

Teilchenphysik am MPP am Beispiel von



München, 15. Juli 2010

Richard Nisius (MPP München)
Richard.Nisius@mpp.mpg.de



Das MPP - Gruppen und Forschungsgebiete

Direktoren

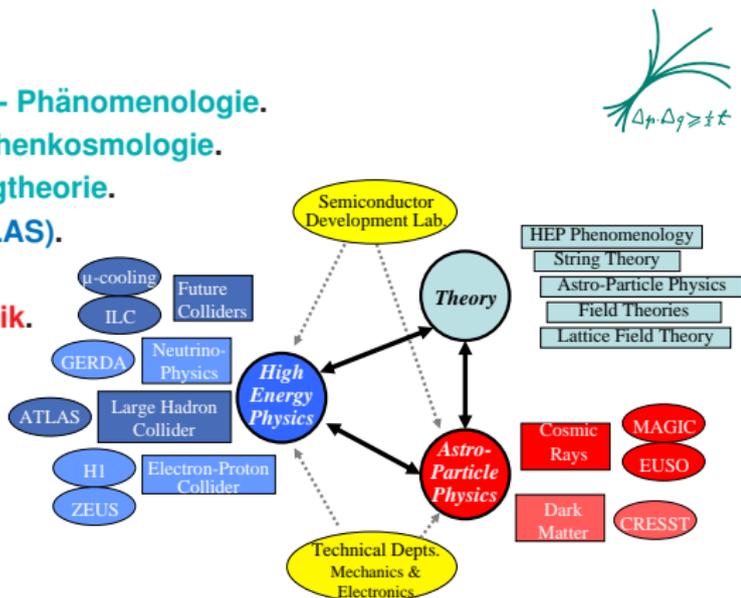
- W. Hollik (GD) - **Theo. Teilchenphysik - Phänomenologie.**
- D. Dvali - **Theo. Teilchenphysik - Teilchenkosmologie.**
- R. Lüst - **Theo. Teilchenphysik - Stringtheorie.**
- S. Bethke - **Exp. Teilchenphysik I (ATLAS).**
- A. Caldwell - **Exp. Teilchenphysik II.**
- M. Teshima - **Exp. Astro-Teilchenphysik.**

Externe Wissenschaftliche Mitglieder

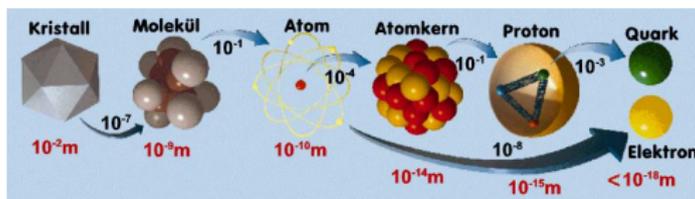
- H. Abramowicz - **Exp. Teilchenphysik - Protonstruktur.**

(Junior) Forschungsgruppen

- G. Raffelt - **Theo. Astro-Teilchenphysik.**
- Emmy Noether Gruppe (M. Plümacher - **Leptogenesis**).
- MPG Program für hochqualifizierte Wissenschaftlerinnen (J. Erdmenger - **Stringtheorie**).
- MPG unabhängige Forschungsgruppe (S. Antusch - **Neutrinos und BSM Physik**).
- Junior Forschungsgruppe im Münchner Exzellenzcluster (F. Simon - **Detektortechnologie**).



Dass ich erkenne, was die Welt, im Innersten zusammenhält

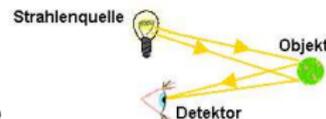


Die zwei Hauptfragen der Elementarteilchenphysik

- Welches sind die kleinsten Bausteine der Natur, und was sind ihre Eigenschaften?
- Was sind die fundamentalen Wechselwirkungen dieser Bausteine?

Der Weg der Beschleunigerphysik

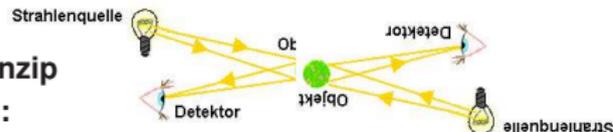
- Zur Lösung braucht man einen Weg kleinste Strukturen und ihre Wechselwirkungen zu sehen, d.h. in irgendeiner Form zu messen.



- Wir nehmen: zwar einen



aber das Prinzip bleibt gleich:



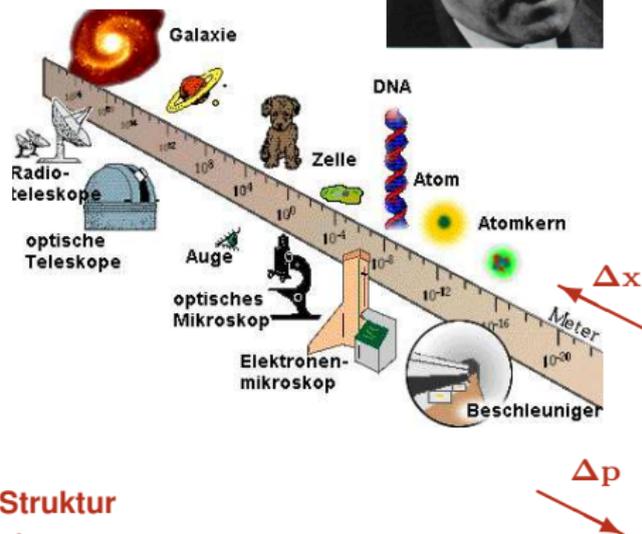
Was immer man tut, sehen ist und bleibt ein Streuprozess.

