) wurde von Demokrit geprägt. Seine Definition des Unteilbaren ist noch heute anwendbar.

1932: Physikalisches Weltbild

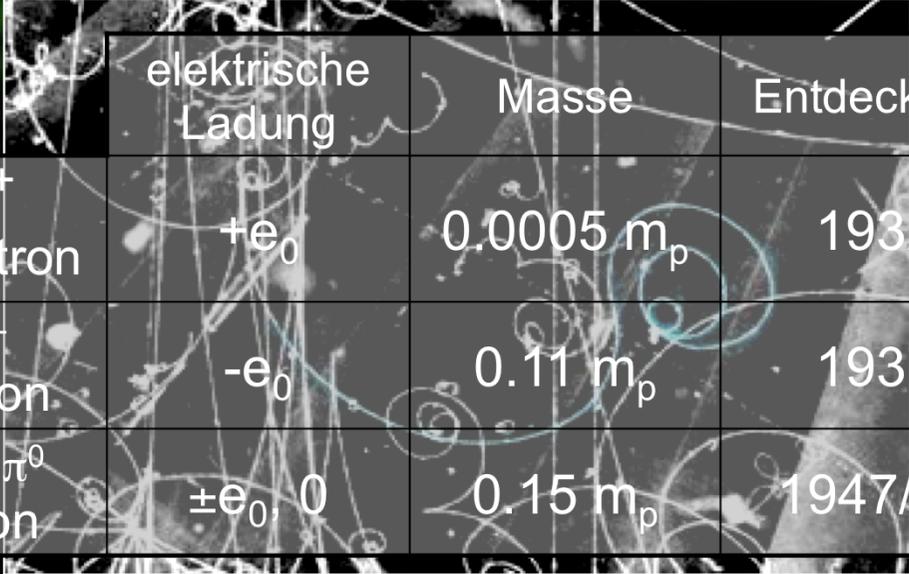


	elektrische Ladung	Masse
e ⁻ Elektron	-e ₀	0.0005 m _p
p Proton	+e ₀	1 m _p (1.7 × 10 ⁻²⁷ kg)
n Neutron	0	1.0014 m _p

Um 1932 ergab sich für kurze Zeit ein einfaches Bild der mikroskopischen Welt der Atome. Alle Materie schien aus den "elementaren" Bausteinen Elektron, Proton und Neutron zusammengesetzt zu sein.

Höhenstrahlung

- Höhenstrahlung liefert neue "exotische" Teilchen



	elektrische Ladung	Masse	Entdeckung
e^+ Positron	$+e_0$	$0.0005 m_p$	1932
μ^- Myon	$-e_0$	$0.11 m_p$	1937
π^\pm, π^0 Pion	$\pm e_0, 0$	$0.15 m_p$	1947/50

Die Höhenstrahlung offenbarte jedoch recht bald, daß es mehr "elementare" Teilchen gibt als zunächst angenommen. Ihre Eigenschaften (Masse, Ladung) können anhand von Teilchenspuren auf photographischen Platten bestimmt werden.

Experimente

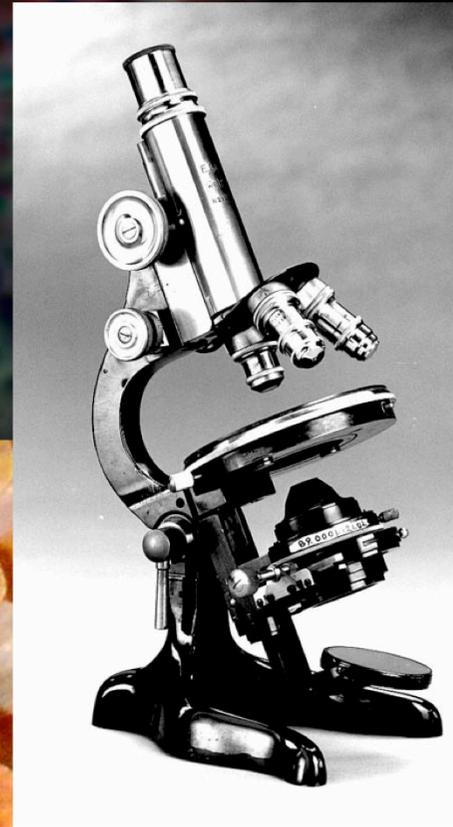
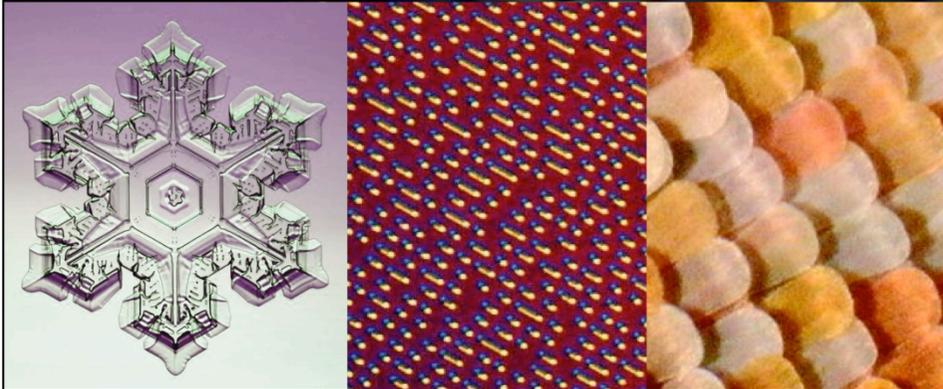
Werkzeuge auf der Suche nach dem Unteilbaren



Wie können wir systematisch in die mikroskopische Welt der kleinsten Materiebausteine vordringen? Was sind die Mikroskope der modernen Elementarteilchenphysik und wie funktionieren sie?

Mikroskope

- Wellenlänge limitiert das Auflösungsvermögen
- sichtbares Licht:
 $\lambda = 400 - 700 \text{ nm}$



Ein Lichtmikroskop kann uns zwar beeindruckende Bilder der Mikrowelt liefern, allerdings ist sein Auflösungsvermögen durch die Wellenlänge der verwendeten Strahlung (sichtbares Licht) beschränkt.

Teilchen und Wellen

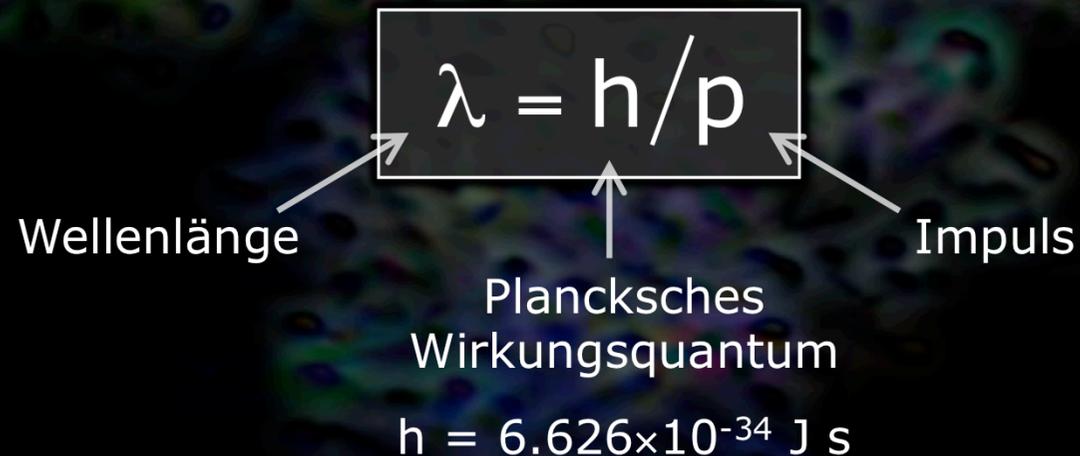
- Nutze den Wellencharakter von Teilchen
- de Broglie Wellenlänge:

$$\lambda = h/p$$

Wellenlänge

Plancksches Wirkungsquantum
 $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J s}$

