

Über Quarks, Higgs-Bosonen und andere Exoten: Wie man Ordnung in den "Zoo" bringen kann

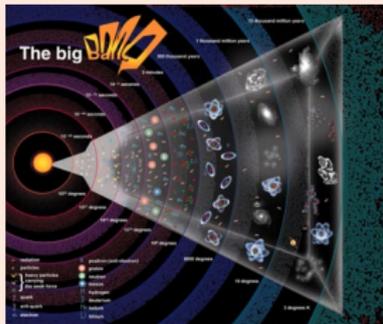
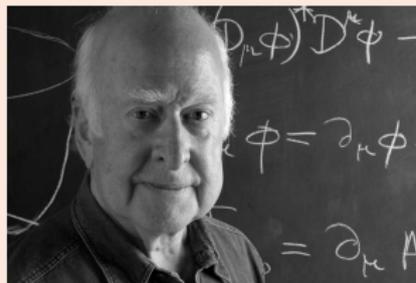
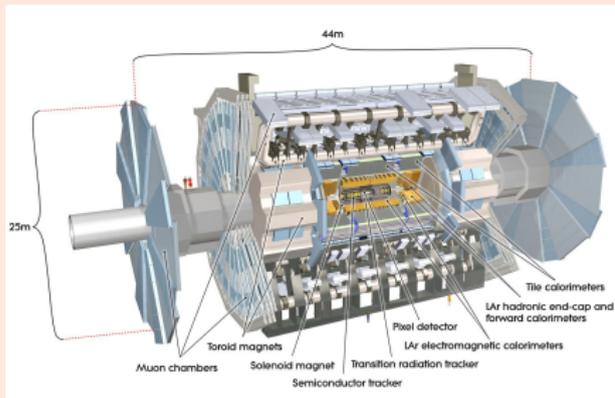
Vortrag am Gabriel-von-Seidel-Gymnasium Bad-Tölz

Josephine Wittkowski

27. Februar 2013



Elementarteilchenphysik!



Drei Generationen der Materie (Fermionen)

	I	II	III	
Masse	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
Ladung	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Name	u up	c charm	t top	γ Photon
Quarks	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	d down	s strange	b bottom	g Gluon
Leptonen	< 2.2 eV	≈ 0.17 MeV	≈ 15.5 MeV	81.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e Elektron-Neutrino	ν_μ Myon-Neutrino	ν_τ Tau-Neutrino	Z^0 schwache Kraft
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e Elektron	μ Myon	τ Tau	W^\pm schwache Kraft
				Eichbosonen

Überblick

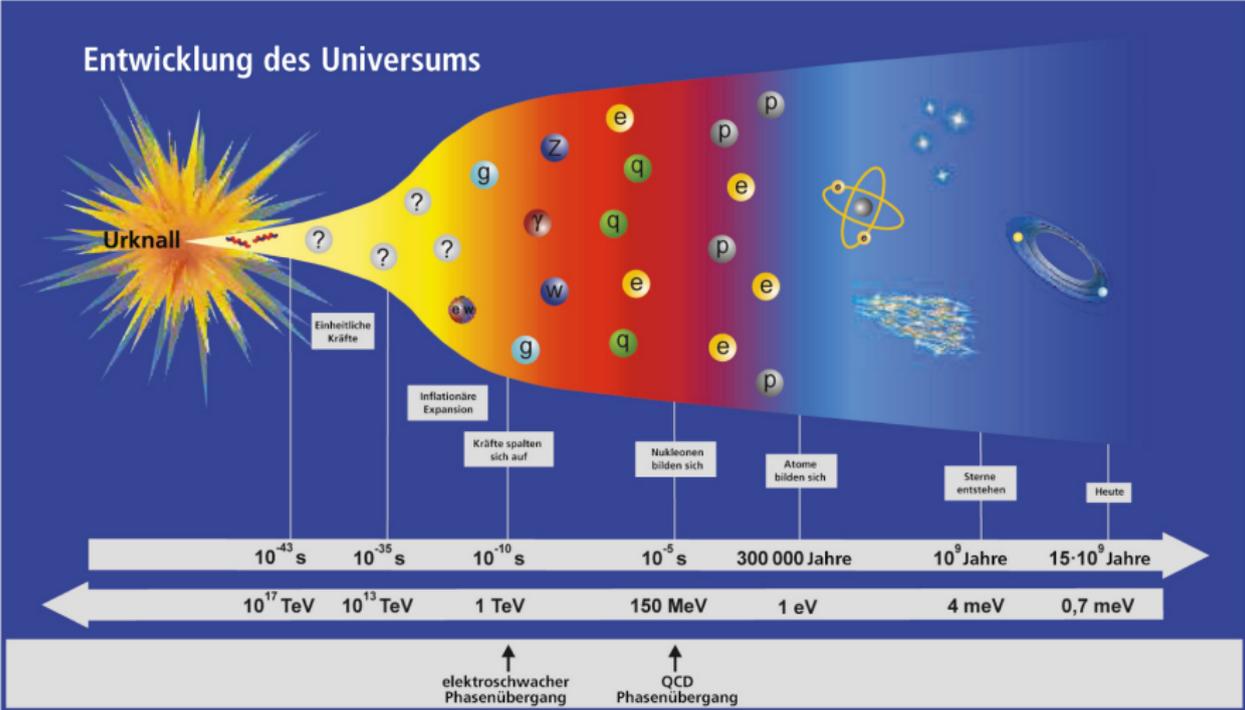
- Kosmologie: Was versteht man darunter? Warum denken wir dass es einen “Urknall” gab?
- Elementarteilchen: der “Zoo“ wuchs bis 2012 - wächst er noch weiter?
- Wie weist man Teilchen nach? Jetzt kommt das CERN ins Spiel!
- Was hat es mit dem Higgs auf sich?

Kosmologie - was ist das eigentlich?