Die Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation



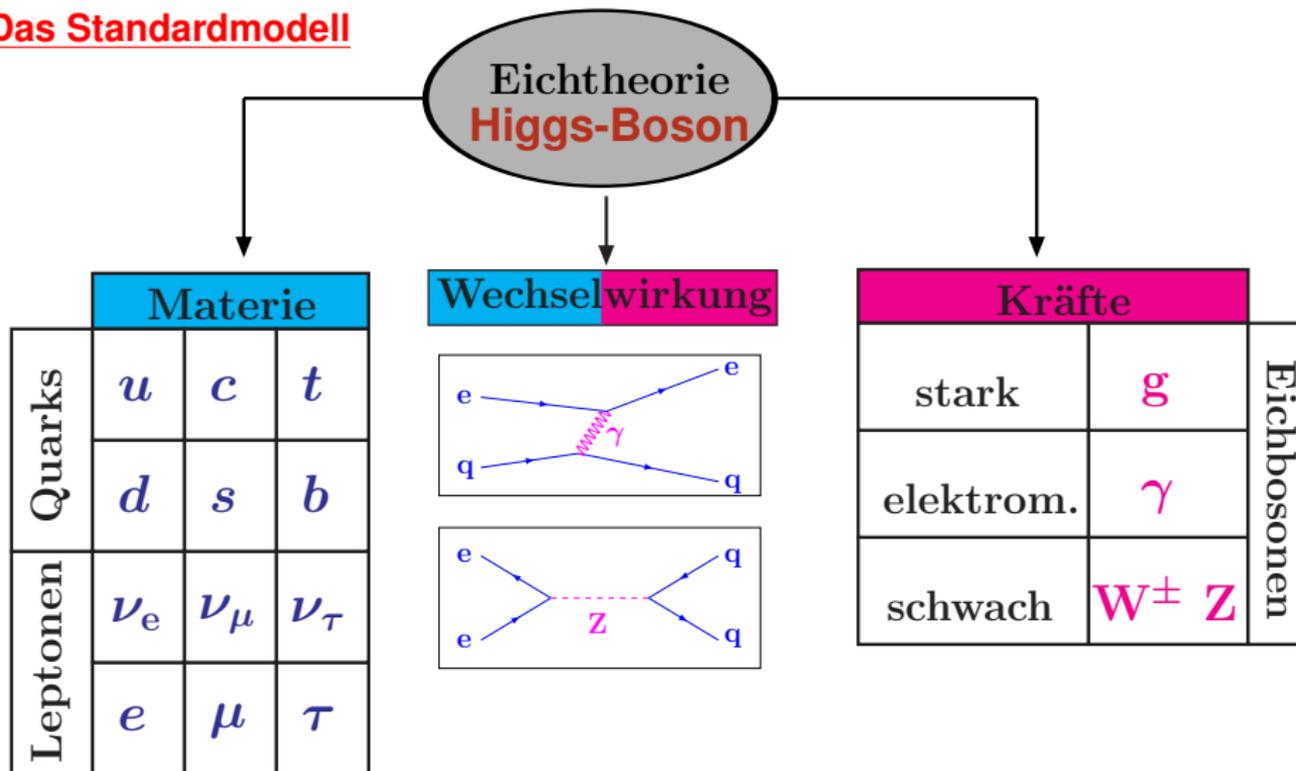
- Die Quantenmechanik macht nur Wahrscheinlichkeitsaussagen, d.h. Aussagen über das mittlere Ergebnis vieler Ereignisse. Das Einzelereignis jedoch ist völlig unbestimmt!
- Mit der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation kann man das Auflösungsvermögen abschätzen.

Faustformel: $\Delta x \Delta p = 0.2 \text{ fm GeV}$. Ein Teilchen mit Impuls 1 GeV kann also eine Struktur der Größe 0.2 fm auflösen. (1 fm = 10^{-15} m)



Um diese kleinen Strukturen sehen zu können, brauchen wir Teilchenbeschleuniger.

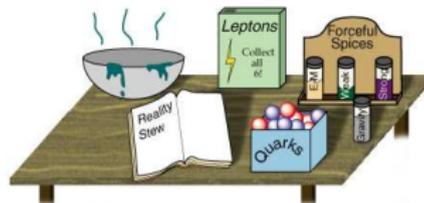
Das Standardmodell



Das Standardmodell hat viele Präzisionstests sehr erfolgreich bestanden.

Die elementaren Materiebausteine

– Unser heutiges Bild der Rezeptur



der Natur, ist:

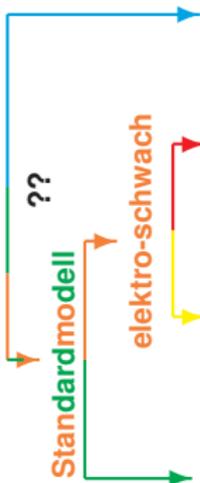
Quarks	u up	c charm	t top
	d down	s strange	b bottom
Leptons	ν_e e- Neutrino	ν_μ μ - Neutrino	ν_τ τ - Neutrino
	e electron	μ muon	τ tau
	I	II	III

- Es gibt drei Familien von Leptonen und Quarks.
- Sie sind Fermionen (Spin = 1/2), und nur die erste Familie bildet stabile Materie, $p = uud$ und $n = udd$.
- Zu jedem Teilchen gibt es ein Antiteilchen mit umgekehrten Ladungen aber sonst identischen Eigenschaften.
- Die Massen sind sehr verschieden und niemand weiß warum. Die Massen reichen von weniger als 1 eV für das ν_e bis zu 173 GeV (fast die Masse eines Gold-Atoms) für das top Quark.
- Eine Theorie zur Erklärung der Massen ist der Higgs-Mechanismus. In dieser Theorie wird ein zusätzliches Teilchen, das noch zu findende Higgs-Boson, vorhersagt.

Wir wollen das Massenspektrum erklären können.