Impuls



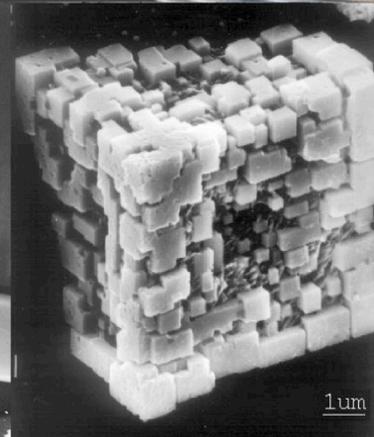
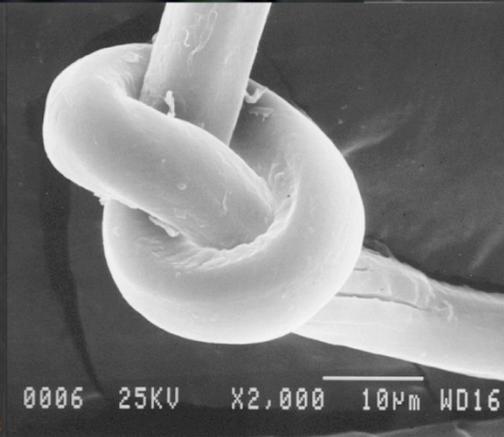
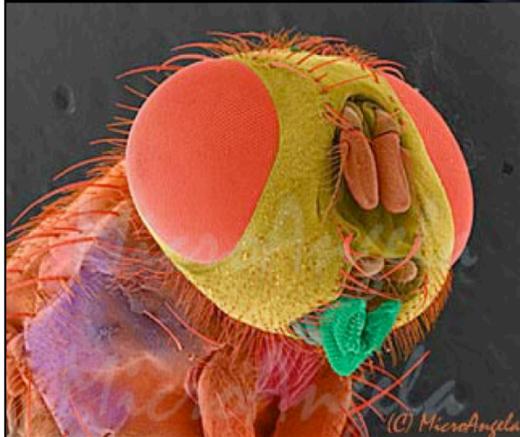
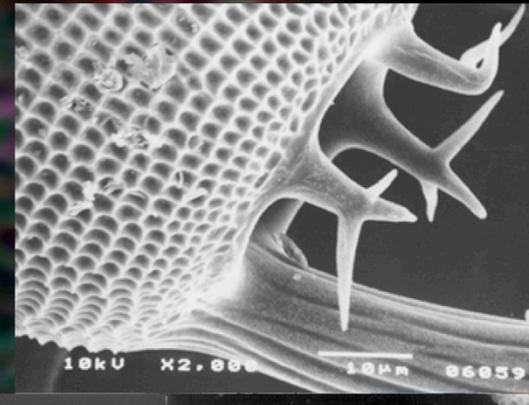
Um zu kürzeren Wellenlängen zu kommen, kann man sich den Wellencharakter von Teilchen zunutze machen. Ein Teilchen mit hohem Impuls (Geschwindigkeit bzw. Energie) entspricht einer Welle mit sehr kleiner Wellenlänge.

Elektronenmikroskop

- Probe mit beschleunigten Elektronen beleuchtet

$$E = 10 \text{ keV}$$

$$\lambda = 0.01 \text{ nm} = 10^{-11} \text{ m}$$



Das Elektronenmikroskop ist die einfachste Variante eines Teilchenmikroskops. Die Auflösung ist schon weit besser als beim Lichtmikroskop, allerdings ist man noch weit von den Elementarteilchen entfernt.

S-DALINAC @ Darmstadt



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Elektronen

$$E = 100 \text{ MeV}$$

$$\lambda = 10 \text{ fm} = 10^{-14} \text{ m}$$

Elektronenbeschleuniger sind im Prinzip „große Elektronenmikroskope“ – der supraleitende Darmstädter Elektronenbeschleuniger ist ein Beispiel. Das Auflösungsvermögen erlaubt die Untersuchung der Struktur von Atomkernen.

FAIR / GSI @ Darmstadt



Protonen

$$E = 90 \text{ GeV}$$

$$\lambda = 0.01 \text{ fm} = 10^{-17} \text{ m}$$

Blei-Kerne

$$E = 6 \text{ TeV}$$

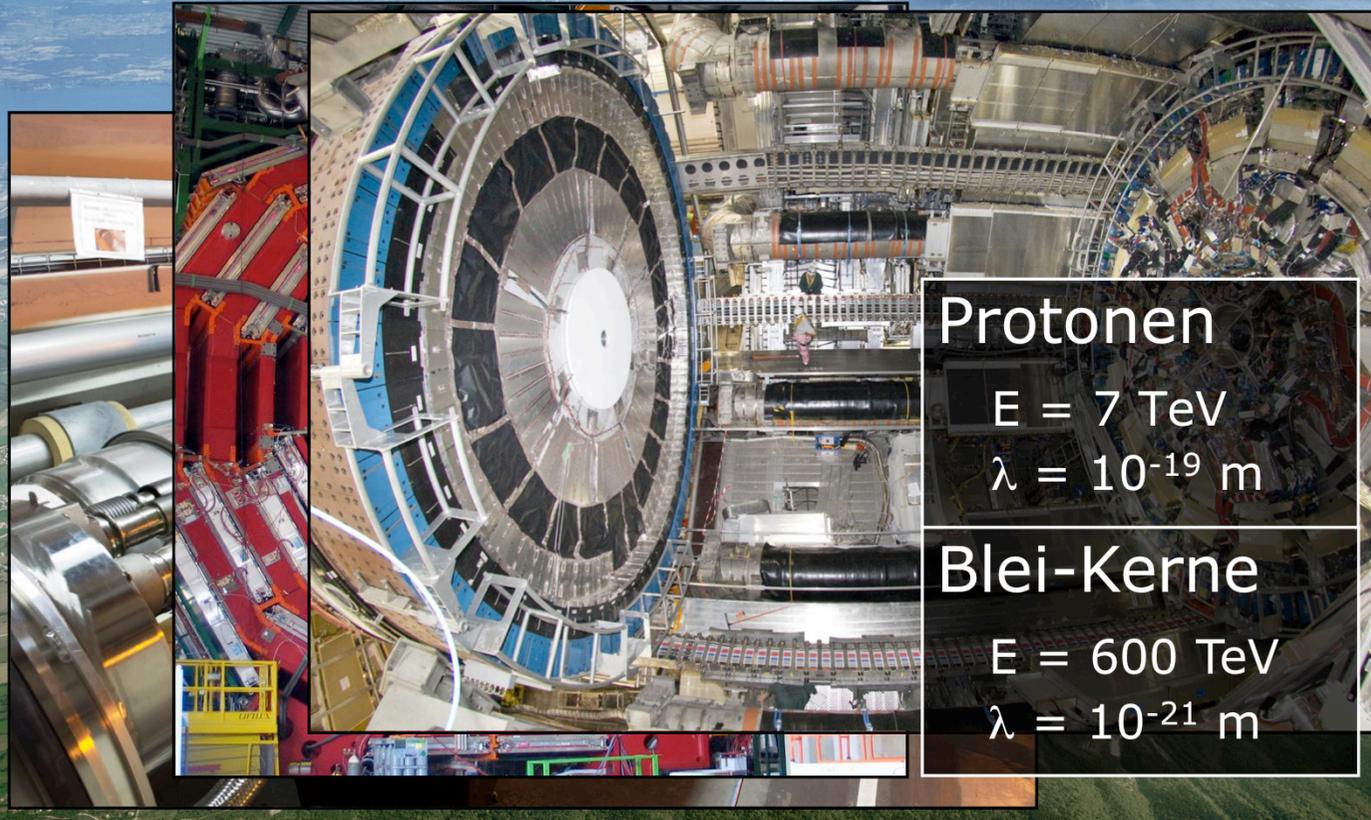
$$\lambda = 0.0001 \text{ fm} = 10^{-19} \text{ m}$$

Im Rahmen des internationalen FAIR-Projekts wird in Darmstadt in den nächsten Jahren eine einzigartige Anlage zum Studium der Struktur von Atomkernen und ihrer Bausteine hier in Darmstadt entstehen.

LHC / CERN @ Genf



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Der weltweit leistungsfähigste Beschleuniger wird derzeit am Europäischen Kernforschungszentrum CERN in Genf betrieben. Der Large Hadron Collider (LHC) ist Ende 2009 endgültig in Betrieb gegangen (nach einige Anfangsschwierigkeiten) und sammelt derzeit Daten, die eine Schlüsselrolle bei der Suche nach dem Unteilbaren

Teilchenerzeugung



- Kollision hochenergetischer Teilchen...



http://nobelprize.org/educational_games/physics/matter

Bei der Kollision von Teilchen mit derart hohen Energien geschieht mehr als in einem gewöhnlichen Mikroskop. Man beobachtet nicht mehr nur die vorhandenen Teilchen, sondern erzeugt neue, andere Teilchen!

Teilchenerzeugung

- Kinetische Energie wird in Masse umgesetzt:

$$E = mc^2$$

$$= \sqrt{m_0^2 c^4 + p^2 c^2}$$

↑ ↑
Ruhemasse Impuls

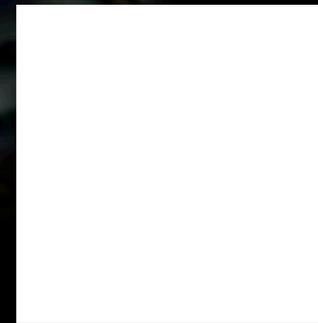


Die Möglichkeit, Bewegungsenergie in Masse (d.h. neue Teilchen) umzuwandeln, wird bereits durch die wohl bekannteste Gleichung der Physik beschrieben. Einsteins Masse-Energie-Äquivalenz bestimmt, wieviel Energie es kostet, ein Teilchen einer gewissen Masse zu erzeugen.