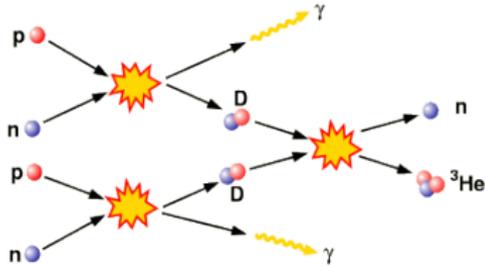
Wie ist das Universum entstanden?

- Wie kann man Informationen darüber bekommen?
- Kann man das beweisen?

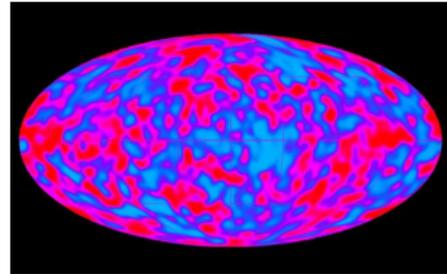
Der Urknall



Und wie ist man da drauf gekommen?



Nukleosynthese



Temperaturschwankungen in der Hintergrundstrahlung,
aufgenommen vom COBE Satelliten

Beobachtungen lassen darauf schließen, dass es einen "Big Bang" gab:

- "primordiale Nukleosynthese": Aus Protonen und Neutronen werden leichte Kerne wie Wasserstoff und Helium gebildet.
- Kosmische Hintergrundstrahlung: **Universum ist mit sehr schwachem "Licht" gefüllt:** Photonen mit Wellenlänge im Mikrowellenbereich.
- Das Universum expandiert (messbar: kosmologische Rotverschiebung)

Was sind denn momentan "offene Fragen" in der Kosmologie bzw. Teilchenphysik, denen sich die Grundlagenforschung widmet?

- Prominentestes Beispiel 2012: Ist das neu entdeckte Teilchen wirklich das sogenannte **Higgs-Boson**, das den anderen Elementarteilchen Masse gibt?



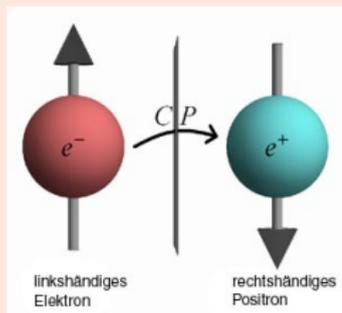
- Die Theorie des sogenannten, zum großen Teil experimentell überprüften "**Standardmodells**" der Teilchenphysik **kann nicht alle Beobachtungen erklären.**

Weitere Beispiele:



Das Standardmodell kann die **Gravitationskraft** nicht theoretisch beschreiben. Wie kann man das lösen?

Nach dem Urknall sollte eigentlich ein Gleichgewicht von Materie und Antimaterie geherrscht haben. Antimaterie hat nämlich die genau gleichen Eigenschaften wie Materie, nur ein anderes Ladungsvorzeichen. **ABER**: heute beobachtet man, dass **Materie und Antimaterie sich unterschiedlich verhalten** und z.B. in Zerfallsprozessen unterschiedlich bevorzugt werden. Warum?



Woher weiß man überhaupt von den Elementarteilchen?

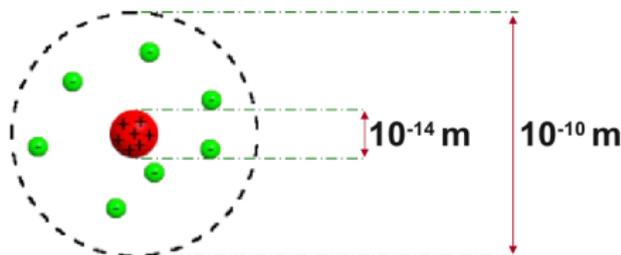
Thomson (1903): Messung Verhältnis von Ladung zu Masse für **positive Teilchen** → variiert mit Gasart.
Für **negative Teilchen**: immer gleicher Wert, unabhängig von Gasart → "Elektron".
Schlussfolgerung: Atom besteht aus positiv geladener Masse und negativ geladene Elektronen bewegen sich darin.



Und wie ging's dann weiter?

Rutherford (1911): **Alpha-Teilchen** (${}^4\text{He}$ -Atomkern: 2 Protonen, 2 Neutronen) werden **auf Gold-Atome geschossen**.

Beobachtung: Nur sehr wenige Teilchen werden überhaupt abgelenkt, dabei sind große Streuwinkel sehr selten.



Schematische Darstellung
des Atoms. Nicht maßstäblich.

Kern : Atom = 1 : 10 000 => Das Atom ist leer !

Das **Atom** ist nicht "leer": es **besteht aus Elektronen und aus dem Kern**.

...und woraus besteht ein Elektron und woraus besteht der Kern?

Sind Elektronen punktförmig?

Vermutlich schon.

Wie halten die Elektronen und der Kern zusammen?

Wieso ist der Kern in sich stabil?

Erklärung für die Stabilität von Atomen:

Niels Bohr: Elektronen auf bestimmten Bahnen strahlen keine Energie ab und somit wird **Atom stabil**. Energieabgabe nur beim Übergang in nächste Bahn möglich.

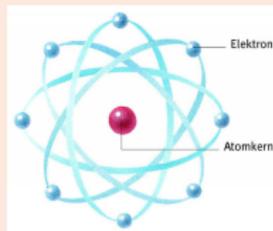


Eine Gruppe von Physikern beschießt Beryllium mit Alpha-Teilchen. **James Chadwick** ist überrascht über die entstandene energiereiche Strahlung mit hohem Durchdringungsvermögen. Sie besteht aus elektrisch neutralen Teilchen → Entdeckung des Neutrons

Seitdem: **Atomkern besteht aus Neutronen und Protonen.**

Bisher besprochen:

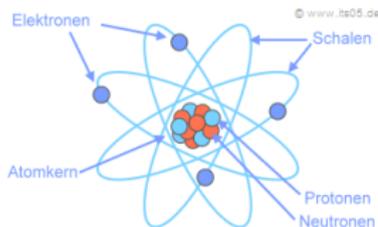
- Wir haben gesehen, dass das **Atom** aus Elektronen besteht, die um einen Kern kreisen.