Die fundamentalen Kräfte

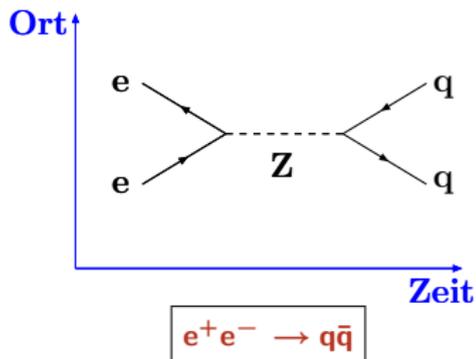
Wechselwirkung	Beispiel	Boson	Masse [GeV]	el. Ladung [e]	rel. Stärke (Reichweite)
Gravitation	Erdanziehung	Graviton? G ?	0	0	10^{-38} (∞)
schwach	Kernzerfall	Z W^{\pm}	91.2 80.4	0 ± 1	10^{-5} (10^{-3}) fm
elektromagnetisch	Coulombanziehung	Photon γ	0	0	10^{-2} (∞)
stark	Quark-Einschluss	Gluon g	0	0	1 (1 fm)



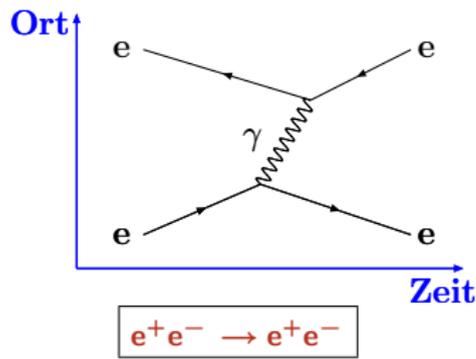
Außer für die Gravitation haben wir eine vereinheitlichte Beschreibung.

Wechselwirkungen im Standardmodell

Paarvernichtung und Paarerzeugung



Emission und Absorption

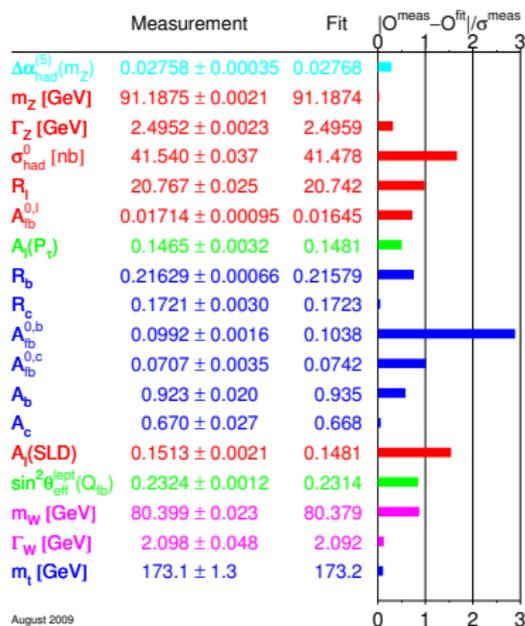


Das mathematische Konzept

- Eine Kombination von Eichgruppen: $U(1)_Y \times SU(2)_L \times SU(3)_C$ mit lokaler Eichinvarianz, und drei laufenden Kopplungskonstanten, eine für jede Eichgruppe: $\alpha_1 = \frac{5}{3} \left(\frac{e}{\cos \theta_W} \right)^2$, $\alpha_2 = \left(\frac{e}{\sin \theta_W} \right)^2$ und $\alpha_3 = \alpha_s$.

Zur Beschreibung der Wechselwirkungen genügen vier fundamentale Vertices.

Das Standardmodell - seine Stärken



August 2009

Eine Erfolgsgeschichte (Stand 2009)

- Daten und Theorie stimmen perfekt überein.
- Messungen auf sub Promille Genauigkeit, z.B. $m_Z = (91.1875 \pm 0.0021)$ GeV. Dies entspricht 0.02 Promille Genauigkeit!!

Konsistenz direkter und indirekter Messungen

- Direkt: $m_W = (80.399 \pm 0.023)$ GeV
- Indirekt: $m_W = (80.364 \pm 0.020)$ GeV
- Direkt: $m_t = (173.1 \pm 1.3)$ GeV
- Indirekt: $m_t = (172.6_{-10.2}^{+13.2})$ GeV

Wir haben die Massen zwar genau gemessen, verstehen ihre Ursache aber nicht.

Probleme mit der Masse?



- Wieso habe ich eine so große Masse? **Wildschweine?**
- Klar, Wildschweine haben innere Struktur, sie bestehen z.B. aus **Fleisch**. Fleisch hat eine Masse, also haben Wildschweine eine Masse. Aber wieso hat Fleisch eine Masse?
- Klar, Fleisch besteht aus **Eiweißen**. Eiweiße haben eine Masse, also Aber wieso ... ?
- Klar, Eiweiße bestehen aus **Molekülen**. Moleküle haben eine Masse, also Aber wieso ... ?
- Klar, Moleküle bestehen aus **Atomen**. Atome haben eine Masse, also Aber wieso ... ?
- Klar, Atome bestehen aus **Protonen** und **Neutronen**. P und n haben eine Masse, also Aber wieso ... ?
- Klar, Protonen und Neutronen bestehen aus **Quarks**.
Aber wieso haben Quarks eine Masse?

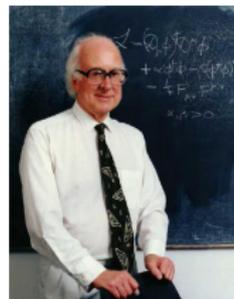
Wir brauchen eine andere Erklärung als den Aufbau aus kleineren massiven Bausteinen.

Das Higgs-Boson - die Idee

Die Vermutung (1965)

- Fundamentale Teilchen, sowohl Materie- als auch Kraft-Teilchen, sind an sich masselos.
- Massen werden erst durch Wechselwirkungen mit einem Hintergrundfeld, dem **Higgsfeld**, erzeugt.
- Je stärker die Kopplung, um so größer die Masse.
- Die Eichbosonen erhalten ihre Massen durch spontane Symmetriebrechung und den Higgs-Mechanismus.