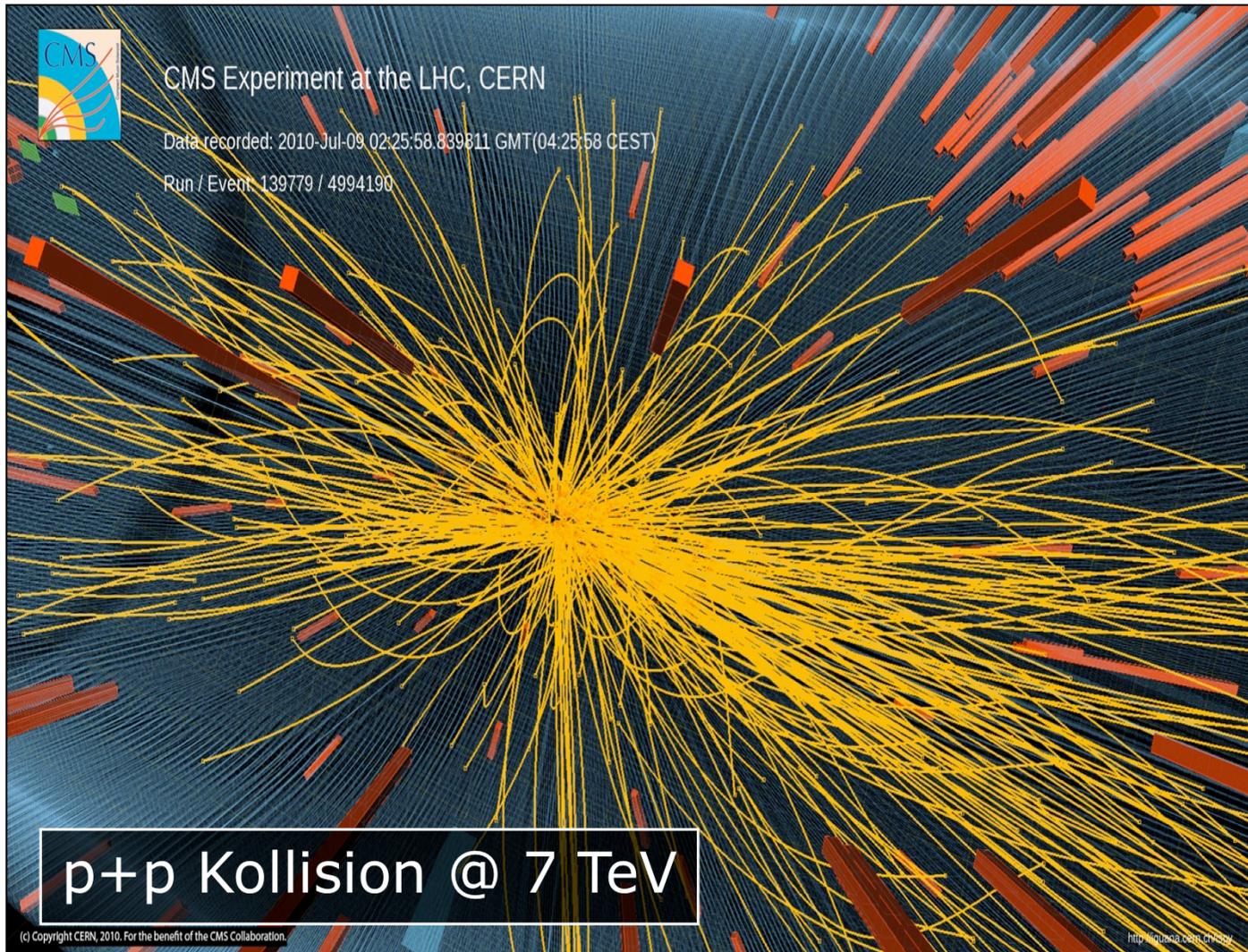
Teilchenerzeugung



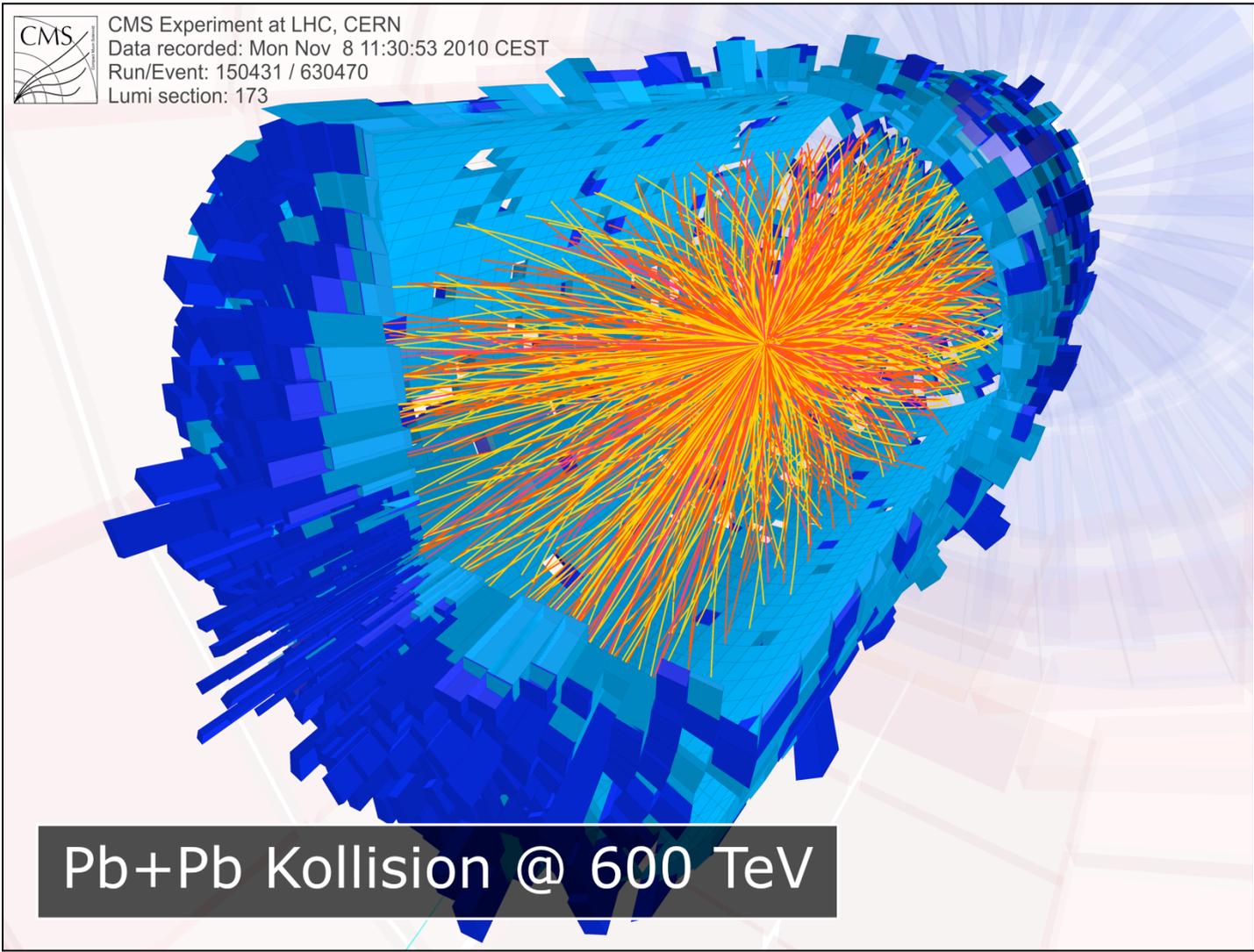
- Paarerzeugung
 - Energie \rightarrow Ruhemasse
 - Teilchen-Antiteilchenpaar wird erzeugt
- Paarvernichtung
 - Ruhemasse \rightarrow Energie
 - Teilchen und zugehöriges Antiteilchen annihilieren sich



Die Erzeugung von Teilchen folgt einer wichtigen Regel: Teilchen können nur paarweise als Teilchen + Antiteilchen erzeugt werden. Umgekehrt können sie sich auch nur paarweise vernichten.

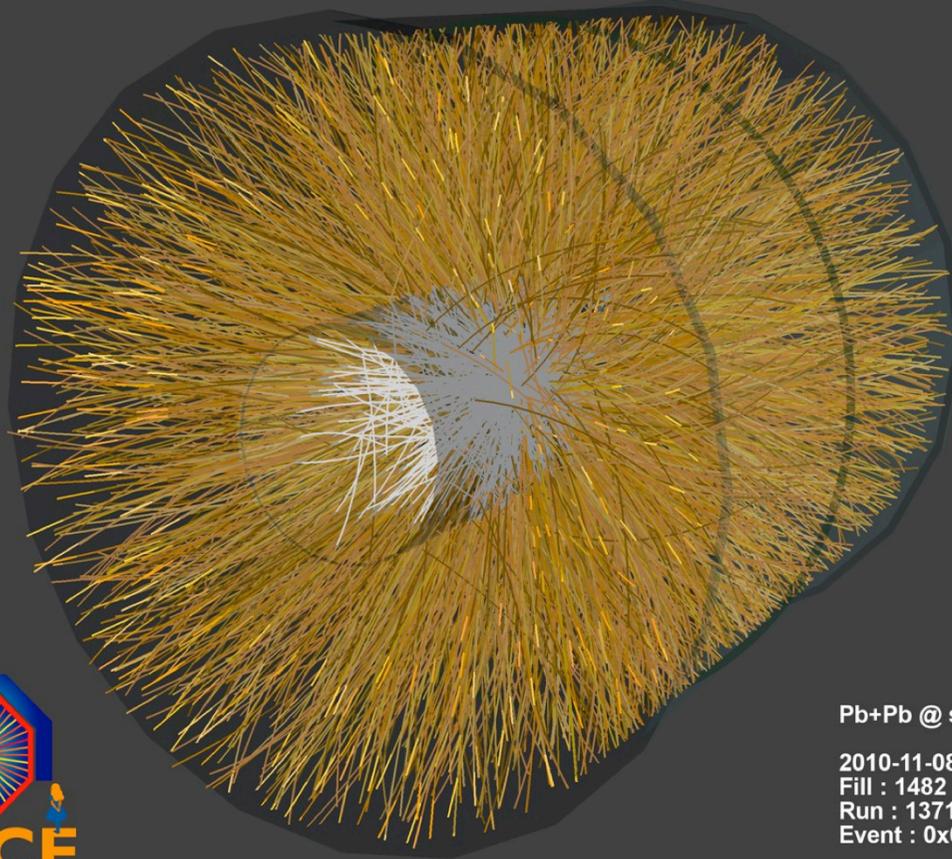


Bei der Kollision hochenergetischer Teilchen wird eine große Zahl von Teilchen-Antiteilchen-Paaren erzeugt. Deren Flugbahnen werden in den Detektoren registriert. Aus ihnen lassen sich wichtige Eigenschaften der Teilchen extrahieren.



