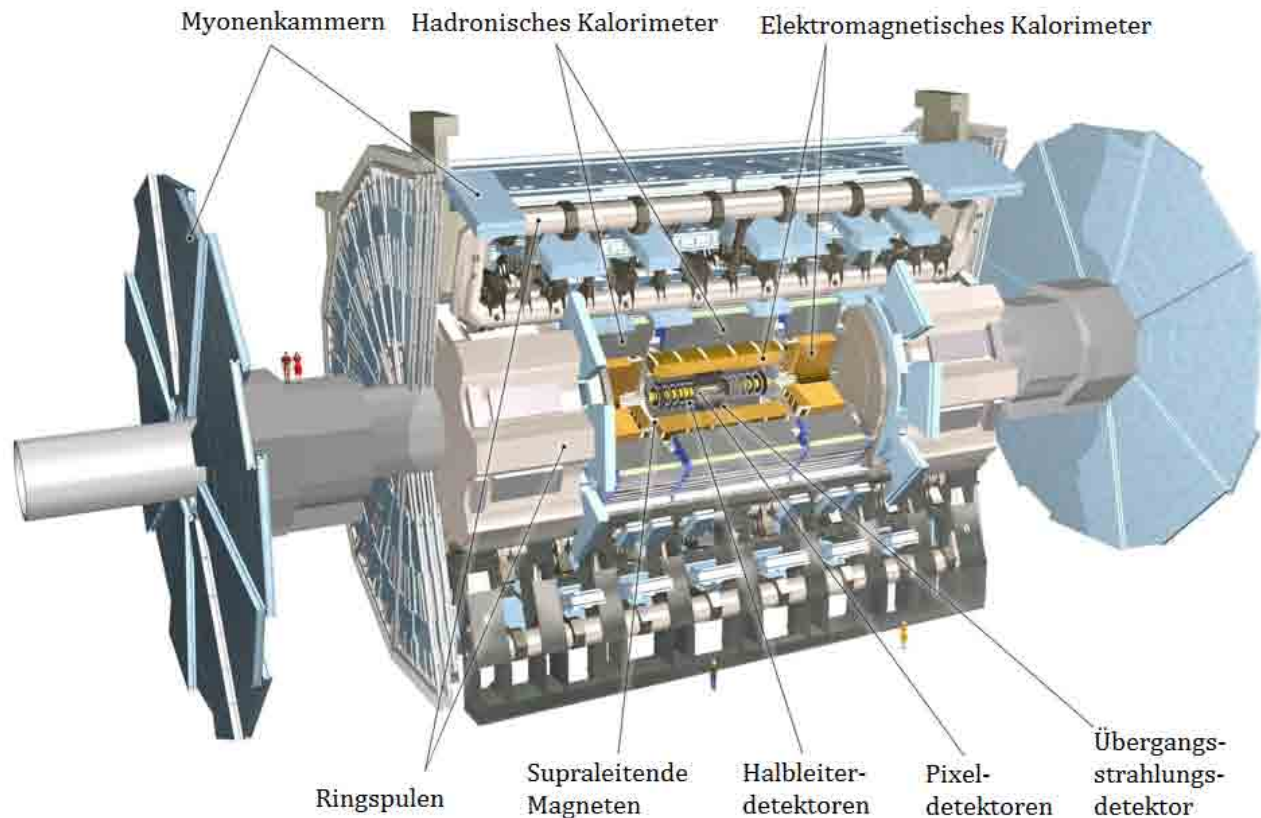
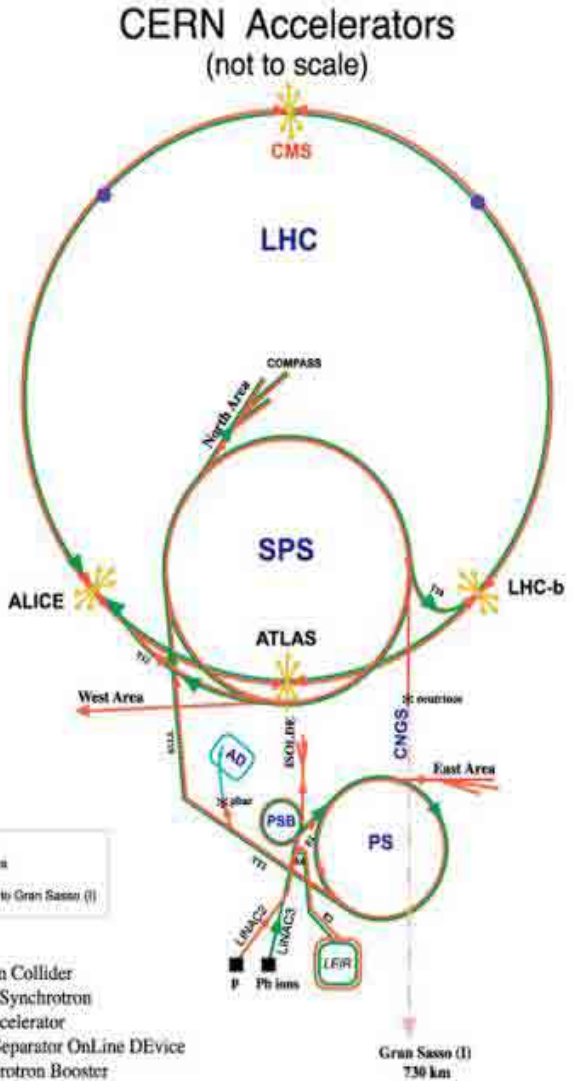


# Masterclasses mit LHC Daten: Auf Augenhöhe mit der aktuellen Forschung

Michael Kobel (TU Dresden)

Lehrertag Internationale Masterclasses, Dresden  
14.03.2014





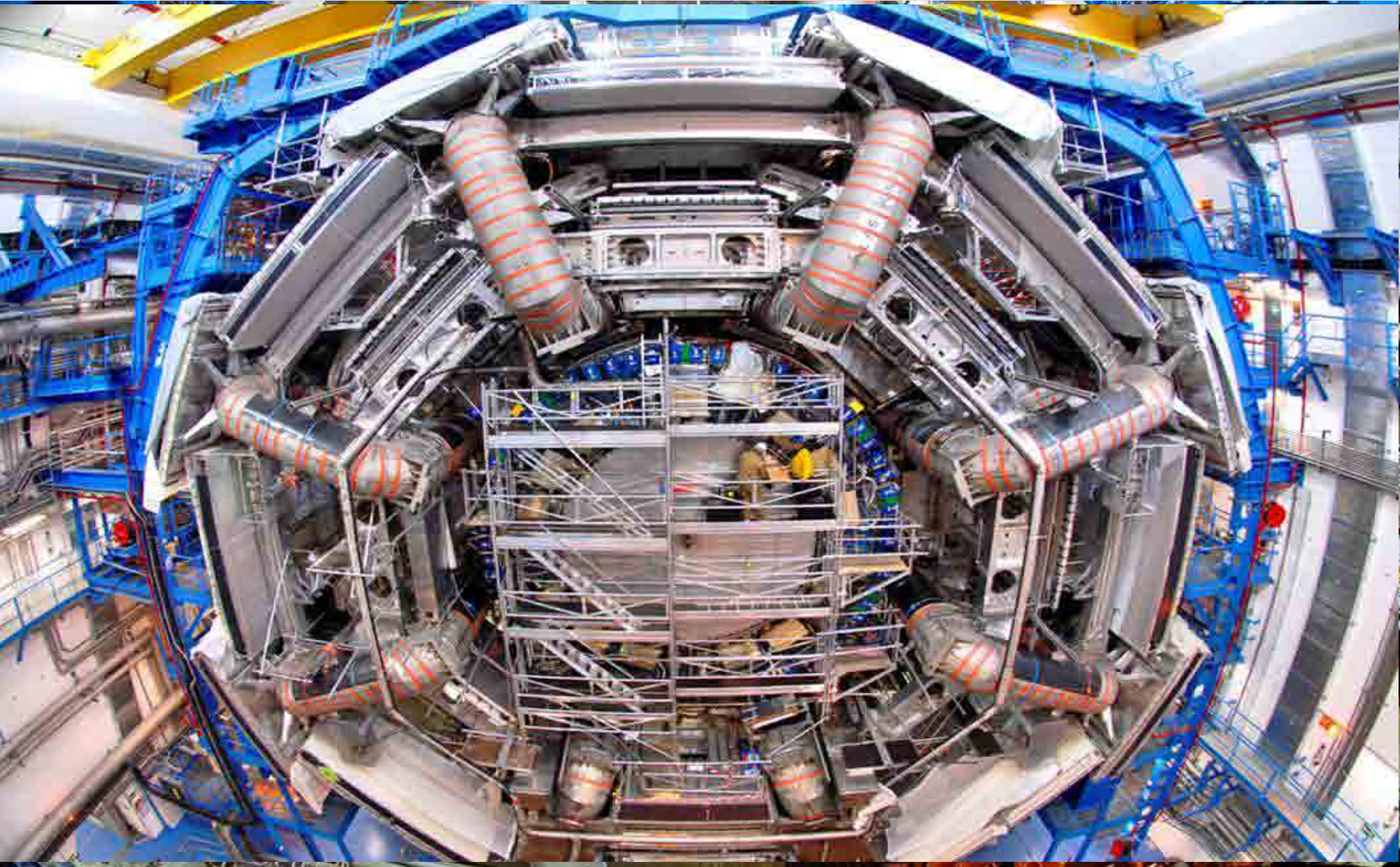
LHC: Large Hadron Collider  
 SPS: Super Proton Synchrotron  
 AD: Antiproton Decelerator  
 ISOLDE: Isotope Separator OnLine DEvice  
 PSB: Proton Synchrotron Booster  
 PS: Proton Synchrotron  
 LINAC: LINear ACcelerator  
 LEIR: Low Energy Ion Ring  
 CNGS: Cern Neutrinos to Gran Sasso

LEP ( $e^+e^-$ )	1989-1995	45+45 GeV
	1995-2000	bis 104+104 GeV
LHC (pp)	2010	3500+3500 GeV
	2011-2012	4000+4000 GeV
	> 2015	6500+6500 GeV?