Der Vater des Gedankens



Peter Higgs

Die Konsequenz

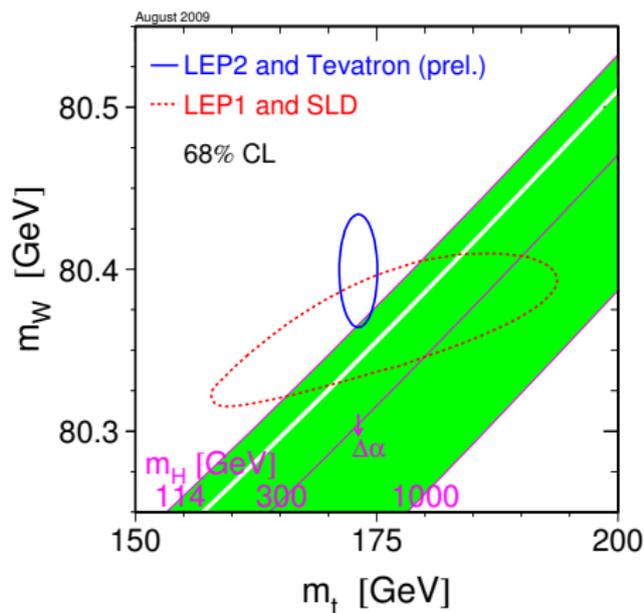
- Die Existenz des **Higgs-Bosons** als Anregung des **Higgsfeldes**.

Die Vorhersagen des Standardmodells

- Die Kopplungen des **Higgs-Bosons** an alle Teilchen sind vorhergesagt, und damit liegen die Zerfalls-Kanäle und -Raten des **Higgs-Bosons** bei gegebener Masse fest.

Die Masse des Higgs-Bosons ist nicht vorhergesagt und muß gemessen werden.

Hinweise auf das Higgs-Boson

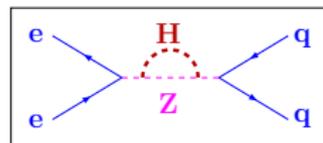
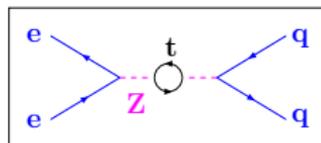


Direkte Messungen

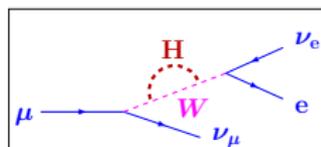
- 1) $p\bar{p} \rightarrow t\bar{t}$
- 2) $p\bar{p} \rightarrow W + X$ und $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$

Indirekte Bestimmungen

1) Die Z-Produktion

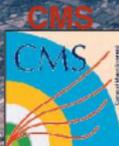


2) Der Muonzerfall



Diese gute **Übereinstimmung** ist einer der Gründe an ein leichtes Higgs-Boson zu glauben.

Der Large Hadron Collider, 2009⁺⁺, $E_p = 7$ TeV



p

p

ALICE

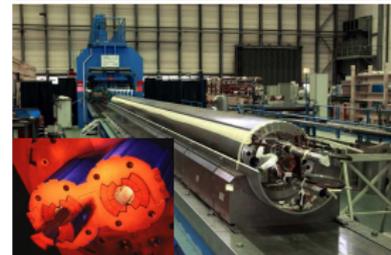


ATLAS



LHCb
THCP
LHCb

Die supraleitenden Magnete



Anzahl	1232
Länge	14.3 m
Gewicht	35 t
B-Feld	8.4 T
Temperatur	1.9 K
Strom	11700 A
Energie	7.1 MJ