Im Gegensatz zu den antiken Photoplaten müssen die Teilchenspuren in modernen Detektoren durch aufwendige und rechenzeitintensive Analyseverfahren aus den Rohdaten rekonstruiert werden.

Pb+Pb Kollision @ 600 TeV



Pb+Pb @ sqrt(s) = 2.76 ATeV

2010-11-08 11:30:46

Fill : 1482

Run : 137124

Event : 0x00000000D3BBE693

Allein die Erfassung und Speicherung der Unmenge an Daten ist eine technische Herausforderung. Am ALICE Experiment werden pro Jahr rund 1 PetaByte an Daten erzeugt, die verwaltet werden müssen.

Zusammenfassung



- Teilchenbeschleuniger als Mikroskop mit extrem hohem Auflösungsvermögen
- Erzeugung neuer Teilchen durch Umwandlung von kinetischer Energie in Masse
- Unüberschaubarer Zoo von "elementaren" Teilchen

Wir haben gesehen, daß moderne Teilchenbeschleuniger nicht nur als Mikroskop, sondern auch als Quelle für neue Teilchen fungieren. Sie haben einen unüberschaubaren Zoo von "Elementarteilchen" ans Licht gebracht.

Theorien



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Wie bringt man Ordnung in das
Chaos der Elementarteilchen?

Die Aufgabe der Theorie ist es nun, Ordnung in den Zoo der Elementarteilchen zu bringen. Welche fundamentalen physikalischen Prinzipien bestimmen ihre Eigenschaften?

Murray Gell-Mann (1964)



- Einfaches Ordnungsschema für den Zoo der Elementarteilchen
- Hadronen bestehen aus zwei oder drei abstrakten Bausteinen



➔ **Quarks**

“Three Quarks for Muster Mark” (J. Joyce)

Murray Gell-Mann entdeckte ein einfaches Ordnungsschema der Elementarteilchen – ganz analog zum Periodensystem der Elemente, das von Dimitriy Mendeleev 100 Jahre zuvor entdeckt wurde. Die Quarks waren zunächst nur abstrakte Bausteine, daß es sich um physikalische existierende Teilchen handelt, wurde erst später

Quarks

	Flavour	"Masse"	el. Ladung
3. Fam. 2. Fam. 1. Fam.	u up	0.002 GeV	+2/3 e_0
	d down	0.005 GeV	-1/3 e_0
	s strange	0.095 GeV	-1/3 e_0
	c charm	1.25 GeV	+2/3 e_0
	b bottom	4.2 GeV	-1/3 e_0
	t top	174 GeV	+2/3 e_0

$1 m_p \approx 1 \text{ GeV}$

+ Anti-Quarks mit umgekehrter Ladung

Es gibt verschiedene Sorten von Quarks, sog. Flavours oder "Geschmacksrichtungen". Heute geht man von sechs Flavours, die in drei Familien organisiert sind, aus. Zu jedem Quark existiert ein zugehöriges Anti-Quark.

Farb-Freiheitsgrad

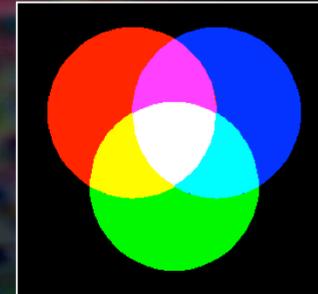
- Quarks tragen zusätzliche Quantenzahl "Farbe"
- Jeder Quark-Flavour kommt in drei Farben vor (rot, grün, blau)
- Anti-Quarks haben entsprechende Anti-Farben (cyan, magenta, gelb)



Neben einem "Geschmack" haben Quarks auch noch eine "Farbe". All diese Quantenzahlen beschreiben – wie die Bilder und Farben von Skatkarten – Eigenschaften, die für die Formulierung der Spielregeln wichtig sind.

Farbneutralität

- Prinzip: Physikalische Teilchen müssen "weiß" sein



- 1) keine isolierten Quarks
- 2) Zwei-Quark-Systeme (z.B. rot + anti-rot)
➔ Mesonen
- 3) Drei-Quark-Systeme (rot + grün + blau)
➔ Baryonen

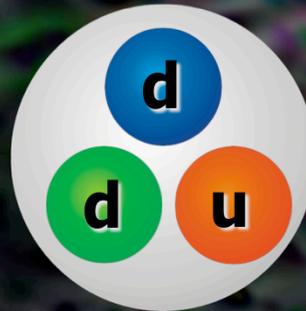
Neben einem "Geschmack" haben Quarks auch noch eine "Farbe". All diese Quantenzahlen beschreiben – wie die Bilder und Farben von Skatkarten – Eigenschaften, die für die Formulierung der Spielregeln wichtig sind.

Teilchenbaukasten

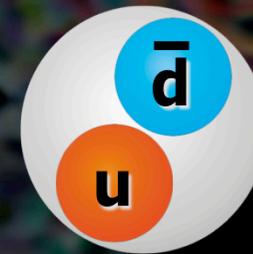
Proton



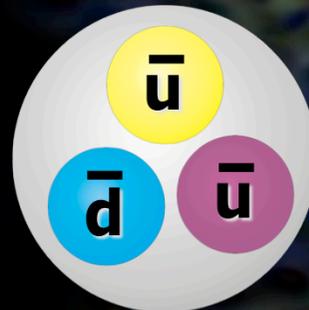
Neutron



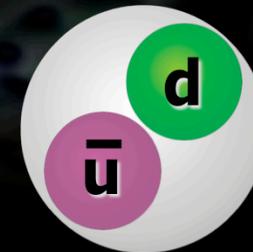
Pion π^+



Anti-Proton

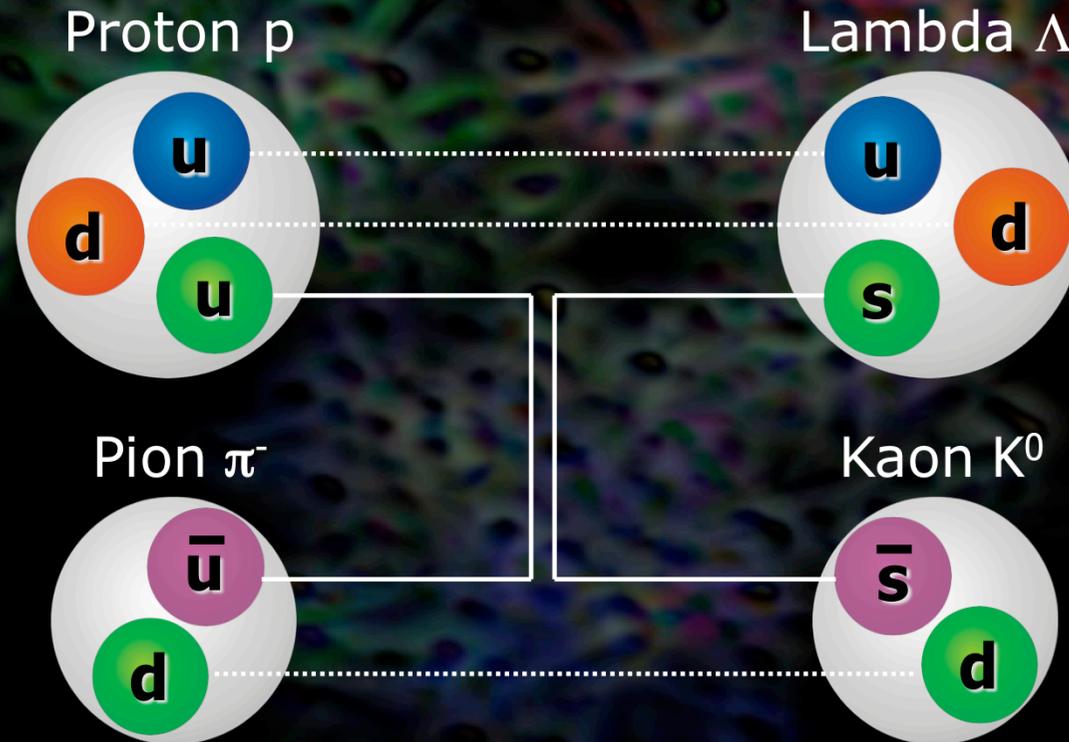


Pion π^-



Unter Berücksichtigung der Farbneutralität können nun die verschiedenen Elementarteilchen des Zoos zusammgebaut werden, z.B. die Drei-Quark-Objekte Proton und Neutron (und die entsprechenden Antiteilchen) oder die aus zwei Quarks bestehenden Pionen.