Revised: LEP, PS Division, CERN, 02.09.98  
 Revised and adapted by Antonella Del Rossio, IFT Div.,  
 in collaboration with B. Dostinger, SI, Div., and  
 D. Manghwi, PS Div. CERN, 23.05.01

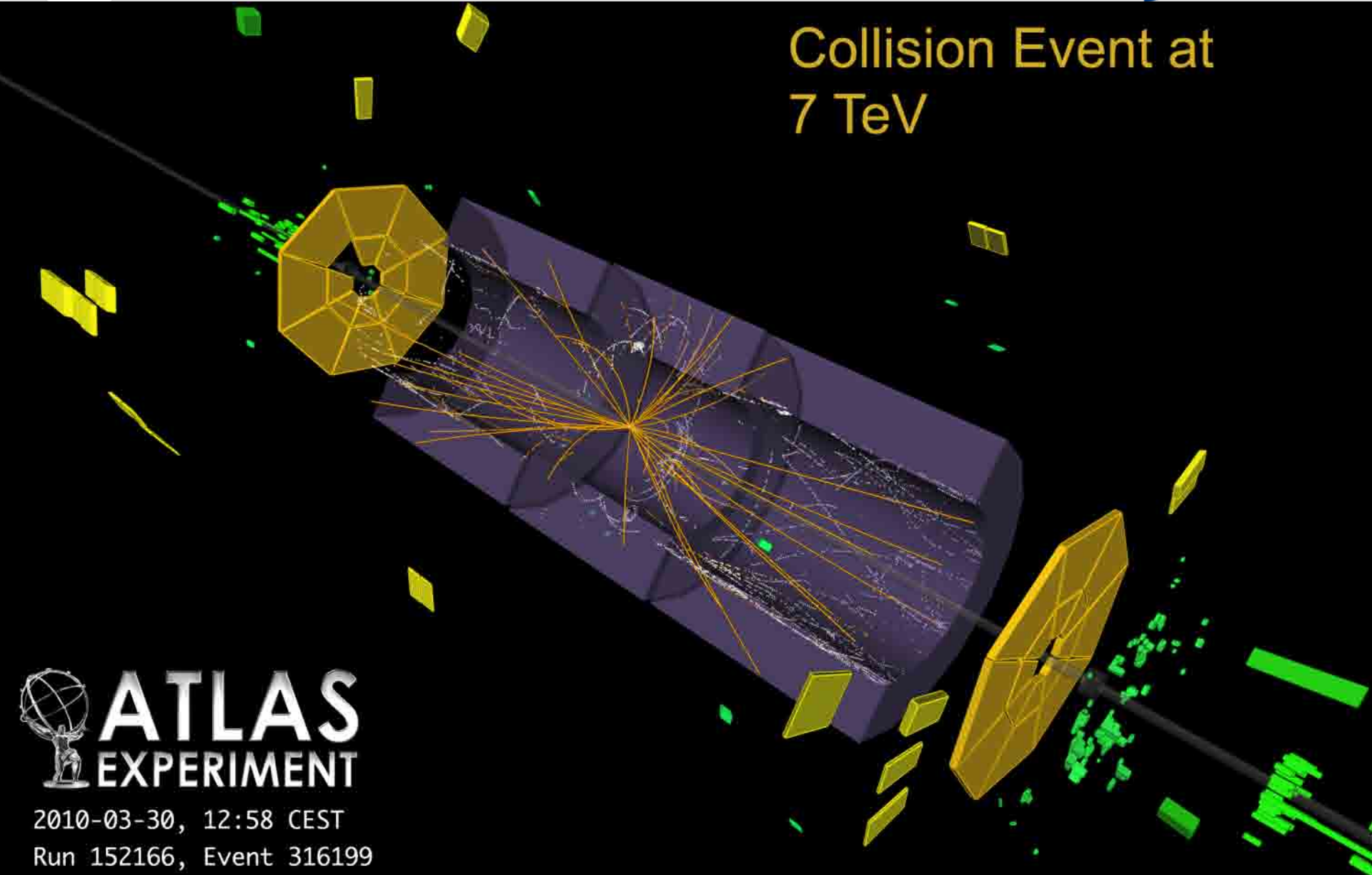


CERN visit - *Introduction*





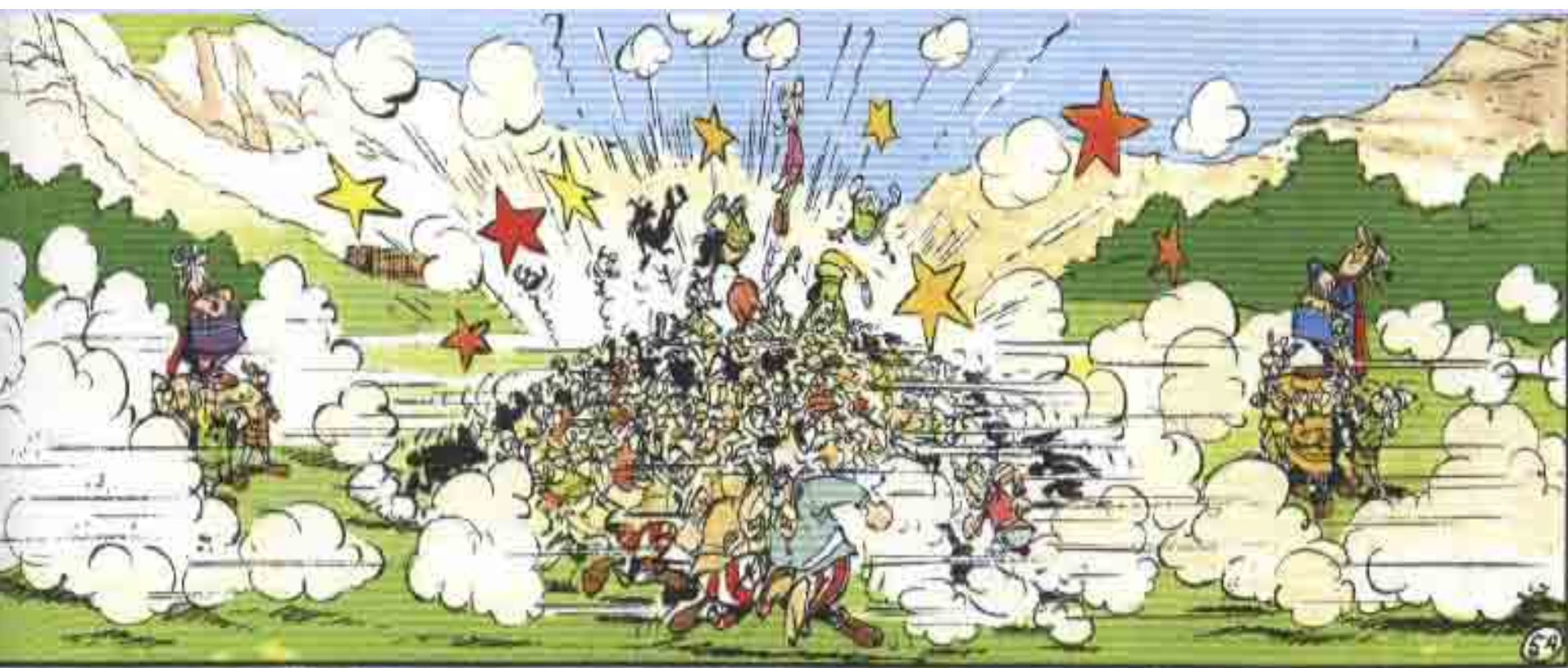
## Collision Event at 7 TeV



 **ATLAS**  
EXPERIMENT

2010-03-30, 12:58 CEST  
Run 152166, Event 316199

<http://atlas.web.cern.ch/Atlas/public/EVTDISPLAY/events.html>



# *Warum?*



Raum



Zeit



Materie



...Raum:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar$$

Werner Heisenberg

kleine Strukturen - kleine Abstände

... Materie:

$$E = m \cdot c^2$$

Albert Einstein

neue und schwere Materie

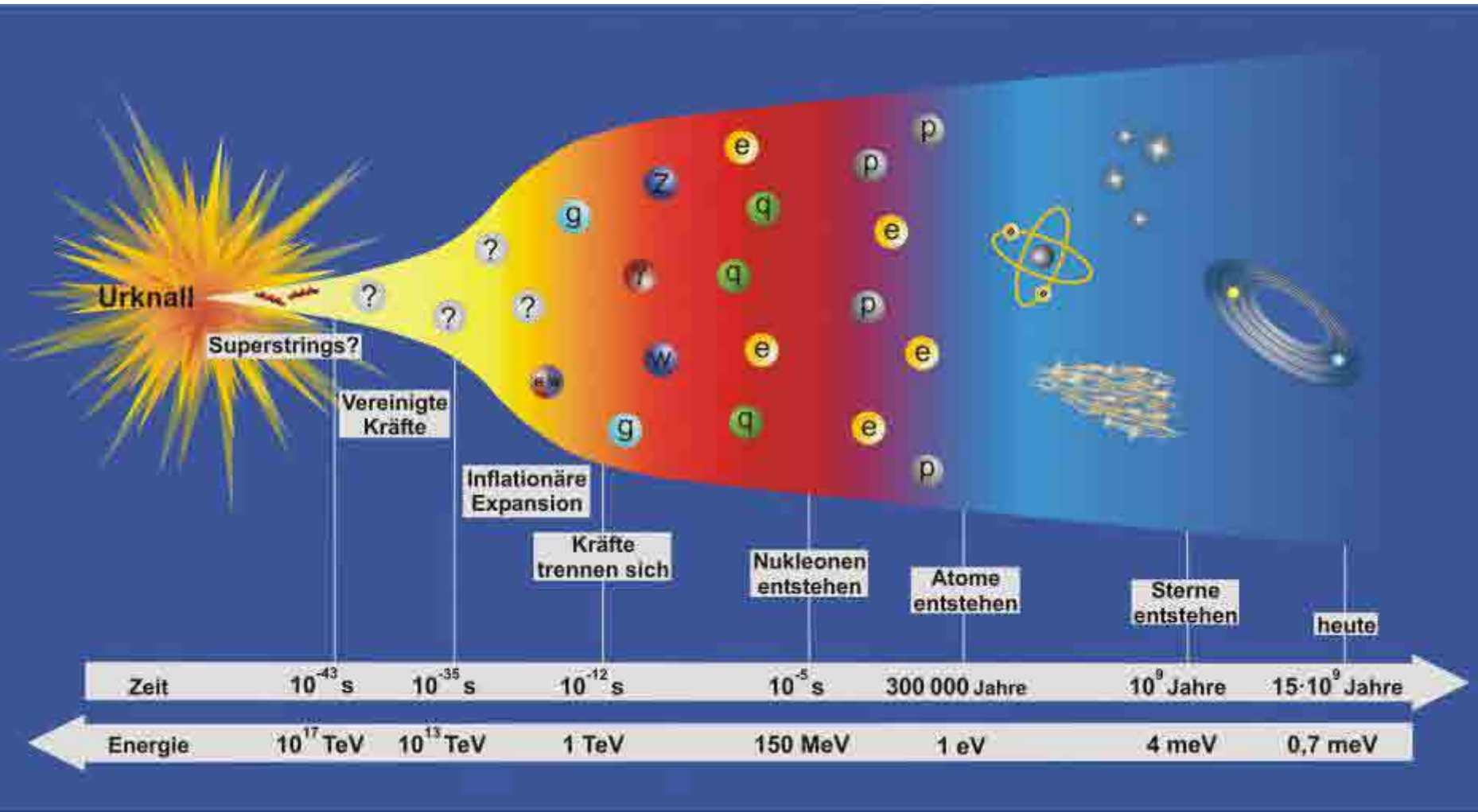
... Zeit:

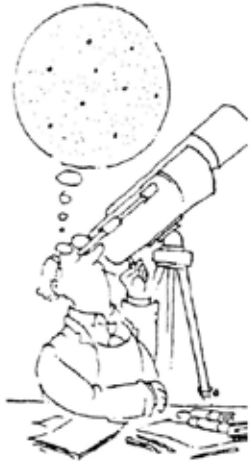
$$\langle E \rangle \approx k_b \cdot T$$