Einzelheiten



Entdeckungspotential: $M_H = 100 - 1000$ GeV

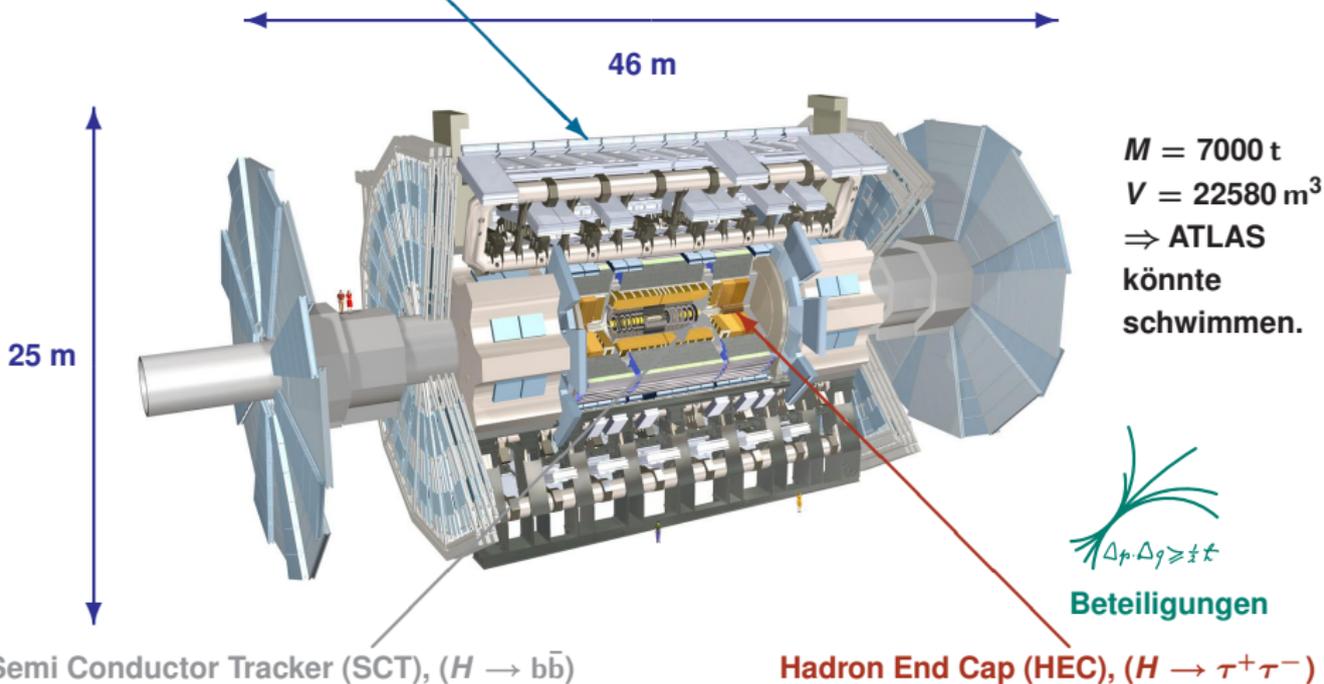
Ein Vergleichsobjekt



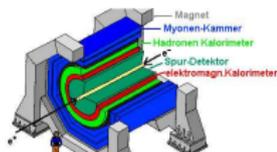
$M=7.5$ t, $v=150$ km/h

Der ATLAS Detektor

Monitored Drift Tubes (MDT), ($H \rightarrow ZZ \rightarrow 2\mu^+\mu^-$)



Das Bauprinzip von Teilchen-Detektoren und ein Beispiel

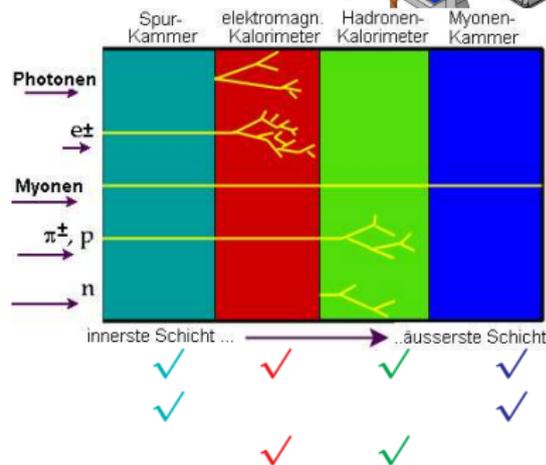


Das Prinzip

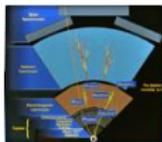
- Mit einer Art Zwiebelschalenanordnung um die Strahlröhre werden die verschiedenen Teilchen an Hand ihrer typischen Wechselwirkungen nachgewiesen.

Die Messgrößen

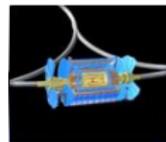
- Ort
- Impuls bzw. Geschwindigkeit
- Energie



Ein Beispiel LHC und der ATLAS Detektor



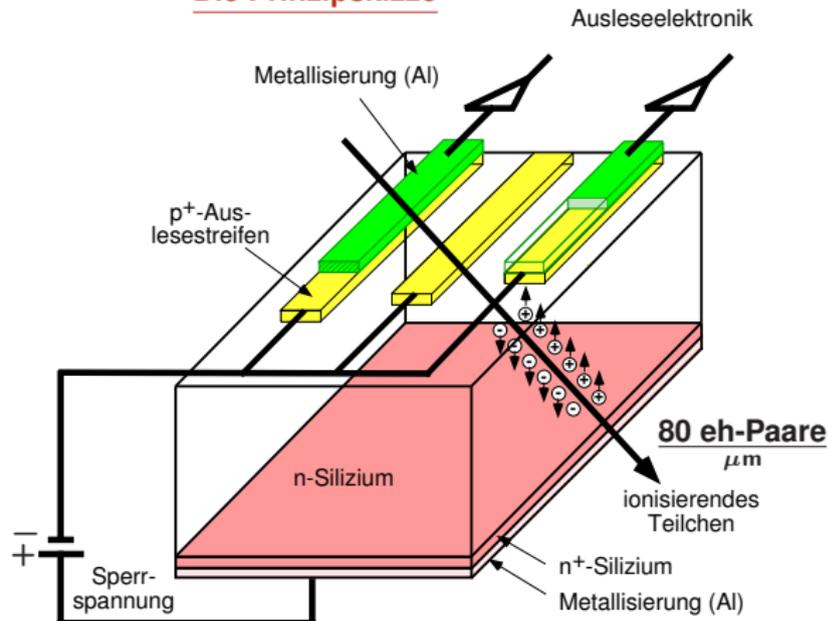
- Bei komplizierten Zerfällen wird aus der Summe aller Zerfallsprodukte auf die Eigenschaften der primär erzeugten Teilchen geschlossen.



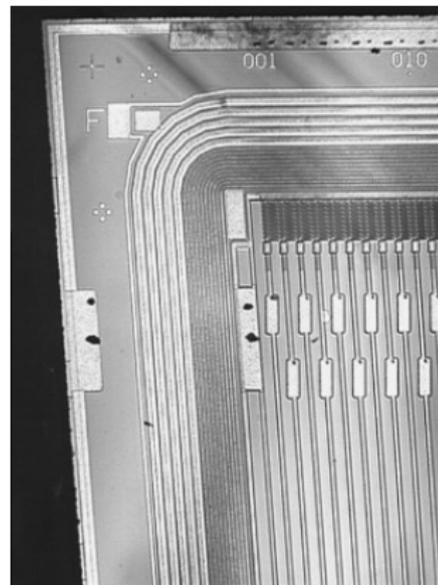
Erst die Rekonstruktion aller Reaktionsprodukte gibt Aufschluß über die Reaktion.