- Der **Kern** besteht aus positiv geladenen Protonen und neutralen Neutronen.
- **Fragen:**
 - ▶ Welche Kräfte halten das Atom zusammen?
 - ▶ Welche Kraft ist z.B. dafür verantwortlich, dass manche Atome zerfallen?

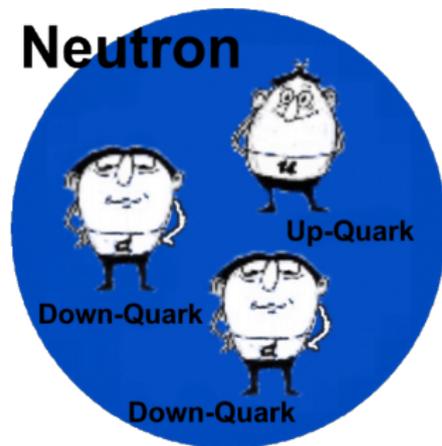
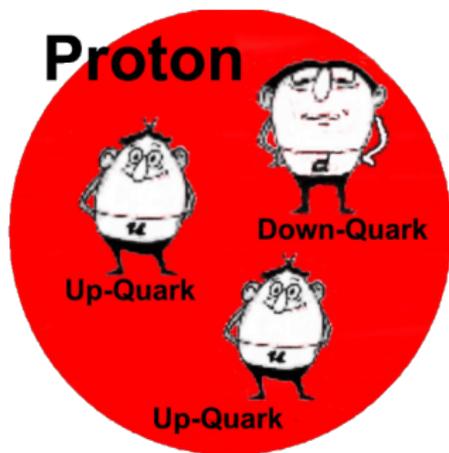
Die Grundkräfte: Beginnen wir mit zwei Bekannten...

Newton: Auf jeden Massenpunkt m_1 wirkt die Gravitationskraft $F_{m_1} = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$, erzeugt durch den Massenpunkt m_2 .
Unendliche Reichweite, nicht abschirmbar.



Coulombkraft bindet negativ geladene Elektronen an positiv geladenen Atomkern!
Neutrales Atom: Gleiche Anzahl Elektronen und Protonen.

Wer hat eigentlich gesagt, das Proton und das Neutron wären schon das Ende vom Lied?

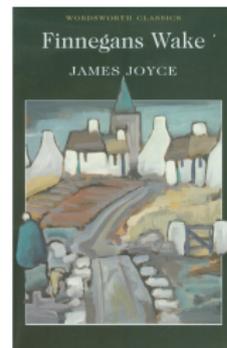


Proton und Neutron bestehen jeweils aus drei Quarks, deren Ladung sich zur positiven Elementarladung des Protons addiert bzw. zur Neutralität des Neutrons!

Zusammenhalt durch die **starke Kraft**.

Intermezzo: Woher kommt eigentlich der Name "Quark"?

Three quarks for Muster Mark!
Sure he hasnt got muck of a bark
And ure any he has its all beside the mark.
But O, Wreneagle Almighty, wouldn't un be a sky of lark
To see that old buzzard whooping about for uns shirt in the dark
And he hunting round for uns speckled trousers
around by Palmerstown Park?



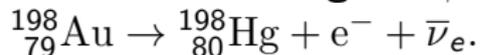
Der Theoretiker **Gell-Mann** nannte die kleinen Materiebausteine **"Quarks"** - einfach weil ihm der Name gefiel...

Der Ire **James Joyce** hatte das Wort wiederum auf der Durchreise auf dem Bauernmarkt in Freiburg im Breisgau gehört, als Marktfrauen ihre Milchprodukte anboten.

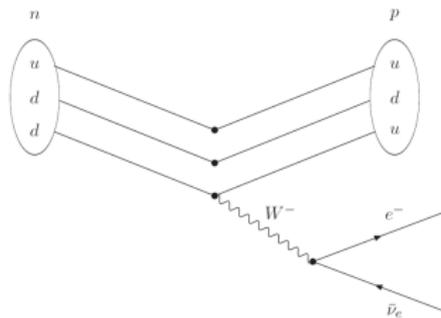
Quelle: <http://bremerstudiblog.wordpress.com/2008/09/01/warum-heisen-quarks-quarks/>, Wikipedia

Erinnerung: Beta-Zerfall

Typisches Beispiel: **Gold** (Neutronenüberschuss) **zerfällt in Quecksilber unter Aussendung von β -Strahlung**.



β -Strahlung: Elektronen (positive β -Strahlung: Anti-Teilchen Positronen)



Verantwortlich hierfür: Die **schwache Kraft** (erlaubt allerdings keine "gebundenen" Zustände!)

Zusammenfassung Grundkräfte

Die Kräfte der Physik (Wechselwirkungen)