Reaktionen: $p + \pi^- \rightarrow \Lambda + K^0$



Die einfachsten Reaktionen zwischen Elementarteilchen entstehen durch Umverteilung von Quarks zwischen zwei Objekten. Natürlich können bei ausreichender Energie auch neue Quark-Antiquark-Paare erzeugt werden oder sie können sich vernichten.

Standardmodell – Materie



	Quarks	Leptonen	Masse
1. Fam.	u	e^- Elektron	0.0005 GeV
	d	ν_e e-Neutrino	< 2 eV
2. Fam.	s	μ^- Myon	0.1 GeV
	c	ν_μ μ -Neutrino	< 2 eV
3. Fam.	b	τ^- Tau	1.8 GeV
	t	ν_τ τ -Neutrino	< 2 eV

Die Quarks sind nicht die einzigen Bausteine der Materie, es gibt noch die sog. Leptonen, zu denen das Elektron gehört, die nicht aus Quarks aufgebaut sind und wirklich "elementar" zu sein scheinen. Zusammen bilden Quarks und Leptonen den sog. Materiesektor des Standardmodells der Elementarteilchen.

Standardmodell – Kräfte



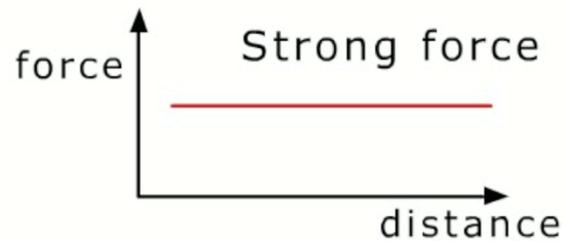
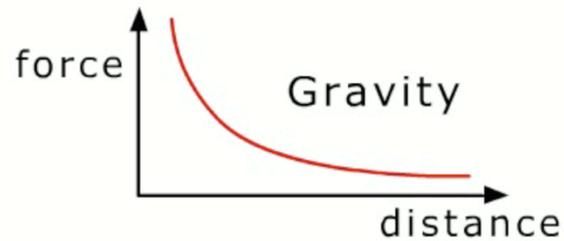
- Wechselwirkungen werden durch Austausch von "Botenteilchen" vermittelt

Kraft	Bote	Wirkung
elektromag. Wechselwirkung	Photon	geladene Teilchen
starke Wechselwirkung	Gluon	Quarks und Gluonen
schwache Wechselwirkung	W^\pm, Z^0	Quarks und Leptonen

Gravitation fehlt !!!

Neben den Materieteilchen selbst beschreibt das Standardmodell auch die Kräfte zwischen ihnen. Die Gravitationskraft ist im Standardmodell allerdings nicht enthalten – das ist eine der größten Schwächen dieses Modells.

Starke Wechselwirkung



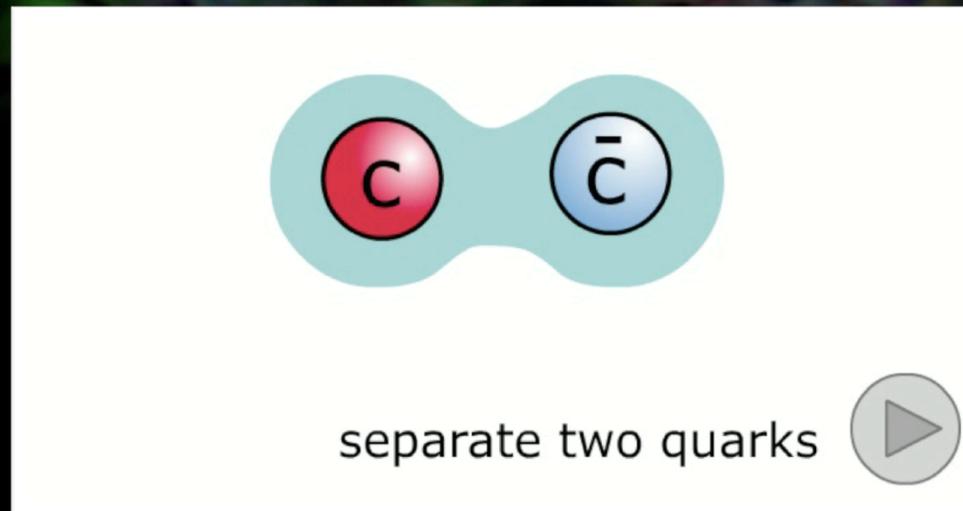
click to start animation



Die Kraft, die für den Zusammenhalt der Quarks in den Elementarteilchen verantwortlich ist, ist die starke Wechselwirkung. Sie hat die erstaunliche Eigenschaft, daß die Stärke der Kraft nicht mit zunehmendem Abstand abnimmt, sondern konstant bleibt.

Confinement

- Was passiert, wenn man zwei Quarks eines Mesons auseinanderzieht?



Versucht man zwei Quarks zu trennen, dann wird in dem Kraftfeld zwischen ihnen so viel Energie gespeichert (entsprechend der Arbeit, die man verrichtet), daß ein neues Quark-Antiquark-Paar erzeugt werden kann. Aus einem Meson werden zwei und die Farbneutralität bleibt gewahrt.

Theorien II

Die Maschinerie hinter dem Quark-Baukasten



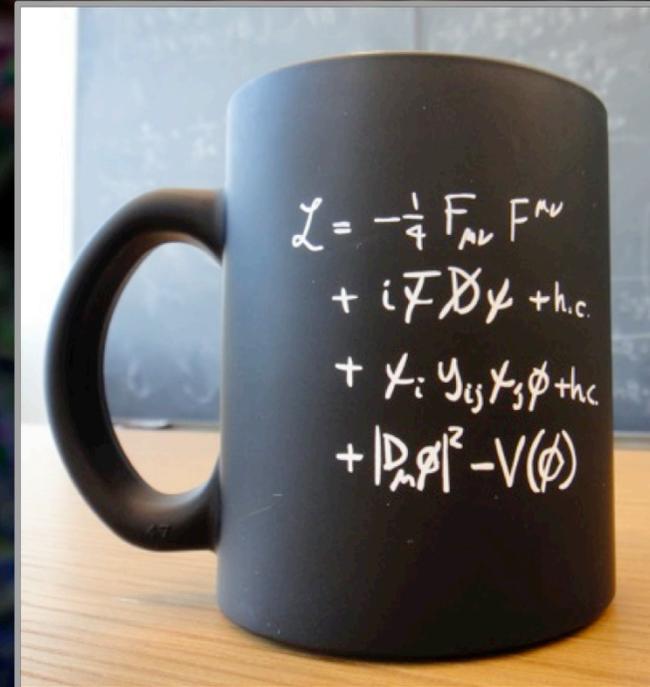
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Die Aufgabe der Theorie ist es nun, Ordnung in den Zoo der Elementarteilchen zu bringen. Welche fundamentalen physikalischen Prinzipien bestimmen ihre Eigenschaften?

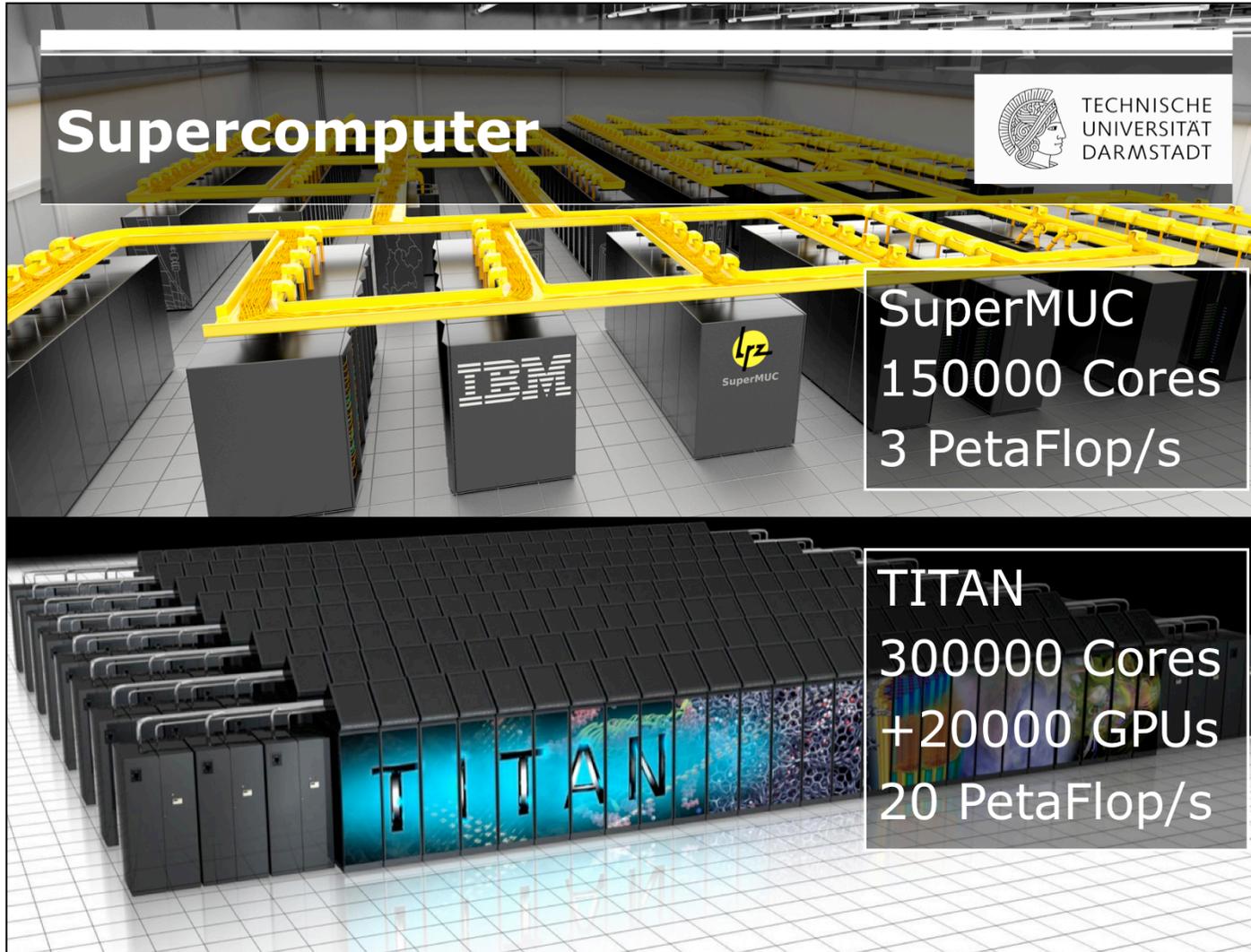
Vorsicht...