Ein Siliziumstreifendetektor

Die Prinzipskizze



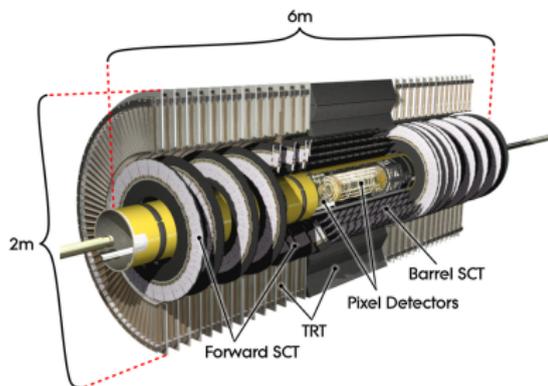
Ein ATLAS SCT Sensor



Mit Halbleiterdetektoren werden Spuren und Zerfallspunkte gemessen.

Der ATLAS Siliziumstreifendetektor SCT

Schemazeichnung des Spurdetektors



Moduldetails

- 768 Streifen pro Seite
- Doppelseitige Elektronik mit 6 Chips pro Seite.

Ein paar Daten zum SCT

- Barrel: 4 Lagen.
- Endkappen: 2x9 Scheiben.
- Module: 4088, Barrel 2112, Endkappen 1976 (vier Sorten).

Ein SCT Endkappenmodul

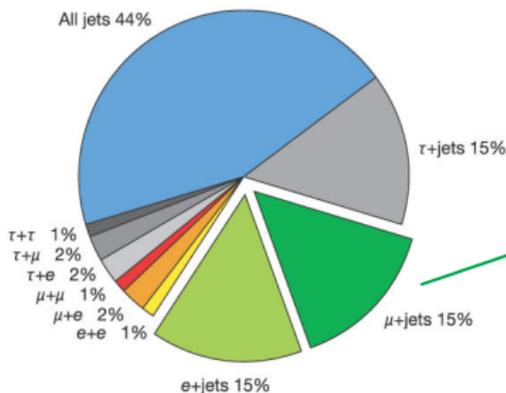


Am MPP München wurden 420 SCT Endkappenmodule gebaut.

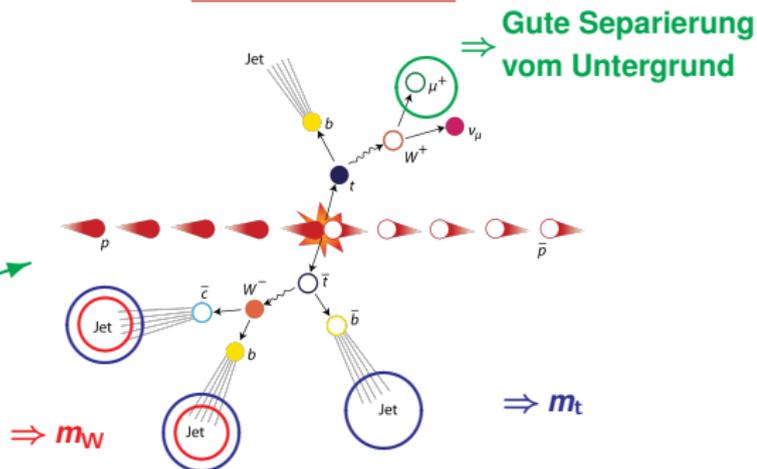
Top Anti-Top Quark-Paare an Proton-Proton Beschleunigern

- Die Lebensdauer: $\tau = \frac{\hbar}{\Gamma} = \frac{6.58 \cdot 10^{-16}}{1.55 \cdot 10^9} \text{ s} = 4.2 \cdot 10^{-25} \text{ s}$ ist wesentlich kleiner als die Zeit zur Hadronformation $t \approx \frac{\hbar}{\Lambda} \approx 6 \cdot 10^{-24}$. Das Top-Quark zerfällt als einziges Quark frei.
- Die Bestimmung der Top-Masse ist wichtig, da eine Genauigkeit in der Top-Masse von 1 GeV etwa die selbe Einschränkung der Higgs-Masse liefert wie eine Messung der W-Masse auf 7 MeV.

Aufteilung der Paar-Zerfälle



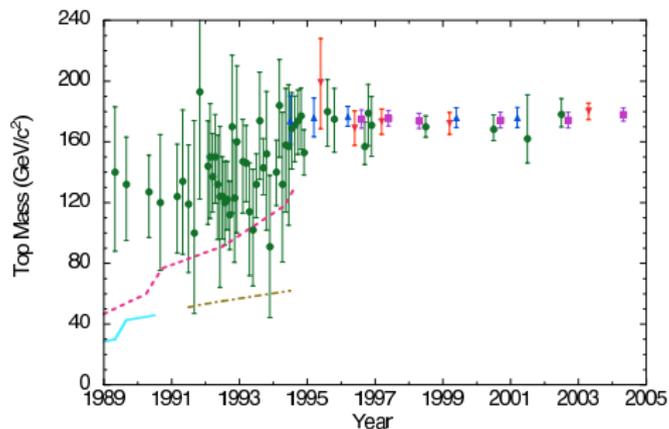
Der goldene Kanal



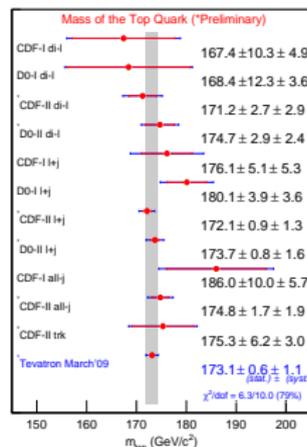
Eine klare Signatur mit beherrschbarem Untergrund.