Ludwig Boltzmann

hohe Temperaturen

Die Temperatur des Universums fällt mit der Zeit

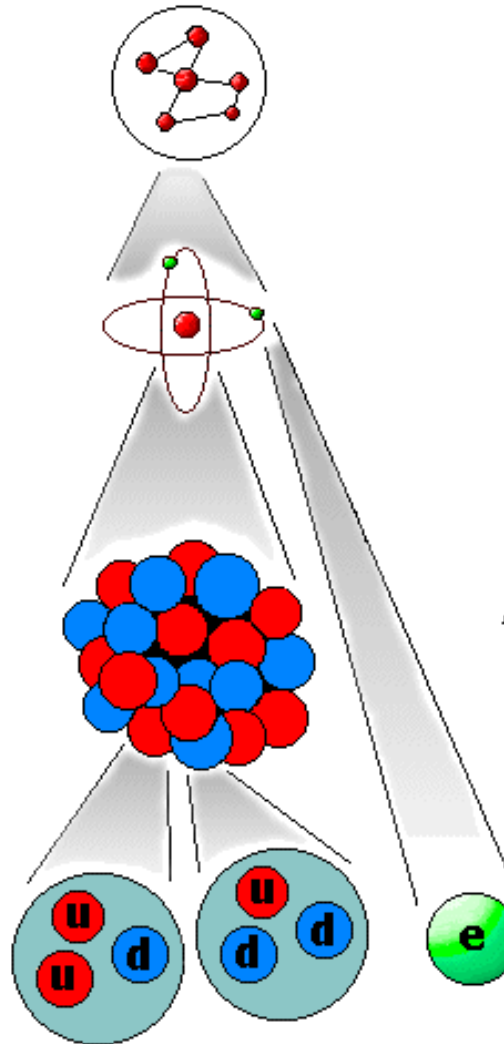




Makrokosmo



Mikrokosmos



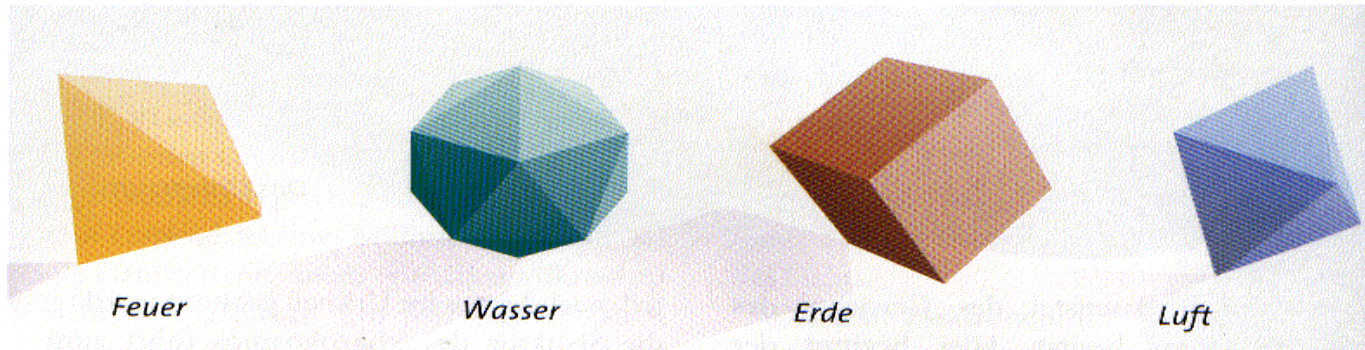
Molekül (aus Atomen)

Atom (aus Atomkern  
und Atomhülle)

Atomkern (aus Protonen  
und Neutronen)

Elementarteilchen  
(Up-Quark,  
Down-Quark,  
Elektron, Neutrino)

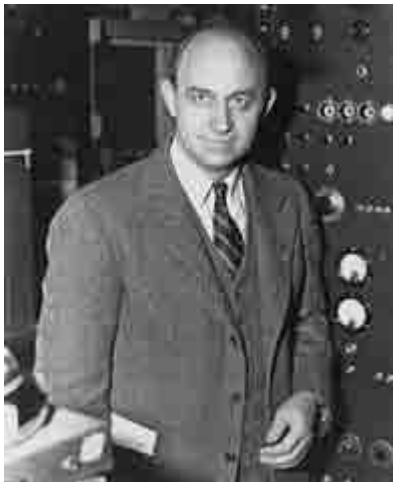
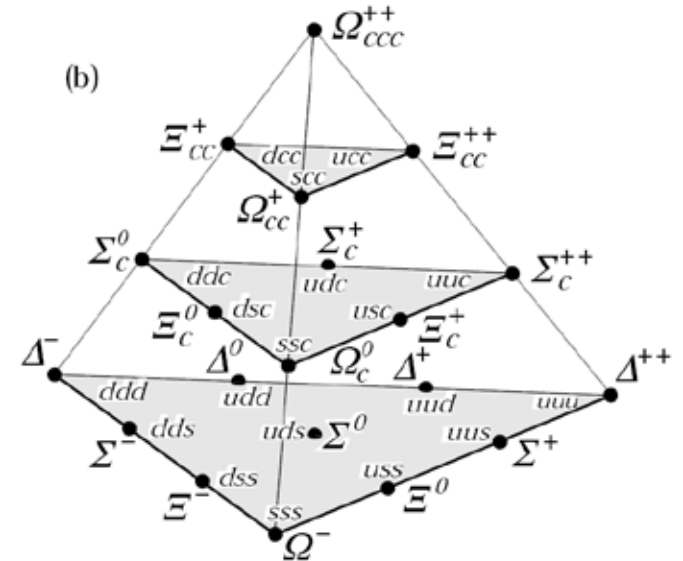
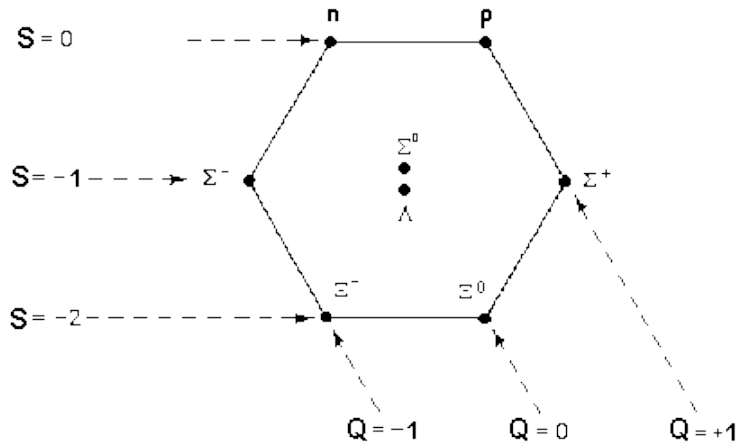
- ▶ **Elemente und Kräfte:** 500-430 v.Chr. Empedokles
  - ▶ **Vier Elemente:** Feuer, Wasser, Erde, Luft
  - ▶ **Zwei Urkräfte:** Liebe , Haß  $\hat{=}$  Mischung , Trennung
- ▶ **Symmetrien:** 427-347 v.Chr. Platon
  - ▶ **Symmetrische Körper:** Schönheit der Gesetze



- ▶ **Kleinste Bausteine:** 460-371 v.Chr. Demokrit
  - **Atome:** verschiedene Formen und Gewichte
  - **Leere:** Verbindung und Bewegung im Nichts

# Das heutige Theoriegebäude

- Theorie = „Standardmodell der Teilchenphysik“
- Was es sicher nicht ist:



Enrico Fermi sagte einmal zu seinem Studenten  
(und zukünftigen Nobelpreisträger )  
Leon Lederman,  
"Junger Mann, wenn ich mich an all die  
Namen dieser Teilchen erinnern könnte,  
wäre ich besser Botaniker geworden!"



# Zentraler Begriff 1: Wechselwirkung

- Pierers Universallexikon:

- **Wechselwirkung**, das Verhältnis zweier ~~gleichzeitig vorhandener~~ Gegenstände, vermöge dessen sie füreinander in gewissen Beziehungen zugleich als Ursache und als Wirkung aufgefasst werden.

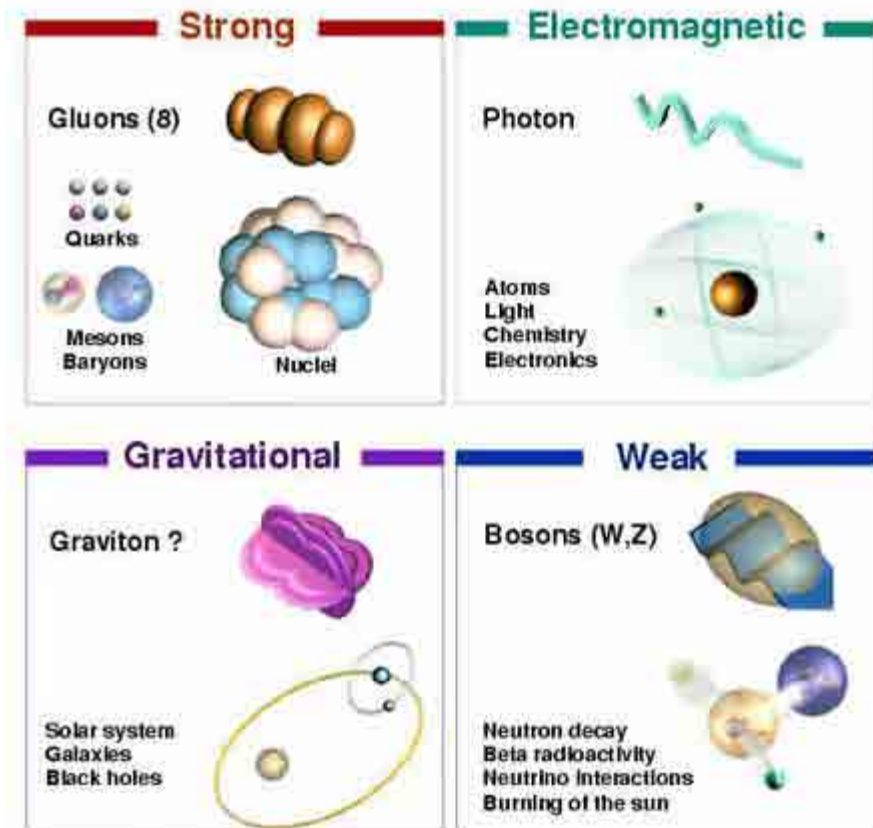


- In der Teilchenphysik sogar mehr als das

- Alle(!) Vorgänge in der Natur lassen sich zurückführen auf nur **4 Fundamentale Wechselwirkungen**
- 3 dieser Wechselwirkungen werden im Standardmodell erklärt
- Diese vereinigen die Phänomene „Entstehung“, „Kraft“ u. „Zerfall“

# Einteilung

- Welche „Kräfte“ gehören zu welcher fundamentalen Wechselwirkung?
  - Schwerkraft
  - Kernkraft
  - Coulomb-Kraft
  - Reibungskraft
  - Muskelkraft
  - Motorkraft
  - ...
- Woran könnte es liegen, dass wir von manchen Wechselwirkungen nichts „merken“? Von welchen?
- Welche können wir direkt spüren?
  - Gravitation
  - Elektromagnetismus
- Welche der beiden ist stärker?