- hinter dem simplen Baukasten steckt eine komplizierte physikalische Theorie

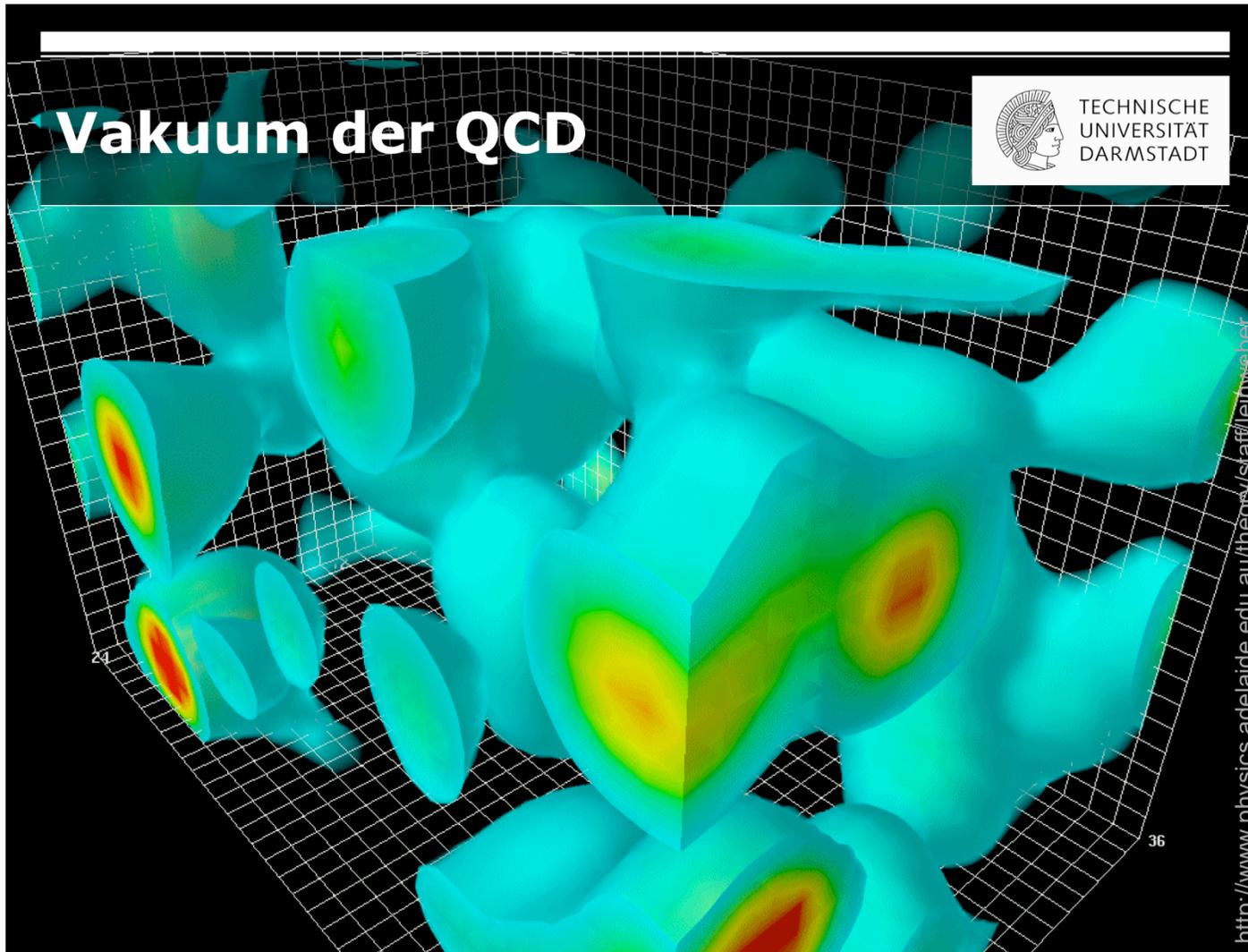
Quanten- Chromo- Dynamik



Wir haben das Standardmodell bisher als einen Baukasten für Elementarteilchen verwendet. Dahinter steckt aber eine sehr komplizierte physikalische Theorie, die sog. Quantenchromodynamik. Die Berechnung einfacher Größen, z.B. der Masse des Protons, im Rahmen dieser Theorie ist bereits eine extrem anspruchsvolle Aufgabe.

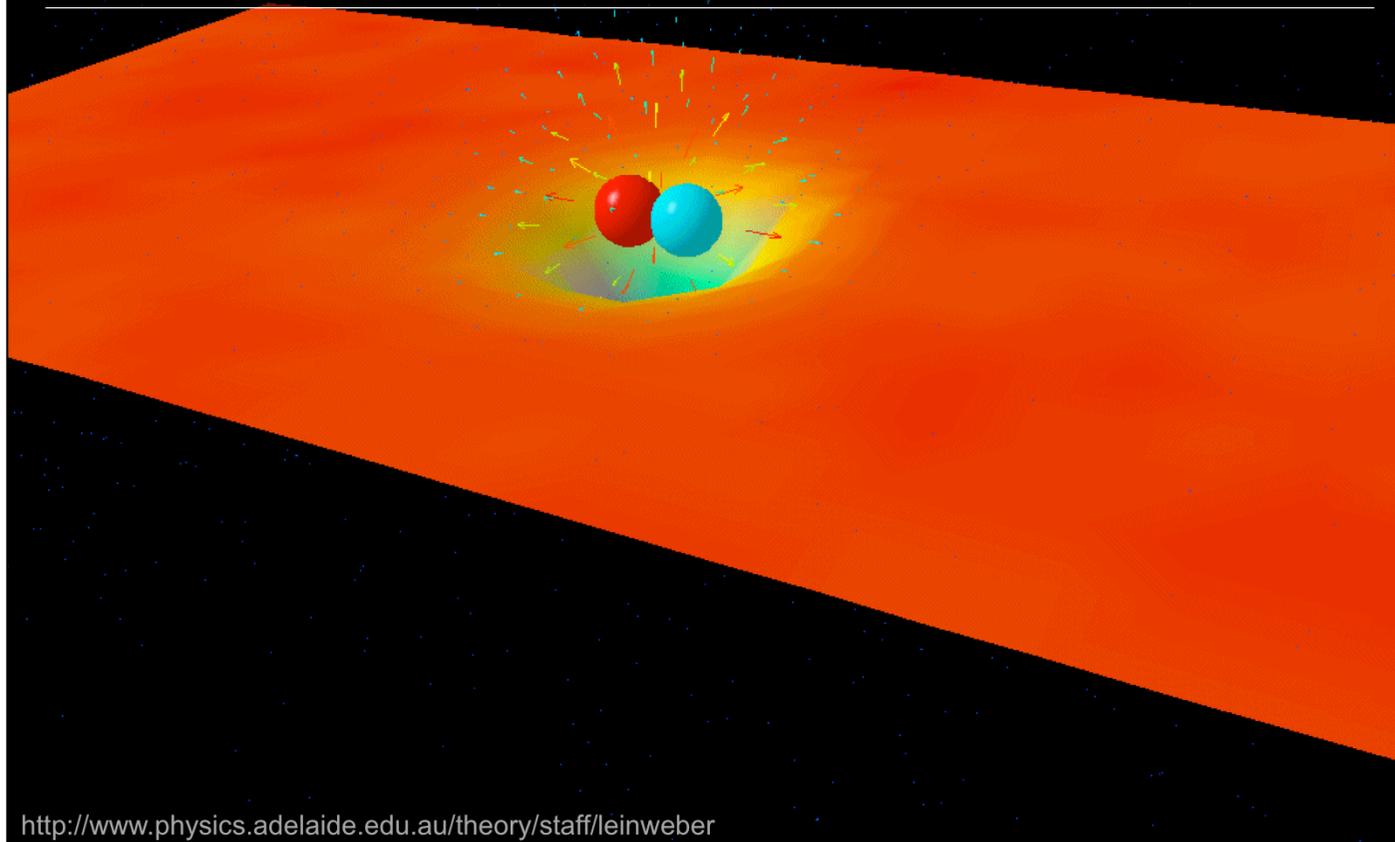


Supercomputer sind ein wichtiges Werkzeug für die theoretische Physik geworden. Viele Observablen lassen sich theoretisch nur mit sehr viel Rechenaufwand vorhersagen.