Die Geschichte der Massenbestimmung

Der lange Weg zur Präzision



Die aktuelle Liste der Messungen

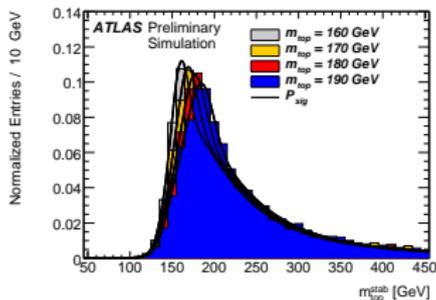


- 1977 Entdeckung des b-Quarks \Rightarrow Im SM muß ein Top-Quark existieren.
- Bis 1994 e^+e^- direkte Suche bis $m_t \approx 45$ GeV und Präzisionsmessungen des Z^0 (indirekt).
- Bis 1994 $p\bar{p}$ direkte Suche am Tevatron in Chicago bis $m_t \approx 120$ GeV.
- 1995 Entdeckung des Top-Quarks am Tevatron, Messungen von D0, CDF und kombiniert.
- 2010 Beginn der Messungen am LHC.

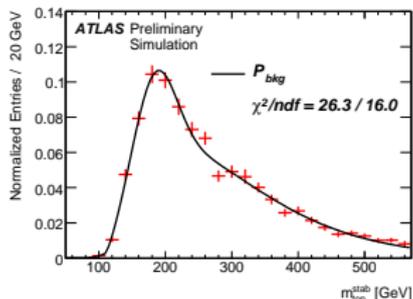
Diese Präzision von 0.7 Prozent ist der Startpunkt für die LHC Experimente.

Das bei ATLAS bis Ende diesen Jahres Erreichbare

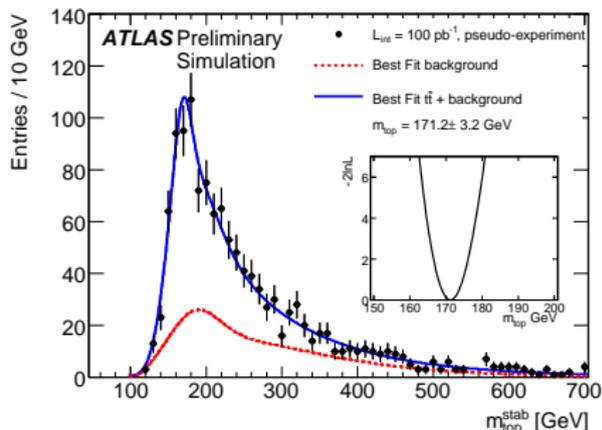
Die beobachtbare Massenabhängigkeit



Die Untergrund-Parametrisierung



Ein hypothetischer ATLAS Datensatz

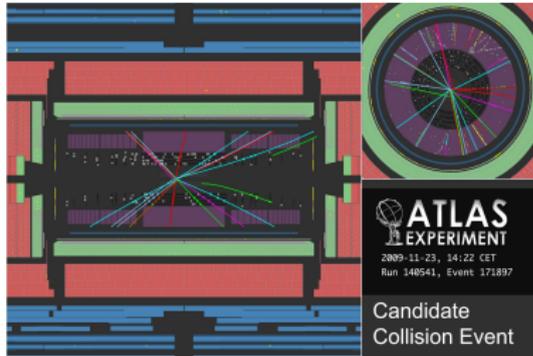


Die damit erreichbare Genauigkeit

Statistik etwa 1.2%.
 Systematik etwa 2.5%.
 Totaler Fehler etwa 2.8%.

Es ist ein weiter Weg bis zu einer präzisen Vermessung des Top-Quarks am LHC.

Die Chronologie der Ereignisse



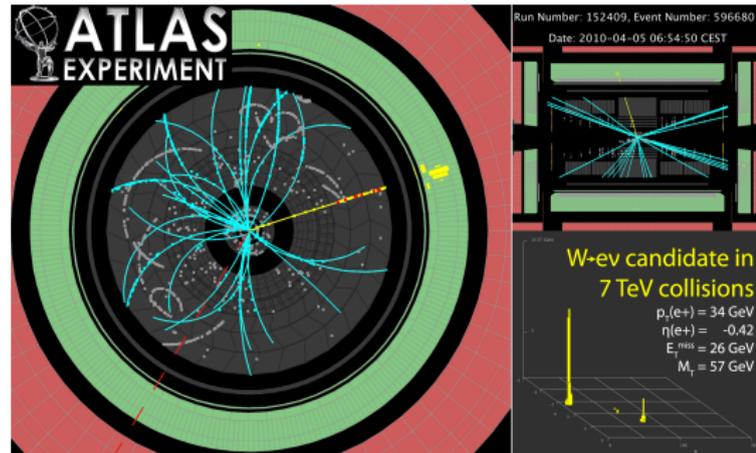
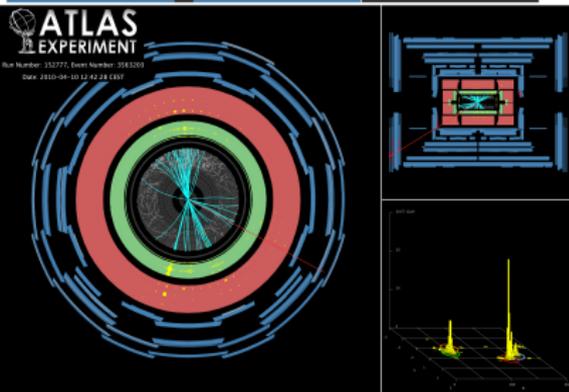
20.11.09 — Start von LHC.

23.11.09 — Kollisionen 2x0.45 TeV.

08.12.09 — Kollisionen 2x1.18 TeV.

17.12.09 — Ende der Datennahme 2009.

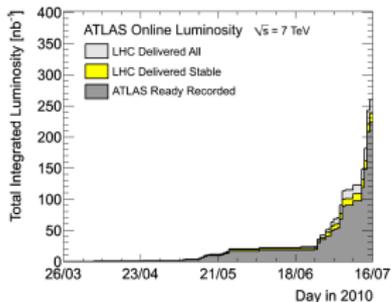
28.03.10 — Start Datennahme 2x3.5 TeV, Ziel 1 fb^{-1} .