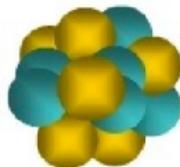
- Elektromagnetische Kraft



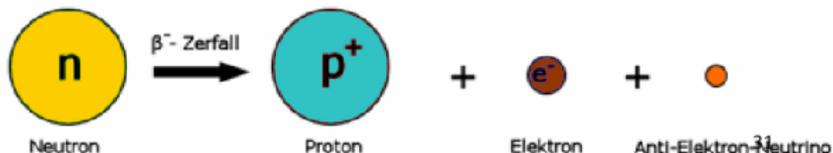
- Gravitation



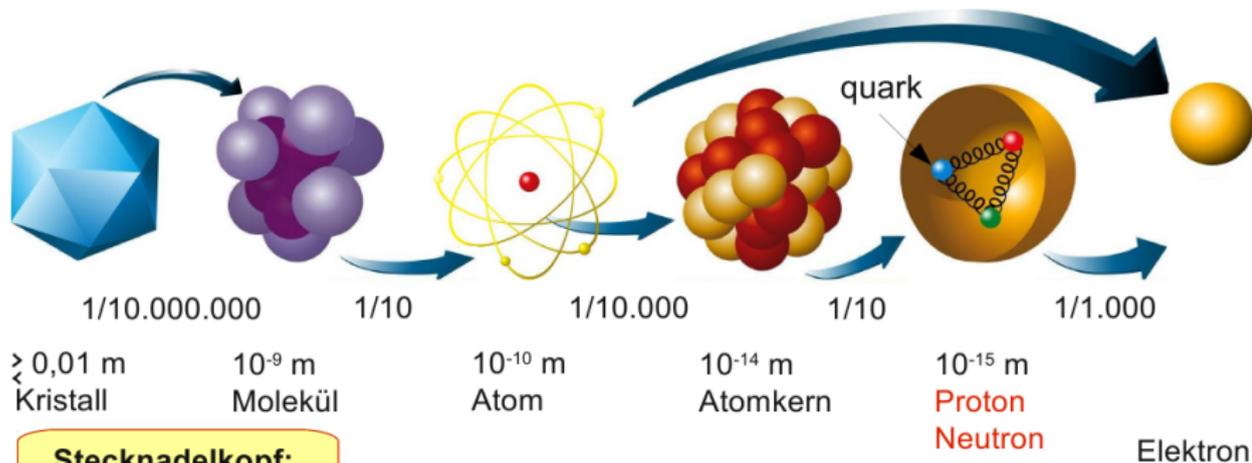
- Starke Kraft



- Schwache Kraft



Welche Teilchen kennen wir jetzt schon?

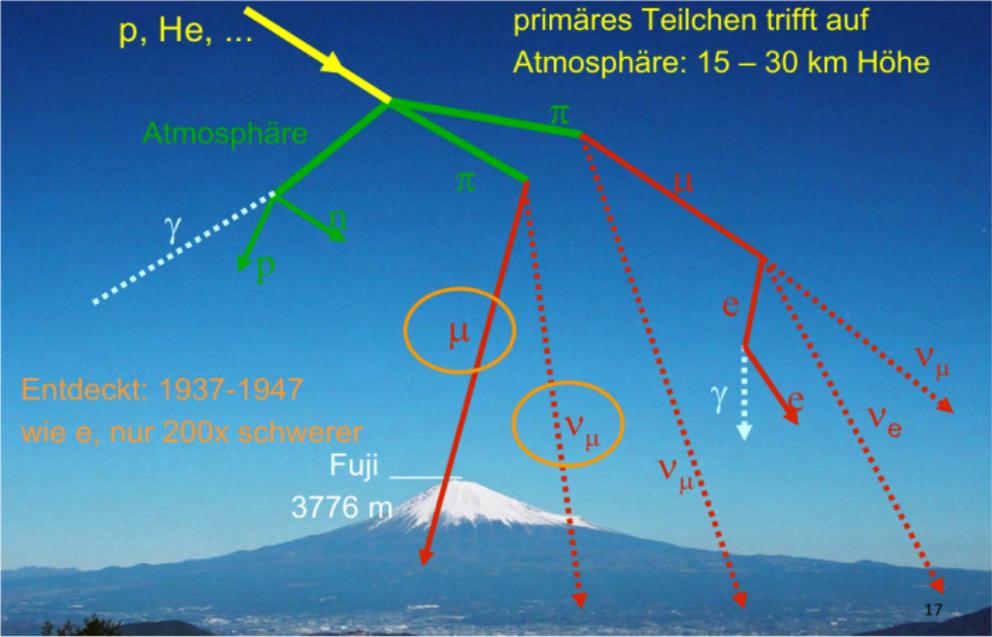


Stecknadelkopf:
 10^{-3} m = 0,001 m

Elektron, Quark:
 $< 10^{-18}$ m = 0,000000000000000001 m

punktförmig?

Das Elektron bringt noch ein paar Freunde mit: Die Myonen und Tauonen:



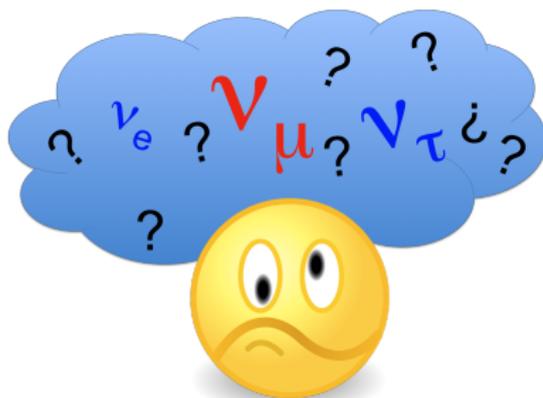
Außer dem Elektron und dem Myon gibt es noch das **“Tauon”**: Erst 1975 entdeckt, sehr kurze Lebensdauer ($2,906 \cdot 10^{-13}$ s).