Im Rahmen numerischer Simulationen lassen sich die Details der QCD jenseits des Quark-Baukastens studieren. Hier eine Simulation zur Struktur des Vakuums der QCD. Die gluonische Energiedichte zeigt eindrucksvoll, dass das Vakuum ein sehr dynamischer Zustand mit Fluktuationen ist.

Gluonen im Meson



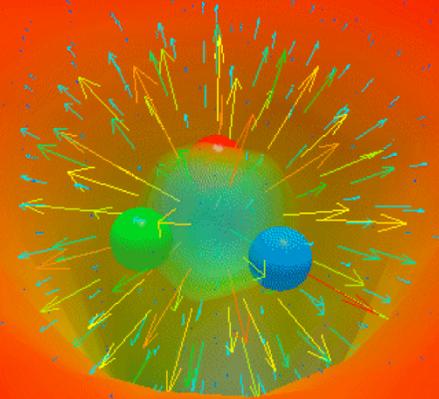
<http://www.physics.adelaide.edu.au/theory/staff/leinweber>

Auch die Separation zweier Quarks lässt sich simulieren. Zwischen den beiden Quarks bildet sich ein Gluonenfeld aus, dessen Energieinhalt linear mit dem Abstand zunimmt. Die Erzeugung eines neuen Quark-Antiquark-Paares ist hier nicht mehr gezeigt.

Gluonen im Proton



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



<http://www.physics.adelaide.edu.au/theory/staff/leinweber>

Entsprechendes kann man für die Separation dreier Quarks simulieren.

Higgs-Teilchen

... das fehlende Puzzleteil



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Ein Puzzleteil fehlte bisher allerdings im experimentell beobachteten Teilchenzoo – das Higgs-Teilchen.

Higgs-Mechanismus



- mathematische Struktur des Standardmodells erzwingt eine dynamische Erzeugung der Masse (Eichfeldtheorie)
- Higgs-Mechanismus: durch Kopplung an ein neues skalares Feld erhalten Teilchen Masse
- Higgs-Teilchen ist das dem Higgs-Feld zugeordnete Teilchen (Welle-Teilchen-Dualismus)

Das Higgs-Teilchen ist eine Konsequenz des Mechanismus mit dem die Entstehung einer dynamischen Masse im Standardmodell erklärt werden kann.

Higgs-Mechanismus



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Die Grundlage ist ein Higgs-Feld – hier schematisch repräsentiert durch die Teilnehmer einer Cocktailparty.

Higgs-Mechanismus



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

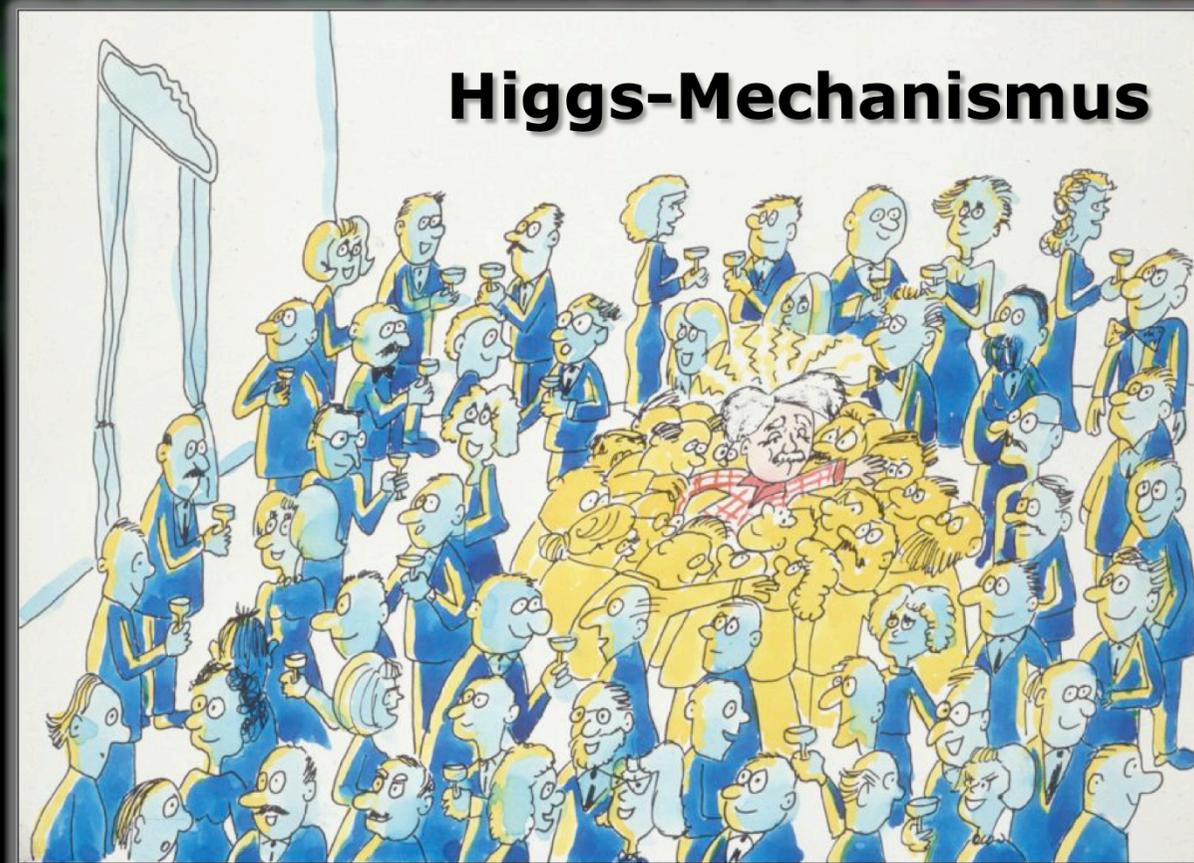


Eine interessante Persönlichkeit betritt den Raum und versucht ihn zu durchqueren.

Higgs-Mechanismus



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Die Partygäste bemerken das und versuchen mit der Persönlichkeit zu Reden oder ein Autogramm zu bekommen. Die entstehende Menschentraube hat eine große dynamische Masse und die Persönlichkeit bewegt sich als wäre sie viel schwerer – das ist ein schematisches Bild für den Higgs-Mechanismus.

Higgs-Mechanismus



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

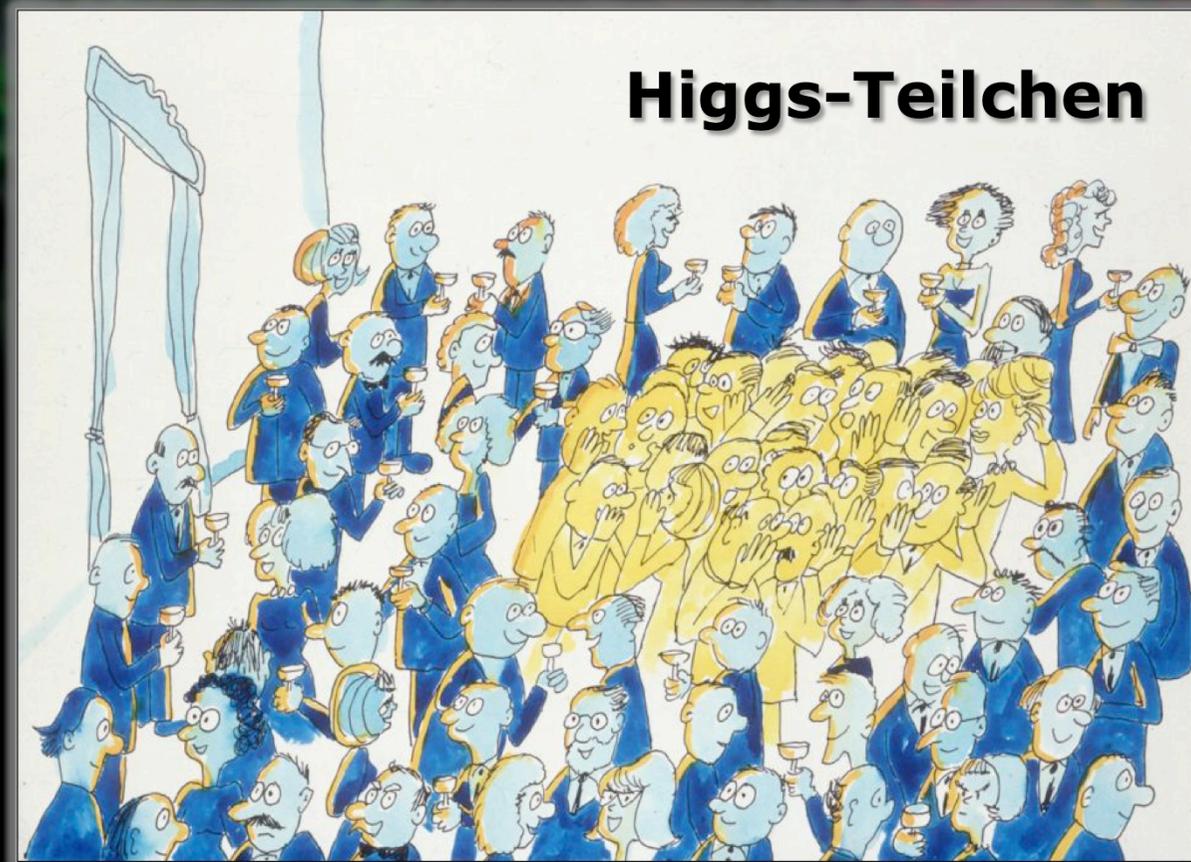


Man kann eine Menschenantraube auch anders erzeugen – eine Person streut ein Gerücht an einen der Partygäste...