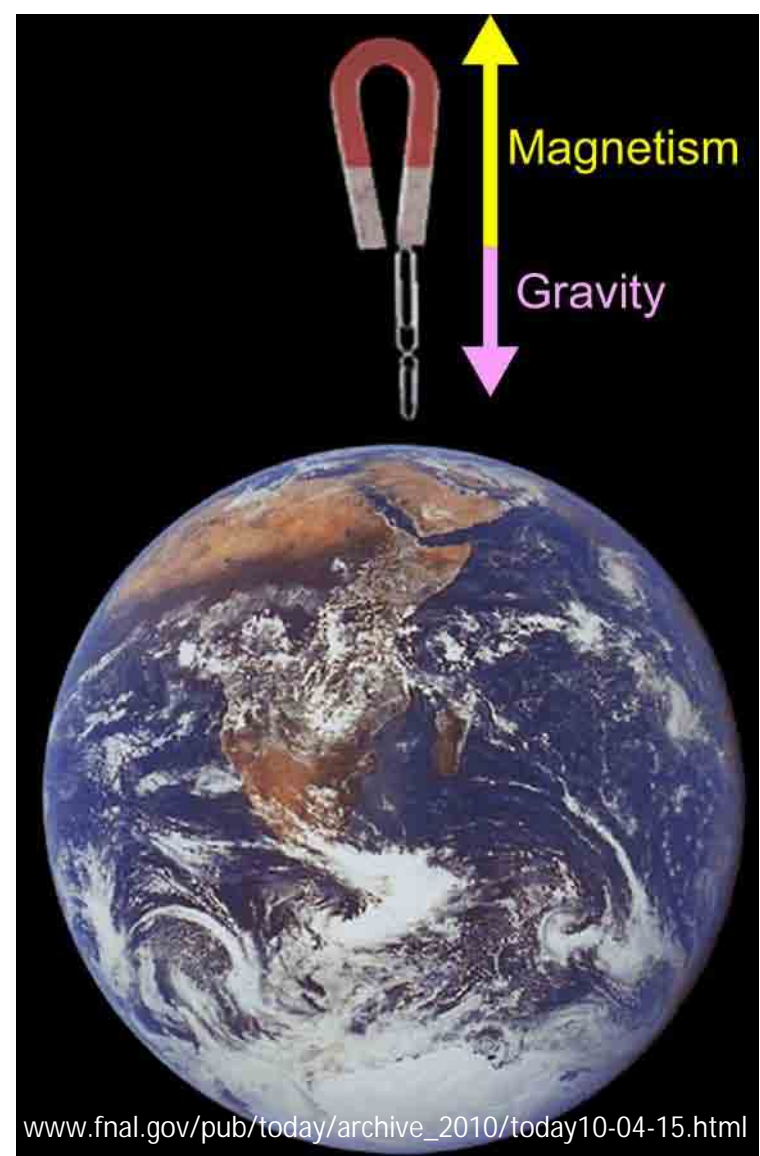
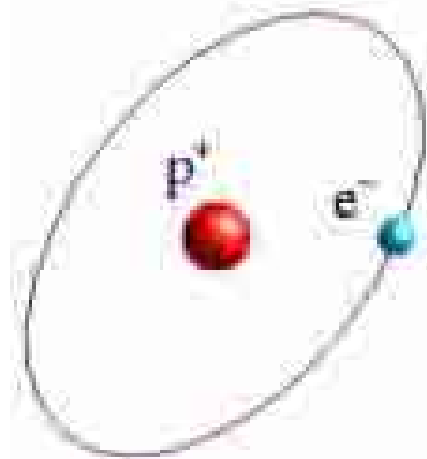


*The particle drawings are simple artistic representations*

# Ein Beispiel:

- Noch ein Beispiel:

Wasserstoff







$$\frac{F_{Coulomb}}{F_{Newton}} = 2.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000$$



# Ordne die Stärke der Wechselwirkungen !

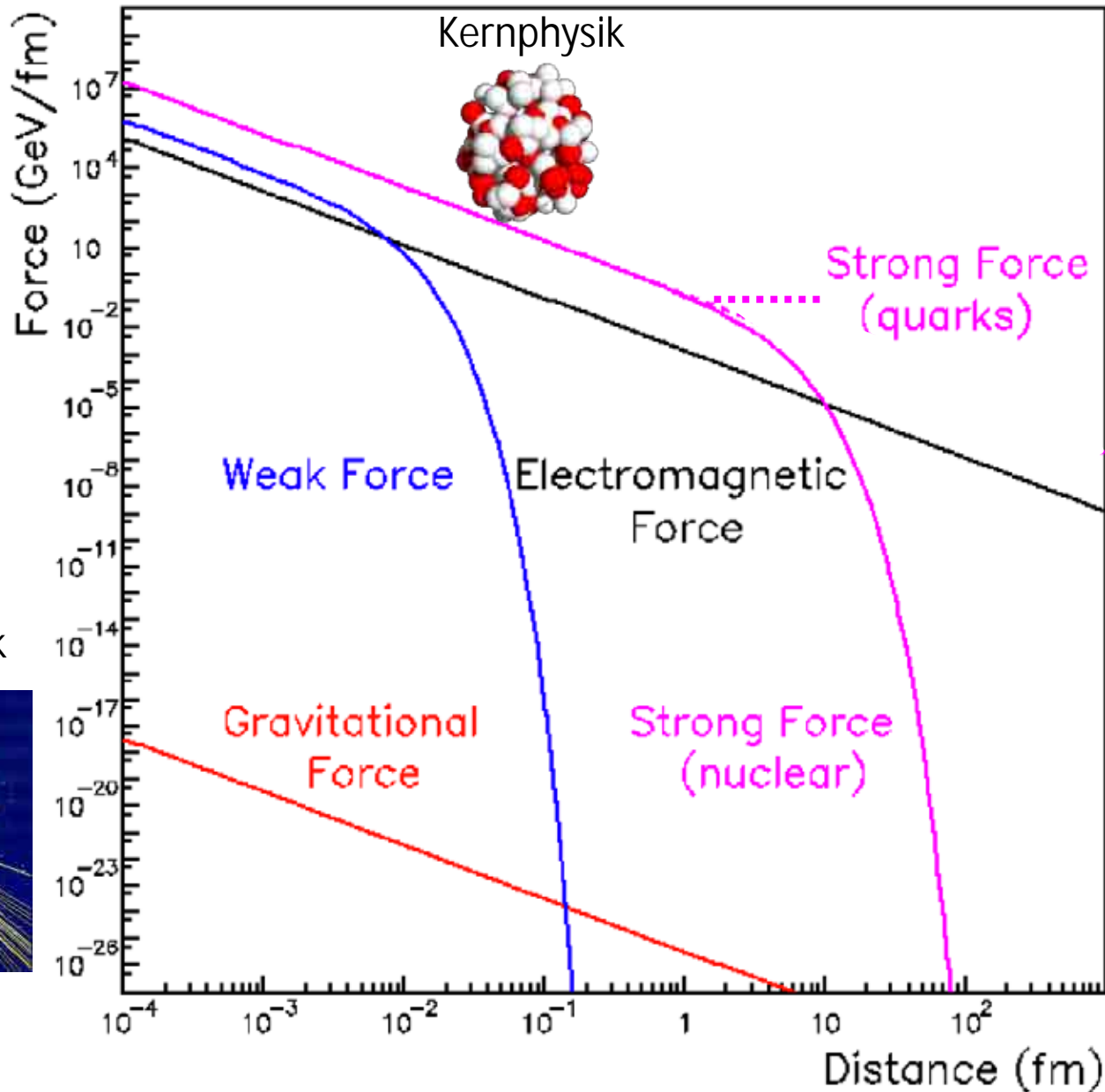
- Verbreiteter Fehler:

z.B. [www.drillingsraum.de/4\\_grundkraefte\\_physik/4\\_grundkraefte\\_physik.html](http://www.drillingsraum.de/4_grundkraefte_physik/4_grundkraefte_physik.html)  
(keine der schlechtesten Physikseiten...!)

Kraft	relative Stärke	Bosonen	Masse [GeV/c <sup>2</sup> ]	Reichweite [Meter]
Stark 	1	8 Gluonen	0	$2,5 \times 10^{-15}$
E.M. 	10 <sup>-2</sup>	Photon	0	$\infty$
Schwach 	10 <sup>-6</sup>	W <sup>-</sup> , W <sup>+</sup> , Z <sup>0</sup>	80,80,91	$10^{-18}$
Gravitation 	10 <sup>-38</sup>	Graviton?	0	$\infty$

- Dies geht nicht eindeutig!

# Die Ordnung der WW-Stärke hängt vom Abstand ab!



Kernphysik



Strong Force (quarks)

Weak Force

Electromagnetic Force

Gravitational Force

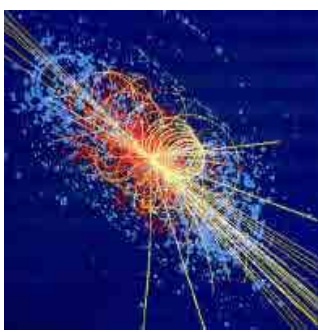
Strong Force (nuclear)

„Wir“





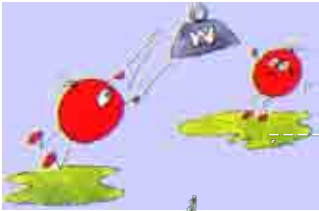
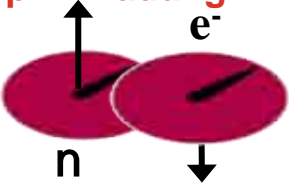
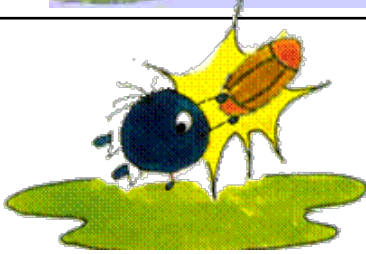
[www.schmunze.mal.de](http://www.schmunze.mal.de)

Teilchenphysik



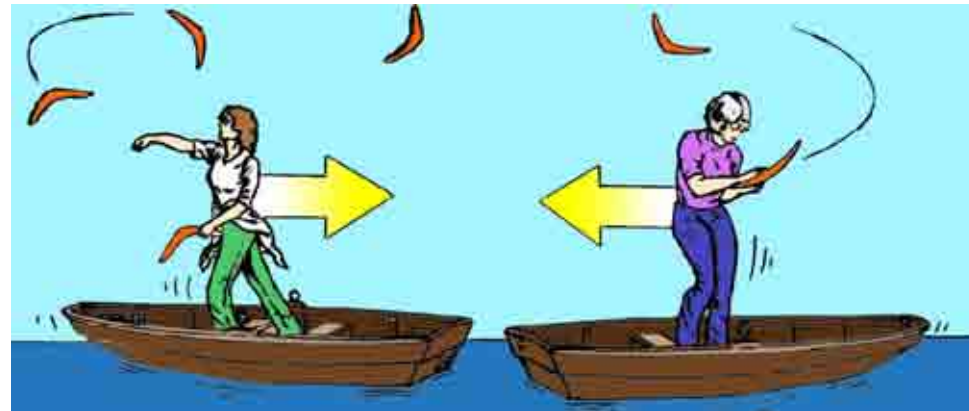
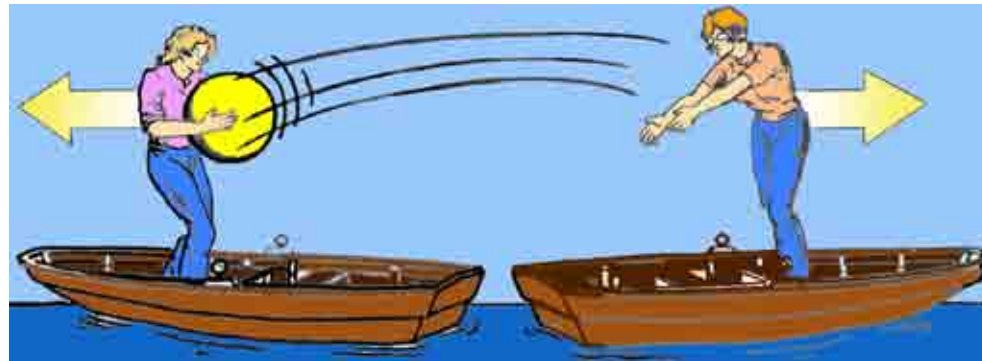
# Fundamentale Wechselwirkungen