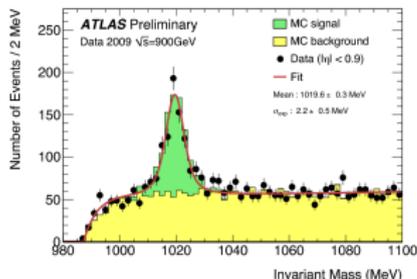
Seit dem 8.12.09 hält der LHC den Energie-Weltrekord für Beschleuniger Teilchenkollisionen.

Die ersten Messungen

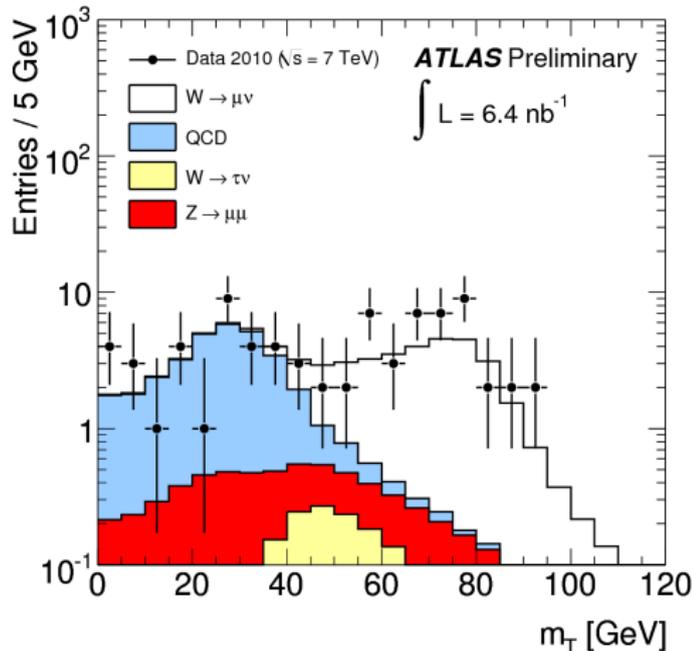
Die gesammelte Luminosität



Erste $\phi \rightarrow K^+K^-$ Ereignisse



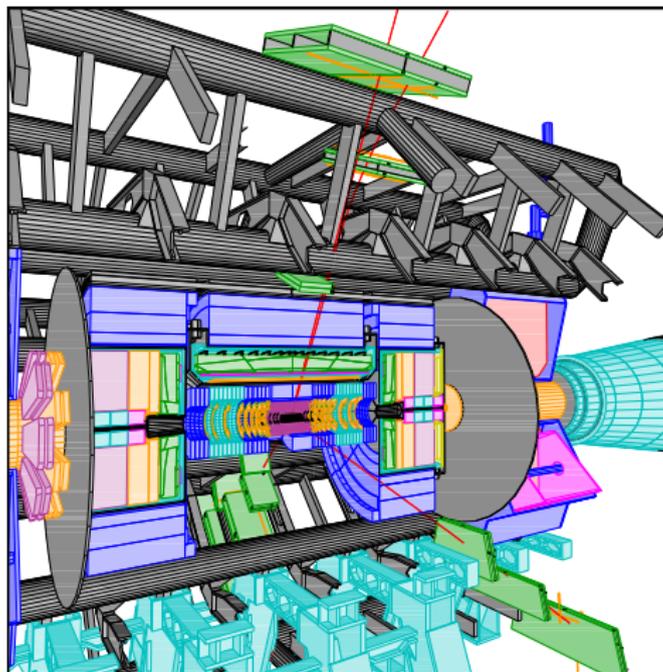
Transversale Masse der $W \rightarrow \mu\nu$ Ereignisse



Erst wird Stück um Stück der Detektor verstanden und das Standardmodell wiederentdeckt.

Worauf wir sehnlichst warten

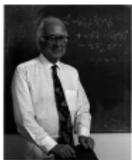
$$H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$$



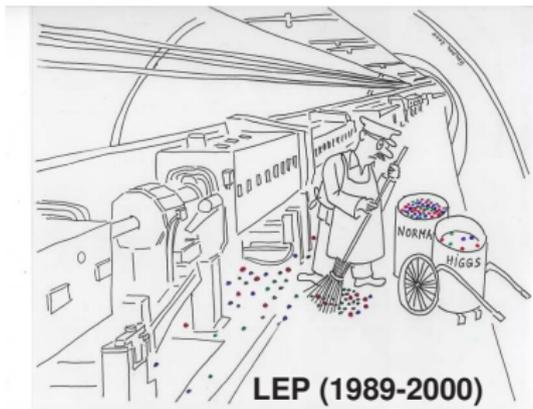
Hoffen wir, dass die Natur uns solch klare Ereignisse serviert.

Anstelle einer Zusammenfassung

Peter Higgs



Was so **...** begann, ...



... nahm so

LEP (1989-2000)
Tevatron (1992-heute)

seinen Lauf, und endet ...



... LHC (2010 - ?)
vielleicht so

Karl Gustav von Schweden

?

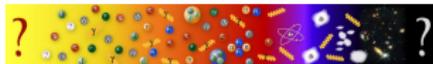


Eine unvollständige Liste interessanter Links



Dieser Vortrag

<http://www.mpp.mpg.de/~nisius/welcomeaux/lehre.html>



Die Startseite der Deutschen Teilchenphysik

<http://www.teilchenphysik.de>

Ein Lernprogramm der Universität Erlangen

<http://www.solstice.de/teilchenphysik/>



Fun with ..., eine Sammlung von Cartoons von Prof. C. Grupen

<http://www.hep.physik.uni-siegen.de/~gruppen>



Physik mit Musik, der LHC Rap von Katie McAlpine (alpinecat)

<http://www.youtube.com/watch?v=j50ZssEojtM>

Danke für die Aufmerksamkeit ... und ... viel Spass beim Weiterlesen.