Higgs-Mechanismus



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

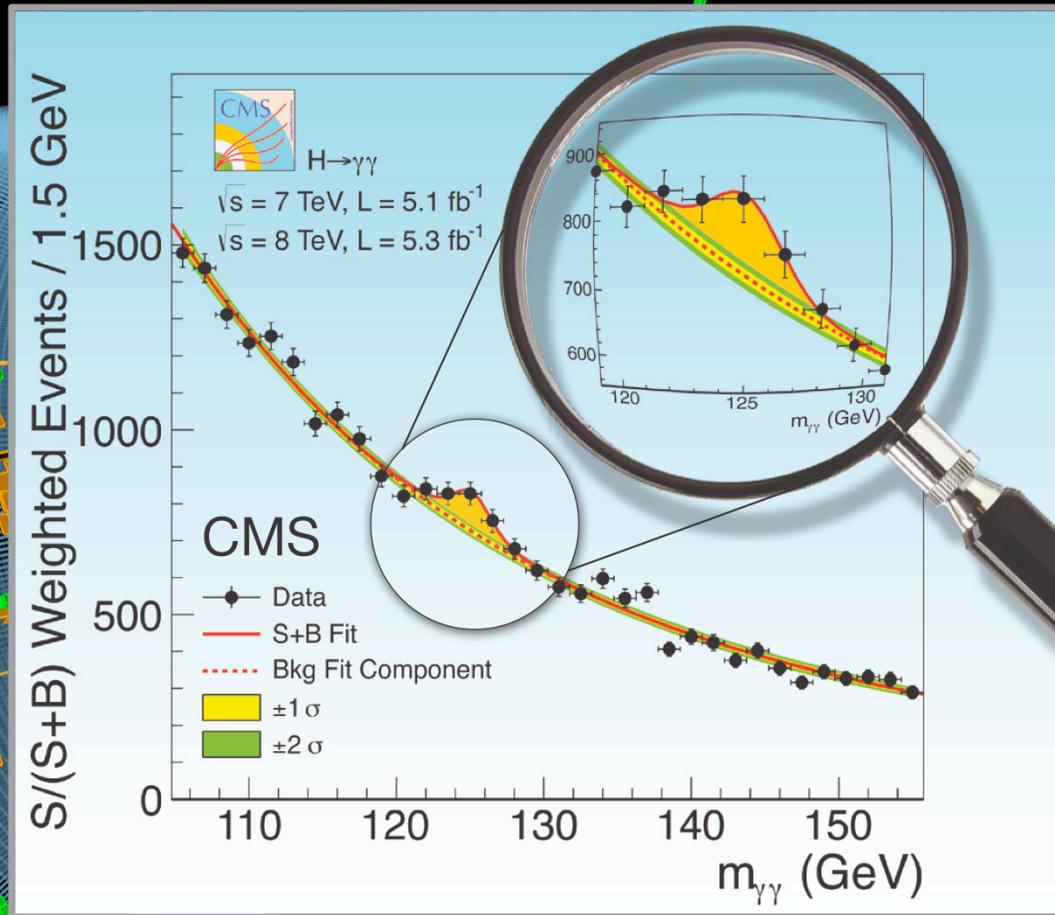


Das Gerücht verbreitet sich von Person zu Person und beim Weitersagen bildet sich wiederum eine Menschentraube – dies ist ein schematisches Bild für das Higgs-Teilchen.



Peter Higgs und eine Reihe anderer Wissenschaftler haben schon in den frühen 1960er Jahren einen solchen Mechanismus für die dynamische Massenerzeugung formuliert. Und in diesem Sommer...

Higgs $\rightarrow \gamma\gamma$



... wurden erste Messungen am LHC vorgestellt, die das vorhergesagte Higgs-Teilchen offenbar tatsächlich nachgewiesen haben.



Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC [☆]

ATLAS Collaboration ^{*}

This paper is dedicated to the memory of our ATLAS colleagues who did not live to see the full impact and significance of their contributions to the experiment.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 31 July 2012

Received in revised form 8 August 2012

Accepted 11 August 2012

Available online 14 August 2012

Editor: W.-D. Schlatter

ABSTRACT

A search for the Standard Model Higgs boson in proton–proton collisions with the ATLAS detector at the LHC is presented. The datasets used correspond to integrated luminosities of approximately 4.8 fb^{-1} collected at $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ in 2011 and 5.8 fb^{-1} at $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$ in 2012. Individual searches in the channels $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4\ell$, $H \rightarrow \gamma\gamma$ and $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow e\nu\mu\nu$ in the 8 TeV data are combined with previously published results of searches for $H \rightarrow ZZ^{(*)}$, $WW^{(*)}$, $b\bar{b}$ and $\tau^+\tau^-$ in the 7 TeV data and results from improved analyses of the $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4\ell$ and $H \rightarrow \gamma\gamma$ channels in the 7 TeV data. Clear evidence for the production of a neutral boson with a measured mass of $126.0 \pm 0.4 \text{ (stat)} \pm 0.4 \text{ (sys)} \text{ GeV}$ is presented. This observation, which has a significance of 5.9 standard deviations, corresponding to a background fluctuation probability of 1.7×10^{-9} , is compatible with the production and decay of the Standard Model Higgs boson.

© 2012 CERN. Published by Elsevier B.V. All rights reserved.

Hier die Originalpublikationen der ATLAS...



Contents lists available at [SciVerse ScienceDirect](http://SciVerse.Sciencedirect.com)

Physics Letters B

www.elsevier.com/locate/physletb



Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC [☆]

CMS Collaboration ^{*}

CERN, Switzerland

This paper is dedicated to the memory of our colleagues who worked on CMS but have since passed away. In recognition of their many contributions to the achievement of this observation.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 31 July 2012

Received in revised form 9 August 2012

Accepted 11 August 2012

Available online 18 August 2012

Editor: W.-D. Schlatter

Keywords:

CMS

Physics

Higgs

ABSTRACT

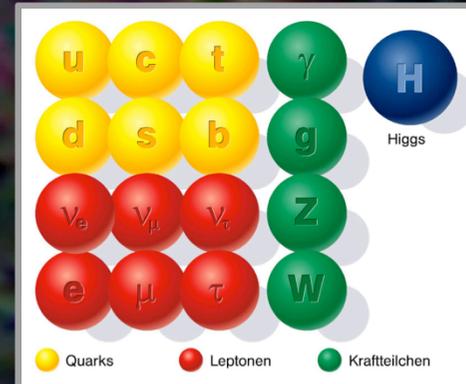
Results are presented from searches for the standard model Higgs boson in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV in the Compact Muon Solenoid experiment at the LHC, using data samples corresponding to integrated luminosities of up to 5.1 fb^{-1} at 7 TeV and 5.3 fb^{-1} at 8 TeV. The search is performed in five decay modes: $\gamma\gamma$, ZZ , W^+W^- , $\tau^+\tau^-$, and $b\bar{b}$. An excess of events is observed above the expected background, with a local significance of 5.0 standard deviations, at a mass near 125 GeV, signalling the production of a new particle. The expected significance for a standard model Higgs boson of that mass is 5.8 standard deviations. The excess is most significant in the two decay modes with the best mass resolution, $\gamma\gamma$ and ZZ ; a fit to these signals gives a mass of $125.3 \pm 0.4(\text{stat.}) \pm 0.5(\text{syst.}) \text{ GeV}$. The decay to two photons indicates that the new particle is a boson with spin different from one.

© 2012 CERN. Published by Elsevier B.V. All rights reserved.

...und CMS Collaboration, in denen diese neuen Ergebnisse vorgestellt werden.

Status

- Standardmodell ist eine der erfolgreichsten Theorien und beschreibt alle bisherigen experimentellen Befunde
- Die Untersuchung des Higgs-Teilchens hat gerade erst begonnen...
- Allerdings hat das Standardmodell Lücken (Gravitation), die eine wirklich fundamentale Theorie schließen sollte



Trotz allem, keines der heutigen Experimente widerspricht dem Standardmodell und es bleibt eine der erfolgreichsten physikalischen Theorien. Dennoch ist klar, dass es nicht das letzte Wort zum Thema Unteilbarkeit sein wird.

Suche nach dem Unteilbaren



- Unteilbarkeit haben wir bereits mit den Quarks des Standardmodells erreicht
- Die Suche nach einer fundamentalen, eleganten und einfachen Theorie geht allerdings weiter ...

Das ist das vorläufige Ende unserer Suche nach dem Unteilbaren. Zwar sind die Quarks in gewissem Sinne “unteilbar”, das Standardmodell ist aber sicher nicht der letzte Schritt bei der Suche nach einer fundamentalen und eleganten Theorie.