- Jede Wechselwirkung (= Kraft+Umwandlung) hat eigene Botenteilchen
- Boten nur sendbar, wenn entsprechende Ladung vorhanden

Wechselwirkung	Botenteilchen	Ladung der Materieteilchen
Starke	Gluonen $g$ 	Starke „Farb“-Ladung „Rot“, „Blau“, „Grün“ 
Schwache	„Weakonen“ ( $W^+, W^-, Z$ ) 	Schwache „Isospin“-Ladung $I_3^W = \begin{matrix} \uparrow & 1/2 & \text{ö} \\ \downarrow & -1/2 & \text{ö} \end{matrix}$ 
Elektromagnetische	Photonen $g$ 	Elektrische Ladung $Q = -1, +2/3, -1/3, \dots$
Gravitation	Gravitonen ? Wahrscheinlich!	Masse ??? Eher nicht...

# Grundlegende Erkenntnis des „Standardmodells“

- Zu jeder Wechselwirkung gehört eine Ladung
- Nur Teilchen mit entsprechender Ladung spüren Wechselwirkung
- Wechselwirkung erfolgt über Austausch von Botenteilchen



[http://www.fnal.gov/pub/today/archive/archive\\_2013](http://www.fnal.gov/pub/today/archive/archive_2013)

# Zentraler Begriff #2: Ladung

Ladung ...

- ... ist *kein Stoff* !
- ... beschreibt die *Sensitivität* von Teilchen *bezüglich der jeweiligen Wechselwirkung*

Eigenschaften:

- Ladungen sind *Additiv*  
 $\text{Ladung}(A+B) = \text{Ladung}(A) + \text{Ladung}(B)$
- Ladungen kommen nur in Vielfachen einer *kleinsten Ladung* vor
- Ladung ist *erhalten*,  
d.h. sie entsteht weder neu, noch geht sie verloren

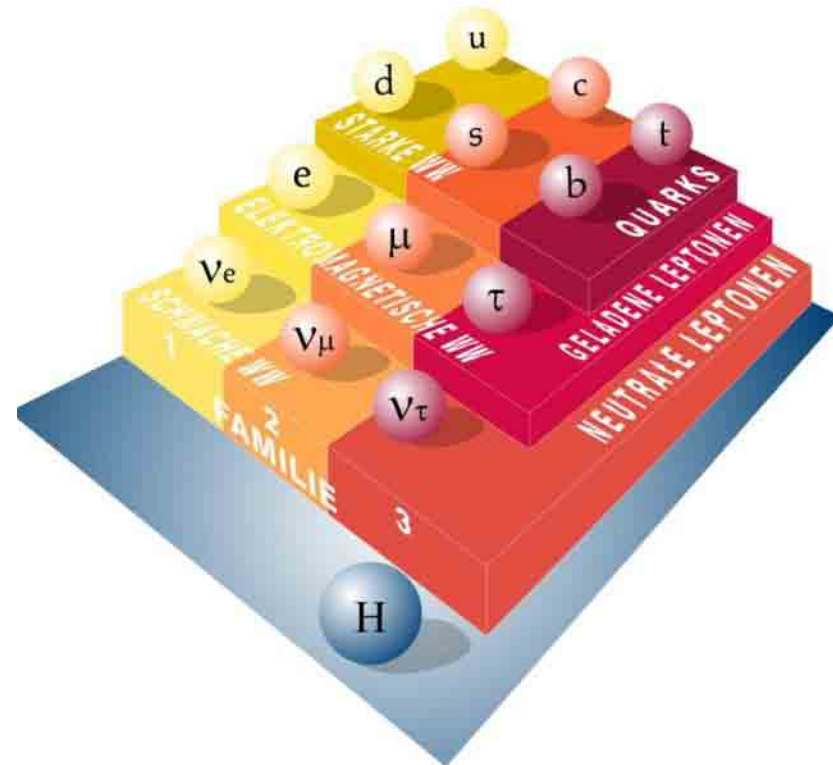
# Neues über Ladung

- Es gibt 3 völlig verschiedene Ladungen (für jede WW des Standardmodells eine)
- Diese können Vektorcharakter haben (!)
- Die Teilchen ordnen sich bezüglich dieser Ladungen in „Multipletts“
  - Warum genau diese Anordnung im „Periodensystem der Teilchen“? → immernoch unverstanden!

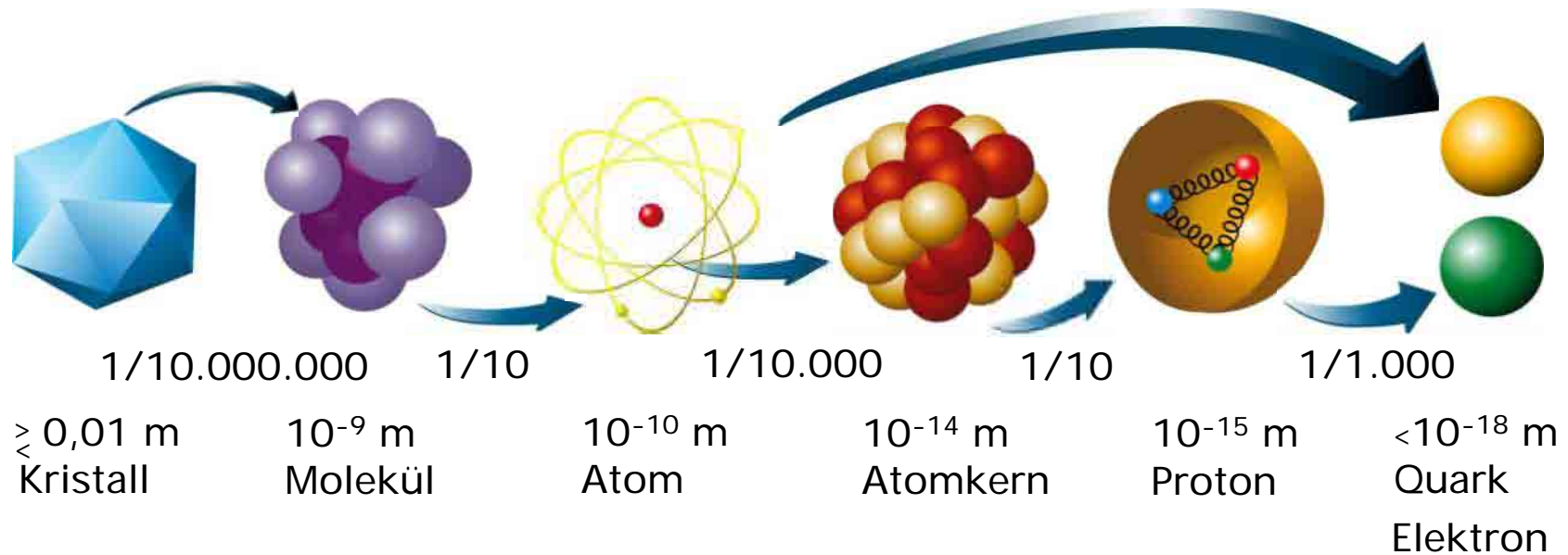
Elektrische Ladung $Q$	Schwache Ladung $I_3^W$	Starke Ladung	Blau Grün Rot	
$+2/3$	$+1/2$	<b>u</b>	<b>c</b>	<b>t</b>
$-1/3$	$-1/2$	<b>d</b>	<b>s</b>	<b>b</b>
0	$+1/2$	<b><math>\nu_e</math></b>	<b><math>\nu_\mu</math></b>	<b><math>\nu_\tau</math></b>
-1	$-1/2$	<b>e</b>	<b><math>\mu</math></b>	<b><math>\tau</math></b>
		1.	2.	3.
		Familie		

Quarks

Leptonen



# Materie und fundamentale Bausteine



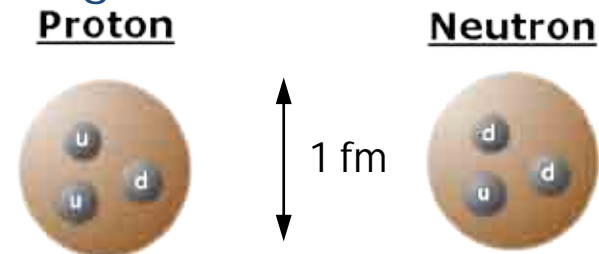
- Aufbau der stabilen Materie nur aus der ersten Familie

- Zwei „Quarks“ zu Protonen und Neutronen gebunden

- Down: d (Q=  $-1/3$ )
- Up: u (Q=  $+2/3$ )

- Zwei „Leptonen“

- Elektron e: gebunden in Atomhülle
- Neutrino n: ungebunden, entsteht in Kernumwandlungen (Kernfusion Sonne, Radioaktive Kernzerfälle)



# Materialien des Netzwerk Teilchenwelt



- „Steckbriefe“ der Teilchen (hier: Materieteilchen)
  - Gelegenheit zu eigenen Aktivitäten
  - ordnen, diskutieren, vertraut werden

	QUARKS		LEPTONEN		
3 GENERATIONEN	1.	<b>UP-QUARKS</b>  $m = 2 \text{ MeV}/c^2$ $q = +2/3$	<b>DOWN-QUARKS</b>  $m = 5 \text{ MeV}/c^2$ $q = -1/3$	<b>ELEKTRON</b>  $m = 0,511 \text{ MeV}/c^2$ $q = -1$	<b>ELEKTRON-NEUTRINO</b>  $m < 0,000\ 002 \text{ MeV}/c^2$ $q = 0$
	2.	<b>CHARM-QUARKS</b>  $m = 1300 \text{ MeV}/c^2$ $q = +2/3$	<b>STRANGE-QUARKS</b>  $m = 100 \text{ MeV}/c^2$ $q = -1/3$	<b>MYON</b>  $m = 106 \text{ MeV}/c^2$ $q = -1$	<b>MYON-NEUTRINO</b>  $m < 0,000\ 002 \text{ MeV}/c^2$ $q = 0$
	3.	<b>TOP-QUARKS</b>  $m = 173\ 000 \text{ MeV}/c^2$ $q = +2/3$	<b>BOTTOM-QUARKS</b>  $m = 4200 \text{ MeV}/c^2$ $q = -1/3$	<b>TAUON</b>  $m = 1777 \text{ MeV}/c^2$ $q = -1$	<b>TAU-NEUTRINO</b>  $m < 0,000\ 002 \text{ MeV}/c^2$ $q = 0$