Bisher nur am Rande erwähnt: Neutrinos

Das Elektron hat einen "Freund", das Elektron-Neutrino ν_e .
(theoretisch vorhergesagt 1931 - experimentell nachgewiesen 1956)
Dieses Teilchen wird "gebraucht" um Energie- und Impulserhaltung im β -Zerfall zu gewährleisten: $n \rightarrow p + e + \nu_e$

Steckbrief:

- keine elektrische Ladung
- (nahezu) masselos
- schwach wechselwirkend: 999 999 999 von 1 000 000 000 Neutrinos schaffen die Erddurchquerung
- Übrigens: Die Sonne ist eine riesige Neutrino-"Fabrik"

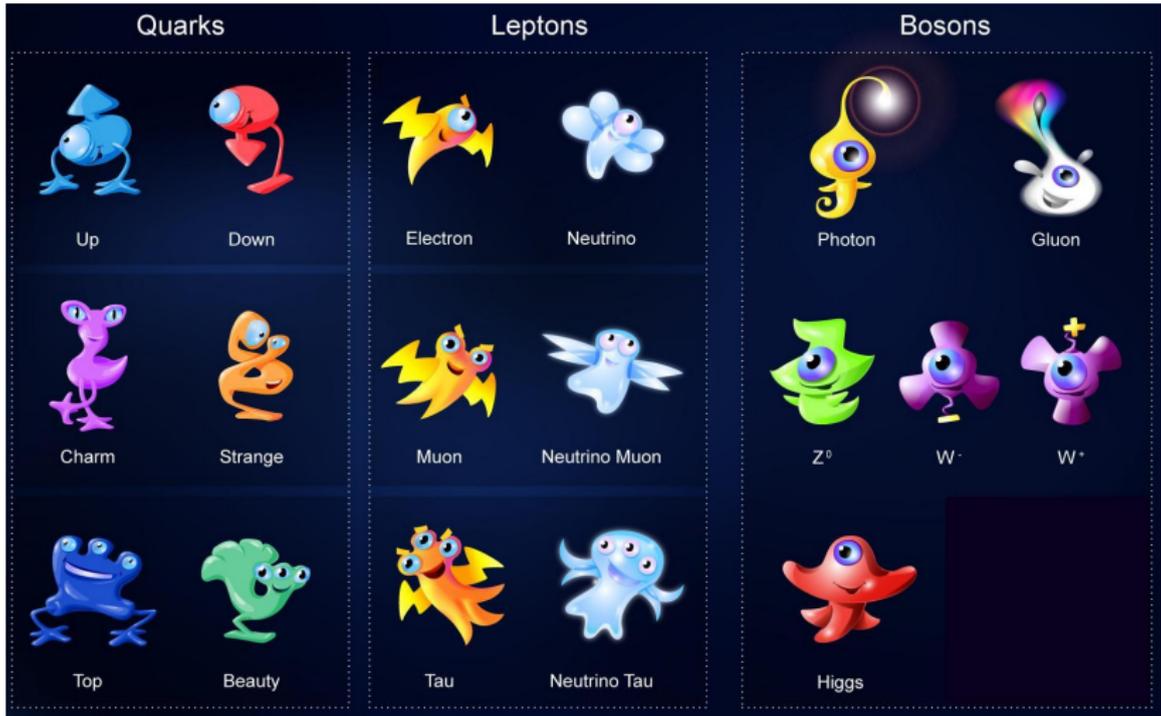


Austauschteilchen: Vermittler der Grundkräfte

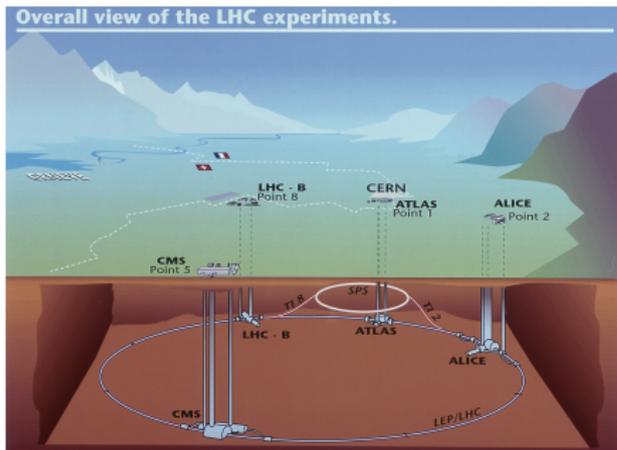
- Bereits bekannt: **Photon** als “Lichtteilchen”. Vermittelt elektromagnetische Kraft. Masselos, unendliche Reichweite. Abschirmbar.
- Neu: **Gluon** vermittelt die starke Kraft. Masselos, Reichweite 10^{-15} m
- **W- und Z-Bosonen** vermitteln die (elektro)schwache Kraft. Massiv, Reichweite 10^{-17} m
- Keine Ahnung, wie die Gravitation vermittelt wird! **“Graviton”** bisher nicht gefunden. Gravitation hat unendliche Reichweite, nicht abschirmbar.

Überblick Standardmodell

Zu jedem geladenen Elementarteilchen gibt es übrigens noch ein Anti-Teilchen mit entgegengesetztem Ladungsvorzeichen:
Elektron \rightarrow Positron, Up-Quark \rightarrow Anti-Up-Quark, etc.



May I introduce you? CERN!



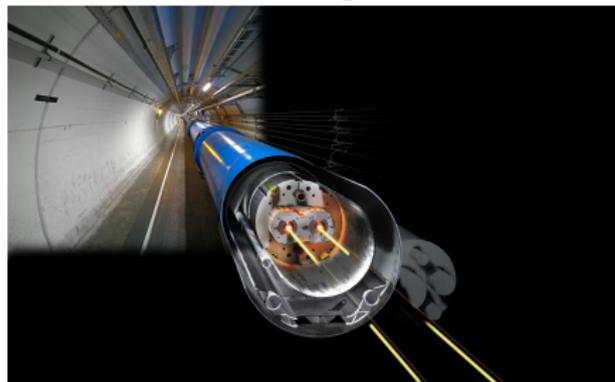
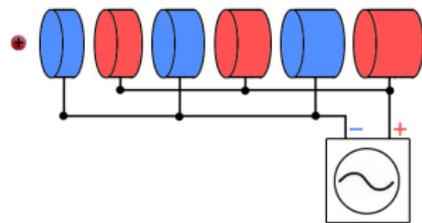
- CERN: **C**onseil **E**uropéen pour la **R**echerche **N**ucléaire (“Europäisches Kernforschungszentrum”)
- Erstreckt sich über schweizerisch-französische Grenze nahe bei Genf
- Gegründet 1954, seitdem Herberge vieler Teilchenphysikexperimente.