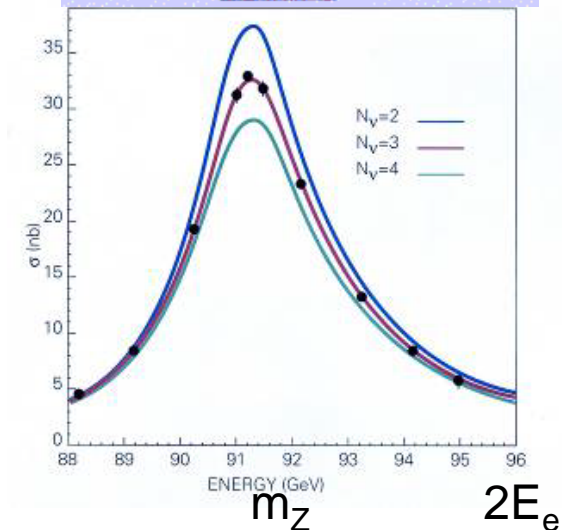
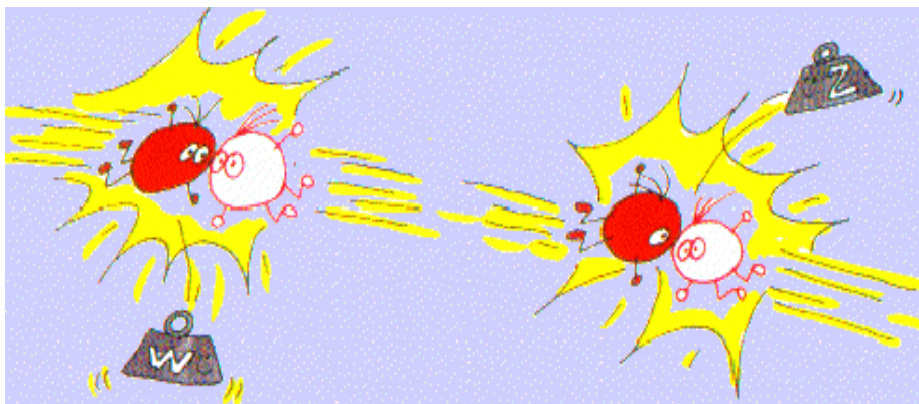
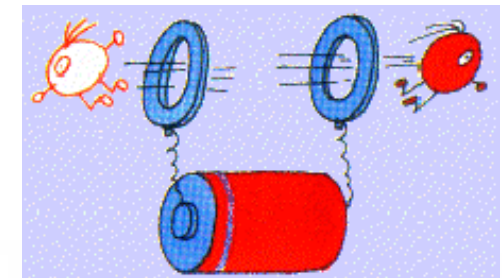
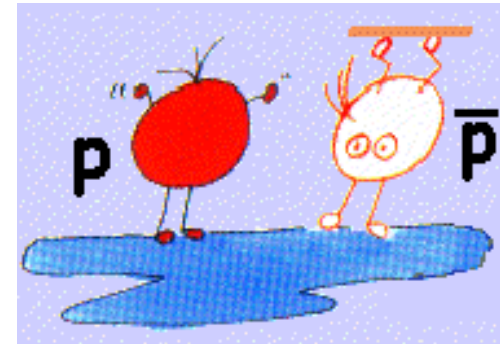
Stabile Materie in unserer Umgebung besteht nur aus Teilchen der ersten Generation: Elektronen, Up- und Down-Quarks.

Von ihnen gibt es je zwei massereichere, instabile „Kopien“ mit gleichen Ladungen (2. und 3. Generation).



# Antimaterie

- Zu jedem Bausteinteilchen existiert ein Antiteilchen mit **umgekehrten Vorzeichen** von **allen** Ladungen
- Sonst sind **alle Eigenschaften** (Masse, Lebensdauer) **gleich**
- Aus Botenteilchen können **paarweise** Materie- und Antimaterieteilchen **entstehen**
- Umgekehrt können sie sich **paarweise** wieder zu Botenteilchen (nicht: „reine Energie“) **vernichten**



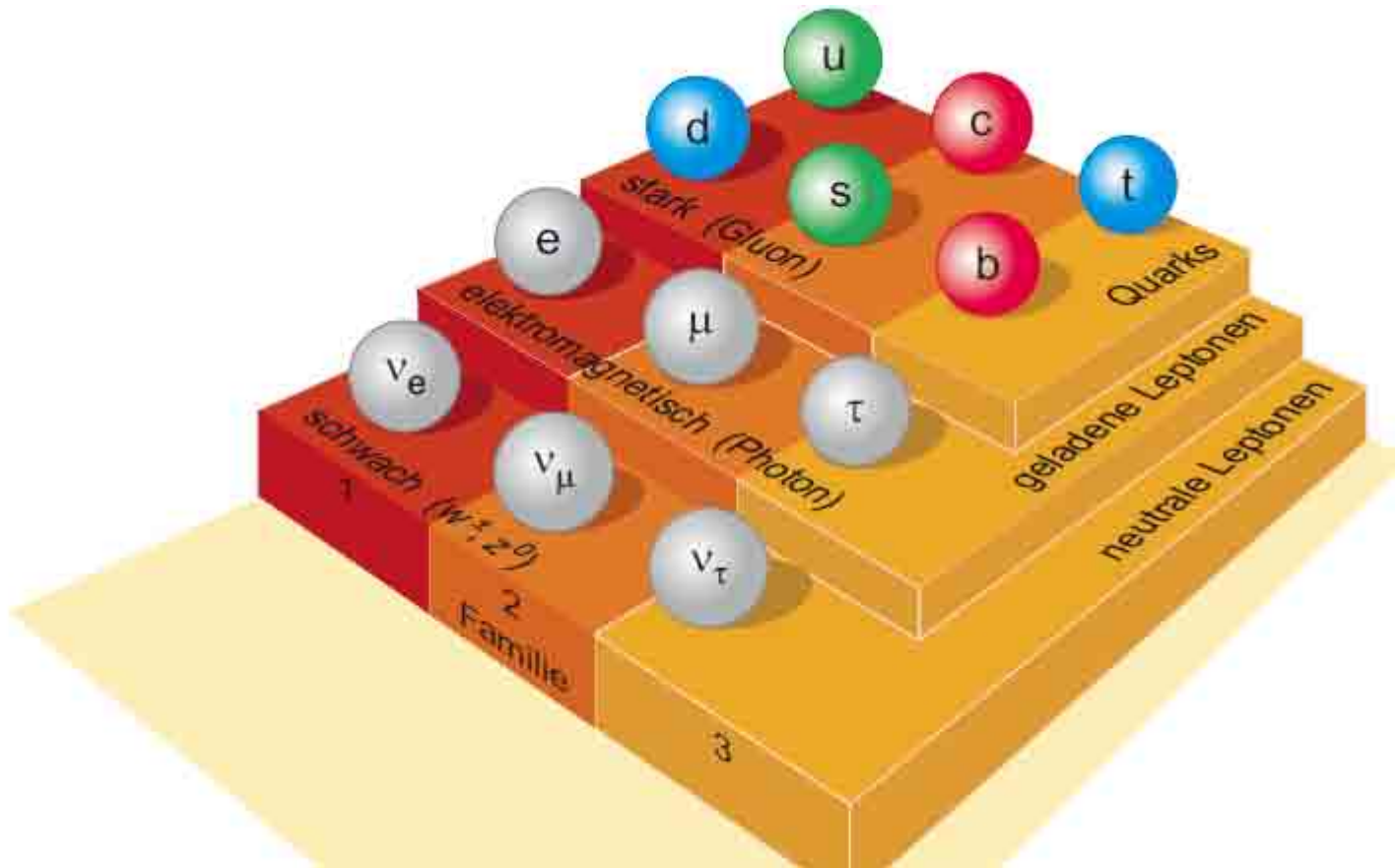


# Antimaterie

	ANTIQUARKS		ANTILEPTONEN	
1.	<b>UP-ANTIQUARKS</b>  $m = 2 \text{ MeV}/c^2$ $q = -2/3$	<b>DOWN-ANTIQUARKS</b>  $m = 5 \text{ MeV}/c^2$ $q = +1/3$	<b>POSITRON</b>  $m = 0,511 \text{ MeV}/c^2$ $q = +1$	<b>ELEKTRON-ANTINEUTRINO</b>  $m < 0,000\ 002 \text{ MeV}/c^2$ $q = 0$
2.	<b>CHARM-ANTIQUARKS</b>  $m = 1300 \text{ MeV}/c^2$ $q = -2/3$	<b>STRANGE-ANTIQUARKS</b>  $m = 100 \text{ MeV}/c^2$ $q = +1/3$	<b>ANTI-MYON</b>  $m = 106 \text{ MeV}/c^2$ $q = +1$	<b>MYON-ANTINEUTRINO</b>  $m < 0,000\ 002 \text{ MeV}/c^2$ $q = 0$
3.	<b>TOP-ANTIQUARKS</b>  $m = 173\ 000 \text{ MeV}/c^2$ $q = -2/3$	<b>BOTTOM-ANTIQUARKS</b>  $m = 4200 \text{ MeV}/c^2$ $q = +1/3$	<b>ANTI-TAUON</b>  $m = 1777 \text{ MeV}/c^2$ $q = +1$	<b>TAU-ANTINEUTRINO</b>  $m < 0,000\ 002 \text{ MeV}/c^2$ $q = 0$

Zu jeder Materieteilchensorte gibt es eine Antiteilchensorte mit gleicher Masse und entgegengesetzten Ladungen.

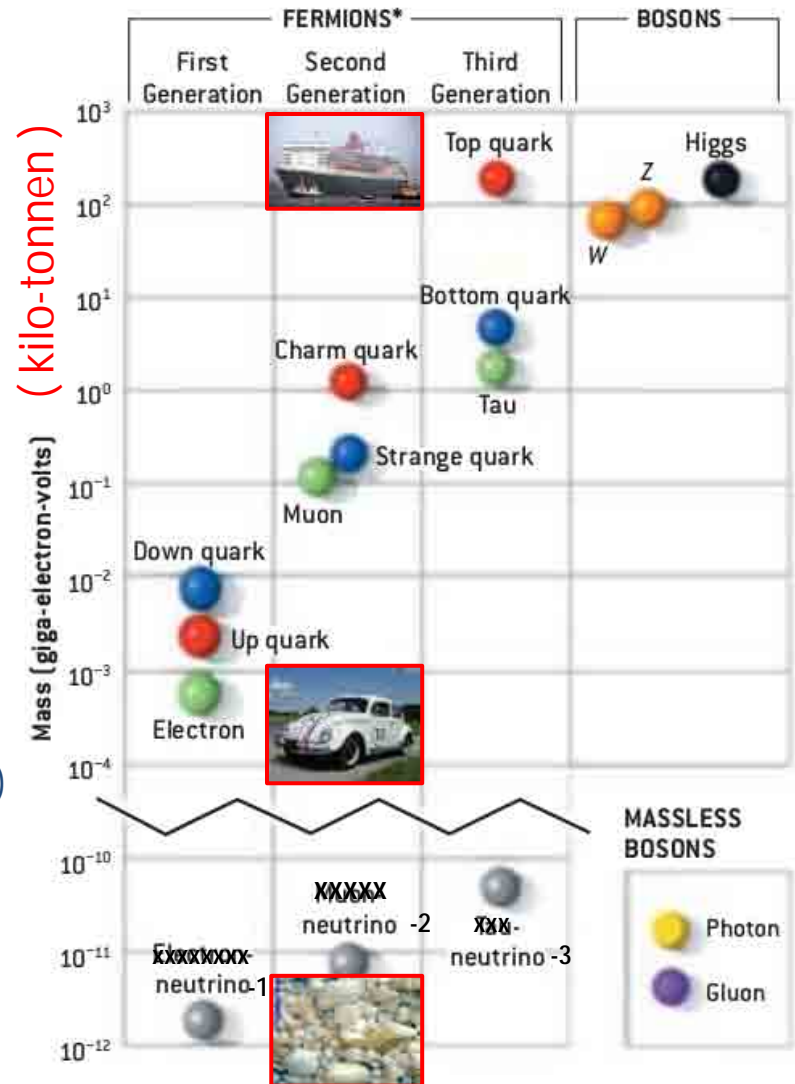
# Standardmodell = Elementare Bausteine ?



1. Elementare Bausteine sind eine **herausragende experimentelle Erkenntnis**  
- eine weitere Substruktur ist „so gut wie“ ausgeschlossen !
2. Aber: sind **nicht die theoretische Grundidee** des Standardmodells  
- Anordnung weder vorhergesagt, noch bisher nachträglich verstanden !
3. Bergen außerdem Gefahr des reines Auswendiglernens
4. Die Elementarteilchen sind die „Spieler“ in einer Welt, in der sich die „Spielregeln“ = Wechselwirkungen aus Symmetrien herleiten lassen

# Die Massen der Elementarteilchen...

- ...überdecken 14(!) Größenordnungen
  - $n$  ~ Sandkorn
  - $e$  ~ Auto
  - $t$  ~ Ozeandampfer
- ... sind eine Eigenschaft von
  - Teilchen ohne Unterstruktur (ziemlich sicher für Fermionen)
  - d.h. sind keine Frage von „Größe“
- ... haben ein charakteristisches Muster
  - In bezug auf Familien (auch: „Generationen“)
  - In bezug auf Neutrinos (~  $10^{10}$  mal leichter als ihre Partner)
- Warum? → Higgs ? (später)



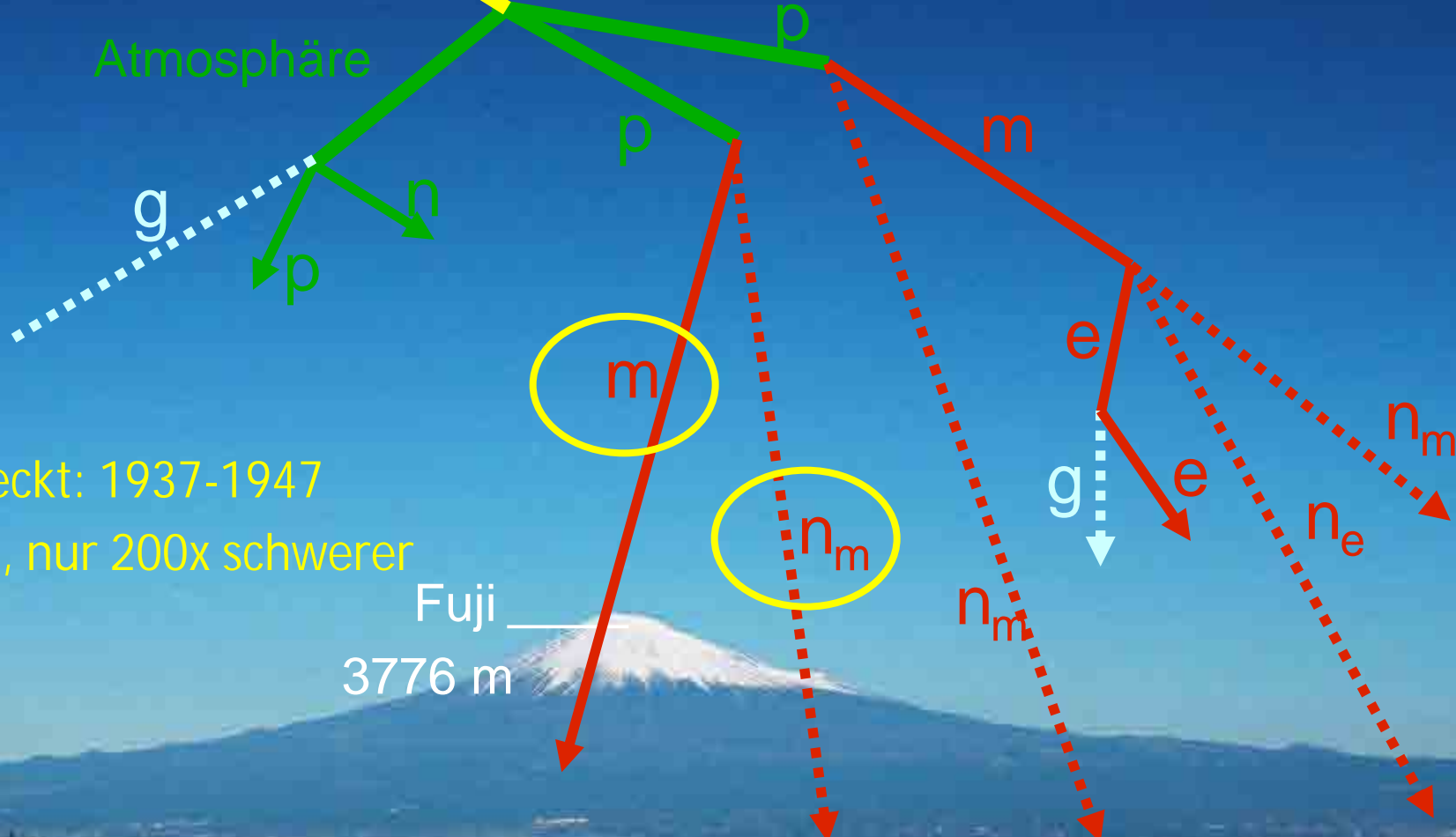
The Dawn of Physics Beyond the Standard Model, by Gordon Kane, Scientific American, June 2003

# Beispiel für zweite Teilchen-Familie: Myon

$p, He, \dots$

primäres Teilchen trifft auf  
Atmosphäre: 15 – 30 km Höhe

Atmosphäre



Entdeckt: 1937-1947  
wie e, nur 200x schwerer

Fuji  
3776 m

# Kosmische Myonen im Netzwerk Teilchenwelt



- Zwei Experimente zum Nachweis kosmischer Myonen: Kamiokanne und Szintillationszähler
  - Zur Ausleihe nach vorheriger Fortbildung
  - Geeignet für Projektwochen und kleinere Gruppen
- [www.teilchenwelt.de/angebote/astroteilchen-experimente](http://www.teilchenwelt.de/angebote/astroteilchen-experimente)

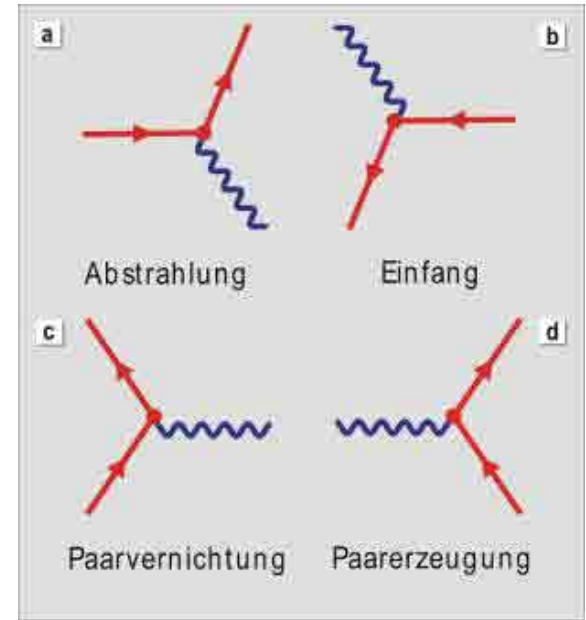
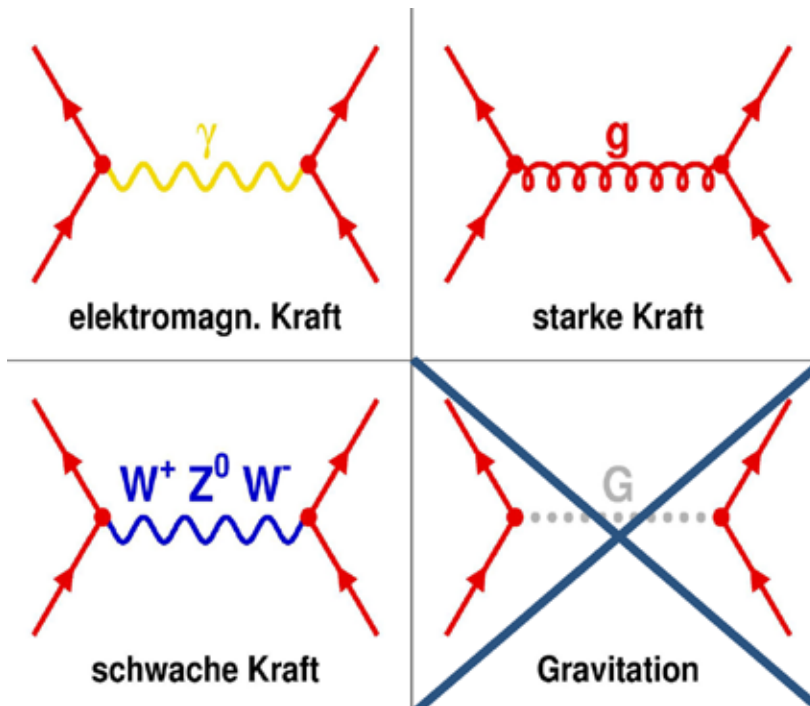


# Heutiges "Standardmodell" der Teilchenphysik (1961-73)

- Fundamentale Wechselwirkungen zwischen Teilchen
  - erfordern Botenteilchen (Austauschteilchen)
  - sind aus Symmetrien ableitbar !!
- Bausteine der Welt
  - Träger von Ladungen
  - Spielen nach Regeln der entsprechenden Wechselwirkungen
- Massenmechanismus
  - Symmetrien verbieten Teilchenmassen !!
  - Herkunft der Teilchenmassen noch unbekannt
  - Hypothese: "Higgsmechanismus", Nachweis: Higgs-Teilchen
- Errungenschaft des Standardmodells
  - beschreibt \*alle\* bekannten Prozesse
  - Ist (derzeit) DIE grundlegende Theorie der Physik

# Eindeutige Vorhersagen

- Theorievorhersage:
  - **Eindeutiges** Set von fundamentalen "Vertices" für jede Wechselwirkung
  - Bilden Grundlage von Feynman-Diagrammen zur Beschreibung von Reaktionen, die auf Abständen  $\ll$  fm ablaufen
  - **Alle Prozesse sind Kombination** solch fundamentaler Vertices
  - **Andere Prozesse können nicht stattfinden !**



Zeit  $\rightarrow$


- z.B. Beta"zerfall" des Neutrons



Anm: Pfeilrichtung  $\beta$  symbolisiert Antiteilchen  
Es läuft trotzdem in der Zeit nach rechts