Am CERN wurde übrigens das Internet “erfunden”: Tim Berners-Lee entwickelte 1989 die Seitenbeschreibungssprache HTML und machte die erste Webpräsenz <http://info.cern.ch> um den Informationsaustausch zu erleichtern.

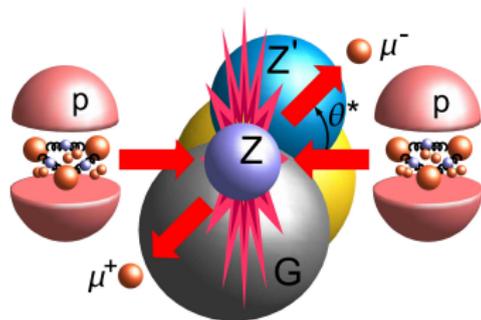
Teilchenbeschleuniger

Aktuell bekanntestes Projekt am CERN: Proton-Proton-Beschleuniger LHC

- Wie funktioniert ein Teilchenbeschleuniger?
- Was ist ein "Collider"?
- Warum macht ein Kreisbeschleuniger Sinn?



LHC: unterirdisch, 26 km Umfang,
supraleitende Dipolmagnete: \vec{B} -Feld
mit 8,6 Tesla



$$E = mc^2$$

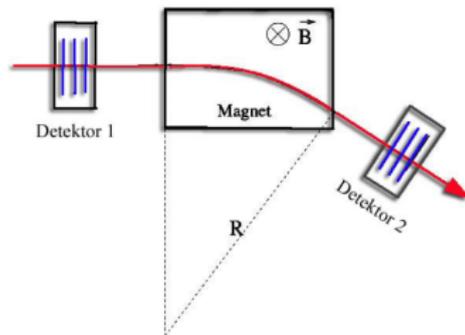
Und wie sieht man dann was nach der Kollision passiert ist? Prinzipien der Teilchenidentifikation:

- Direkte Messung von Ort, Energie, Ladung und Impuls
→ Datenauswertungen:
Massenverteilungen,
Zerfallswahrscheinlichkeiten,
Wechselwirkungseigenschaften und
neue Teilchen.

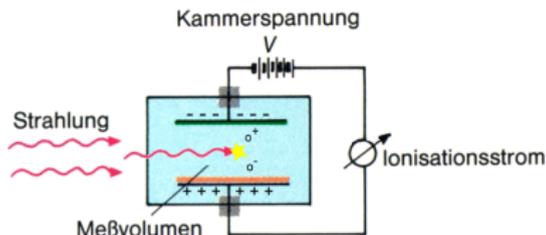
- Ausgenutzt z.B.:

- ▶ geladene Teilchen werden im \vec{B} -Feld abgelenkt
- ▶ Gase werden ionisiert
- ▶ Teilchen erzeugen Zerfallskaskaden (Schauer) in Materie.

$$\text{Impuls} = \text{Masse} \times \text{Geschwindigkeit}$$



Ionisationskammer:

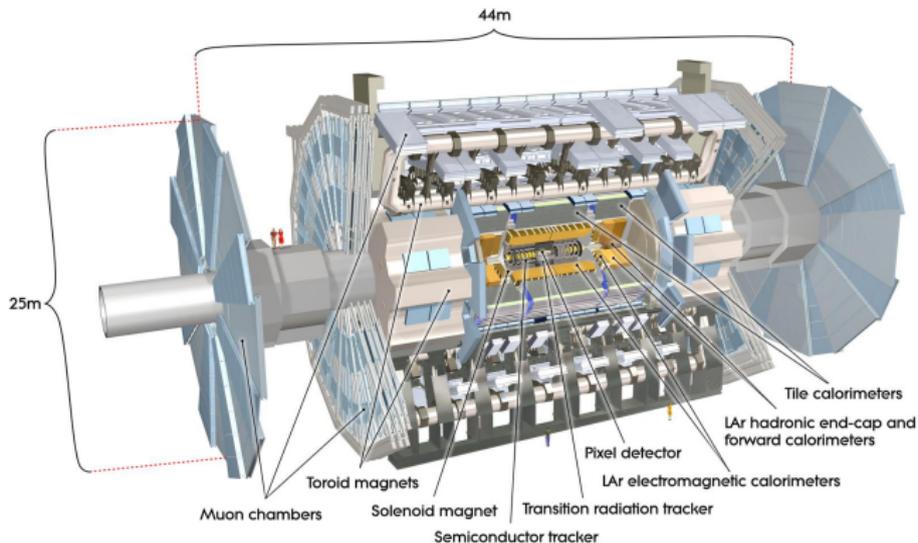
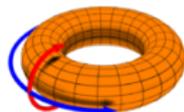


Beispiel für einen Detektor: ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS)

Zwiebelschalenstruktur aus tausenden Modulen zur Teilchenidentifikation.

Präzise Zeit-, Orts-, und Impulsauflösung.

Gewicht: 7000 Tonnen. Bezeichnend: Toroidales Magnetfeld.

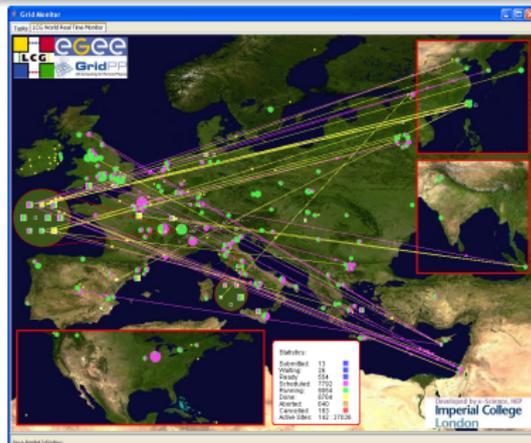


Wie wird man Herr über die gigantischen Datenmengen?

- Nicht alle aus dem Detektor ausgelesenen Daten aufgezeichnet (Größenordnung 40 MHz) - **mehr als 99% der Ereignisse durch ausgeklügelte Selektionskriterien bereits an oberster Stelle verworfen**
- Online “Trigger”: ausgelöst wenn interessante Signatur wie “zwei Myonen” oder “viel fehlende transversale Energie” vorhanden ist.
- ~ 100 Hz werden dann tatsächlich gespeichert und offline untersucht



Grid computing: weltweit verteilte Rechner gekoppelt um die großen Datensätze effizient zu analysieren



Die ATLAS-Daten bestätigen das Standardmodell!

Quarks		Leptons		Bosons		
 Up	 Down	 Electron	 Neutrino	 Photon	 Gluon	
 Charm	 Strange	 Muon	 Neutrino Muon	Aber was hat es mit dem Higgs auf sich?		
 Top	 Beauty	 Tau	 Neutrino Tau	 Z ⁰	 W ⁻	 W ⁺
				 Higgs		

Warum braucht man das Higgs?

Man kann sich ja auch die hoch-philosophische Frage stelle: “Was ist eigentlich Masse?”

Oder man steigt tiefer ein in die Theorie des Standardmodells und stellt fest: Huch, **die Teilchen haben ja noch gar keine Masse!**

(mathematisch gesehen)

Aber Messungen in Experimenten zeigen: All diese Teilchen HABEN Masse.

Lösungsvorschlag u.a. von Peter Higgs (1964): **Higgs-Mechanismus**

Intermezzo: Was genau ist eigentlich ein “Feld”?

Bekannt: \vec{E} - und \vec{B} -Felder mit endlicher Reichweite.

Aussage: räumliche Verteilung einer physikalischen Größe. Entlang der Feldlinien ‘passiert’ etwas, es gibt eine **Wirkung** auf elektrisch geladene Körper.

Wie funktioniert der Higgs-Mechanismus? Erklärung: David Miller



Die Partygäste stellen das Higgs-Feld dar

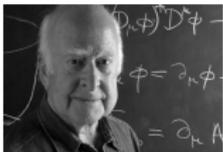


Ein VIP (= Elementarteilchen) betritt den Raum



Die Gäste scharen sich um den VIP ("lokale Störung des Feldes")

Das Higgs-Feld ist überall. Ein Elementarteilchen bekommt durch die lokale Störung Masse: die Menschentraube gibt dem VIP Masse. Die Partygäste, also das Feld, besteht **nicht** aus (Higgs-)Teilchen!!



Eine schöne Idee hatte Mr. Higgs da
- aber wie kann man das denn
beweisen?

Indem man das Higgs-Boson findet!



Ein Gerücht wird in den Raum getragen

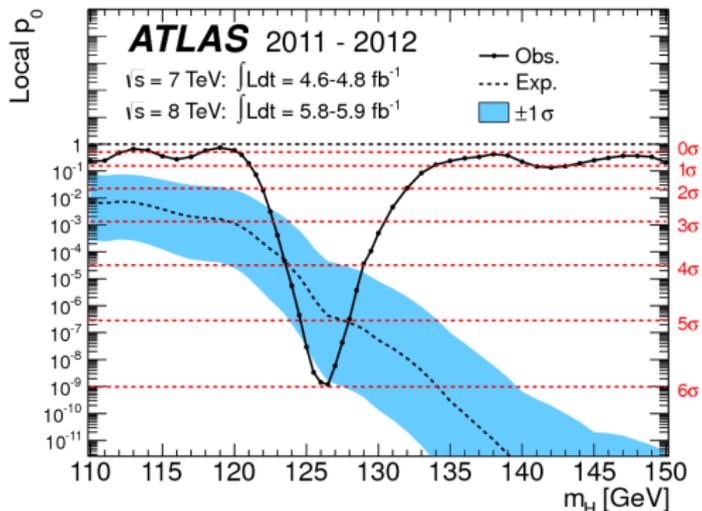


Ratschende Partygäste: Gruppenbildung ohne VIP

- Kleine Menschentrauben wandern durch den Raum. So wie zuvor der VIP zusätzliche Masse bekam, hat nun auch jede Menschentraube selbst eine Masse.
- Das Higgs-Boson entspricht einer Gruppe ratschender Partygäste und hat deshalb auch eine Masse.
- Wenn der Higgs-Mechanismus realisiert ist, gibt es auch ein **massives Higgs-Boson, das man dann (mit statistischen Methoden) messen können muss.**

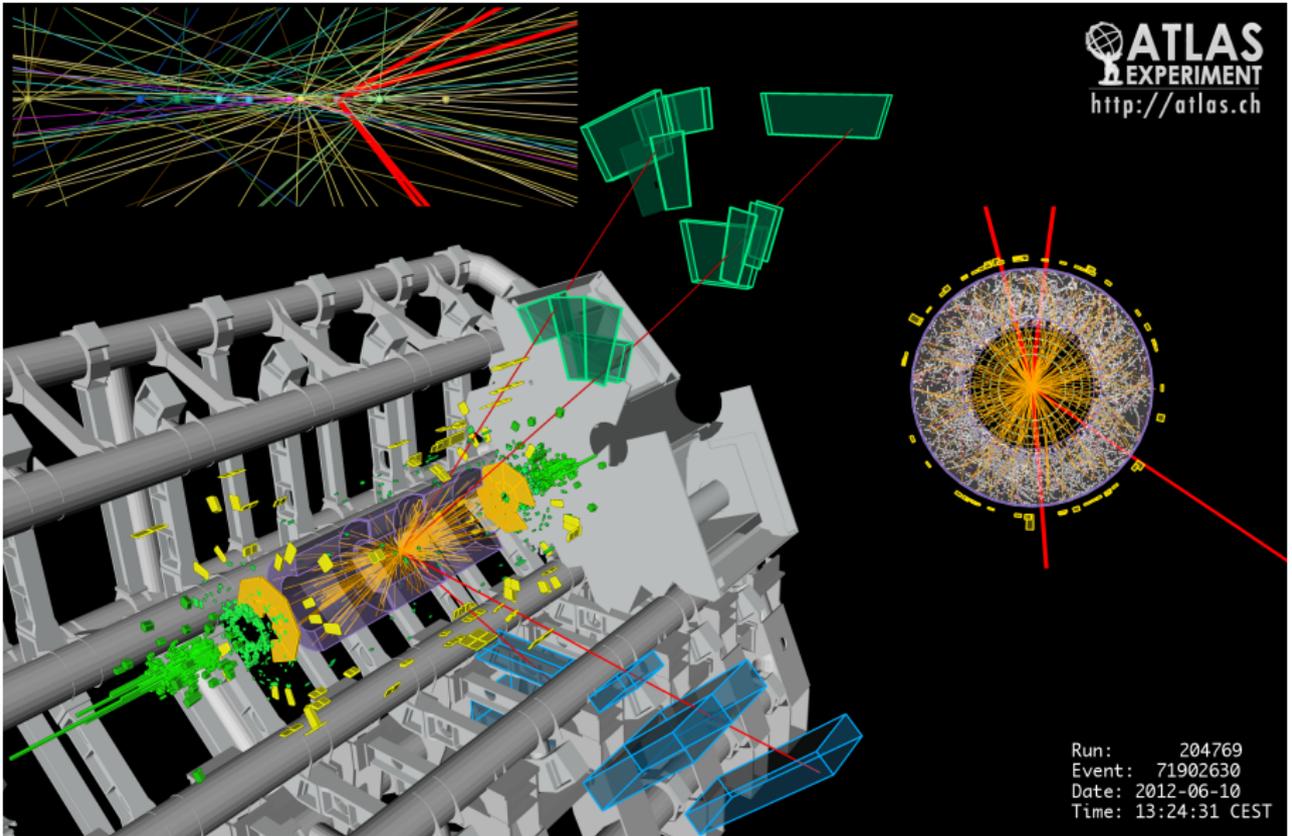
Und das tollste ist: Man hat 2012 ein Teilchen gefunden,
dass dem Higgs sehr ähnlich ist!

(wie ähnlich, wird gerade untersucht)



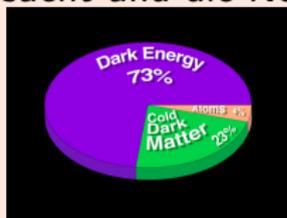
→ **Kein Grund mehr, es als “god[damn] particle” (L. Lederman) zu beschimpfen!**

Annahme: Higgs-Boson zerfällt nach der Proton-Proton-Kollision z.B. in vier Elektronen oder in vier Myonen oder in zwei Photonen.



Mal ein ganz anderes Thema: die dunkle Seite des Universums

- 1933: **Fritz Zwicky** bemerkt, dass der Coma-Haufen nicht durch die Gravitationswirkung seiner sichtbaren Bestandteile allein zusammengehalten werden kann. Er stellte fest, **dass das 10-fache der sichtbaren Masse notwendig ist, um den Haufen zusammen zuhalten.**
- Ab 1962 hat die Astronomin **Vera Rubin** die **Umlaufgeschwindigkeiten von Sternen in Spiralgalaxien** untersucht und die Notwendigkeit von Dunkler Materie bestätigt.



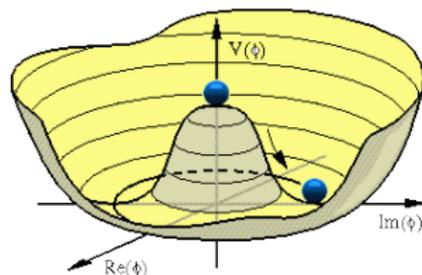
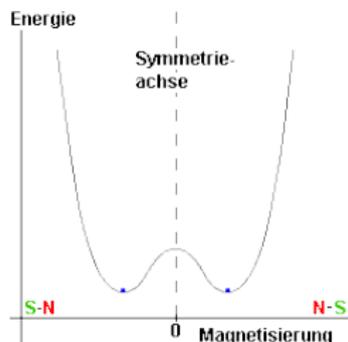
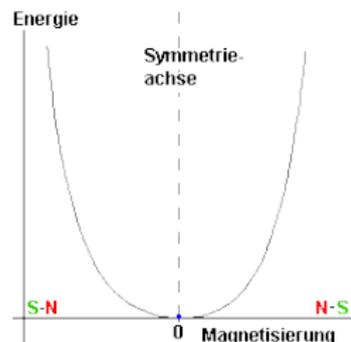
Supersymmetrie als theoretische Erweiterung des Standardmodells kann einen Kandidaten für Dunkle Materie bieten. Viele neue Elementarteilchen kämen hinzu!

The End

- Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!
- weitere Informationen:
 - ▶ CERN: www.cern.ch
 - ▶ ATLAS-Detektor: www.atlas.ch
 - ▶ Netzwerk Teilchenwelt für Schüler und Lehrer:
<http://www.teilchenwelt.de/>
 - ▶ Lehrstuhl für Elementarteilchenphysik LMU:
<http://www.etp.physik.uni-muenchen.de>
 - ▶ Josephine.Wittkowski@cern.ch

Spontante Symmetriebrechung

Beispiel Eisenstab



Temperatur sinkt unter Curie-Temperatur: Stab wird vom Paramagnet (nur so lange magnetisch, wie Magnet in der Nähe ist) zum Ferromagnet (Elementarmagnete parallel ausgerichtet)

Vakuumerwartungswerte $\neq 0 \rightarrow$ ergeben zusammen mit Eichfeldtermen die Massenterme für die Eichfelder