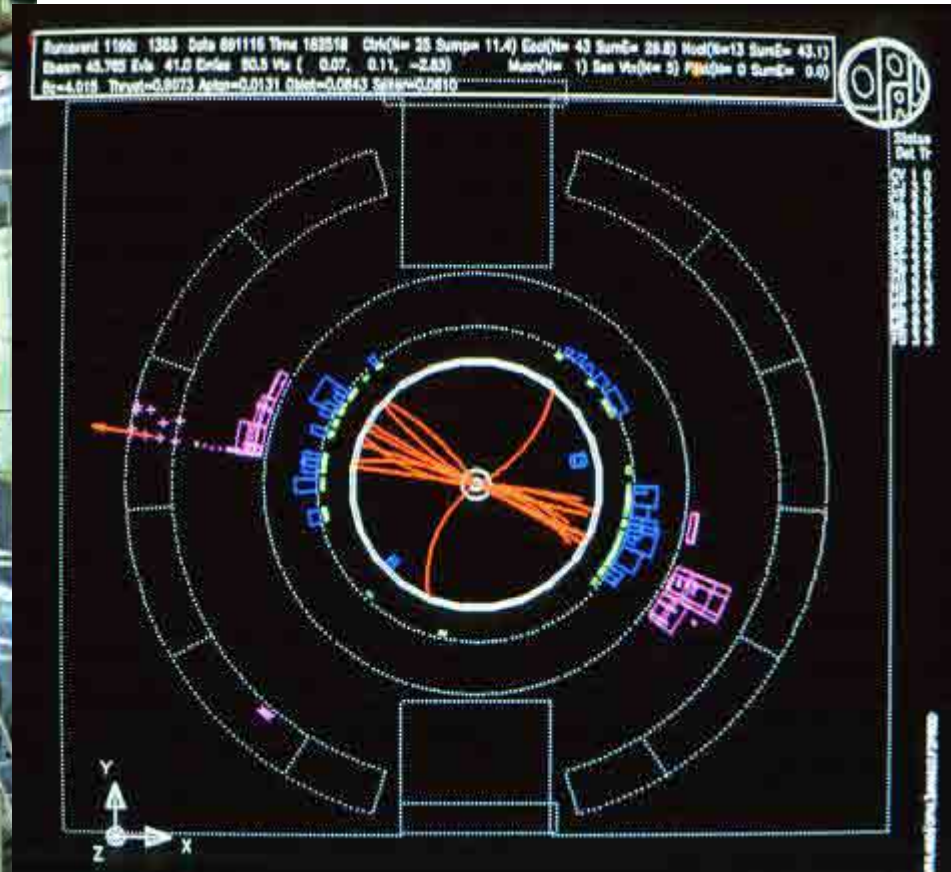
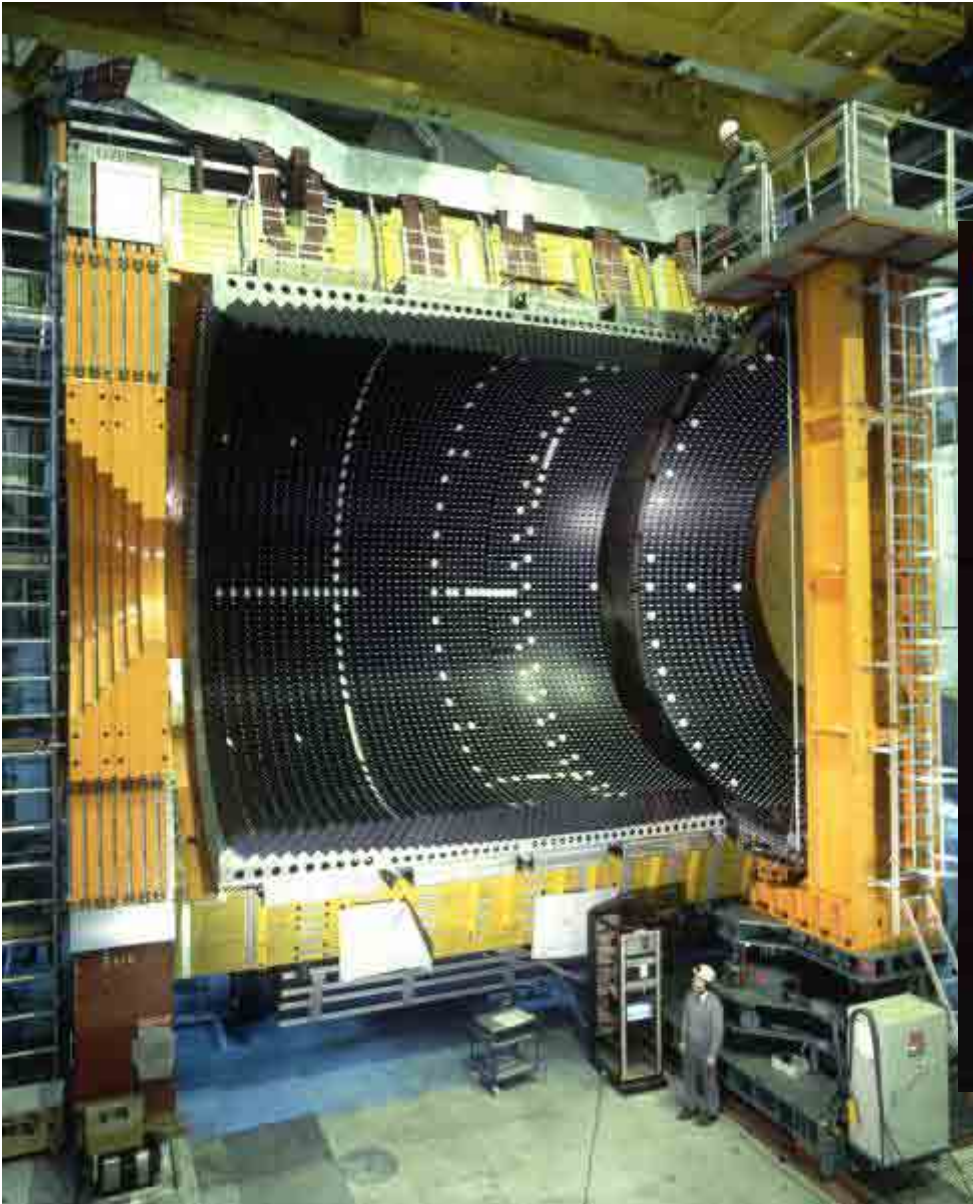
# Beispiel: Kalium 40

- Instabiles Isotop mit 40 Nukleonen (19 Protonen und 21 Neutronen)
- Zerfällt durch den Beta-minus- oder Beta-pluszerfall mit Halbwertszeit von 1,28 Mrd. Jahren
- für den menschlichen Körper lebensnotwendig:
  - Regelt als Mineralstoff Wassergehalt in den Zellen
  - Wichtiger Elektrolyt der Körperflüssigkeit.
  - Ca jedes 9000ste Kaliumatomder ca. 100-150g Kalium in unserem Körper ist Kalium-40.
- Animation:   
potassium.swf
- Aufgabe für Jugendliche:
  - Mit wie vielen Neutrinos pro Sekunde bestrahlen sie ihre/n Nachbar/in ?

# Die Augen der Teilchenphysik: Detektoren



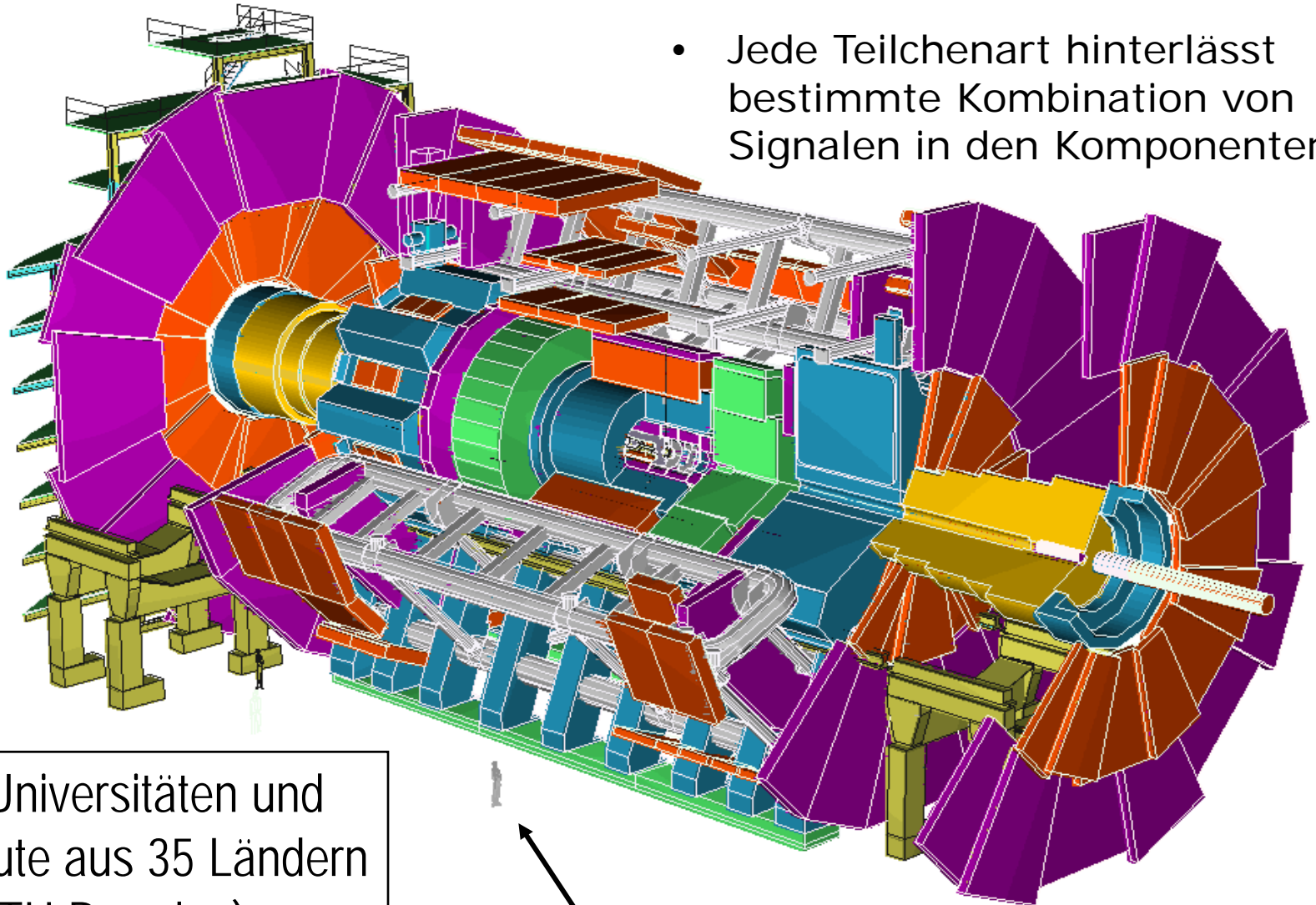
CERN, Genf,  
bis 2000



Elektronische Bilder

# Aktivität heute : ATLAS Experiment, LHC

- Jede Teilchenart hinterlässt bestimmte Kombination von Signalen in den Komponenten

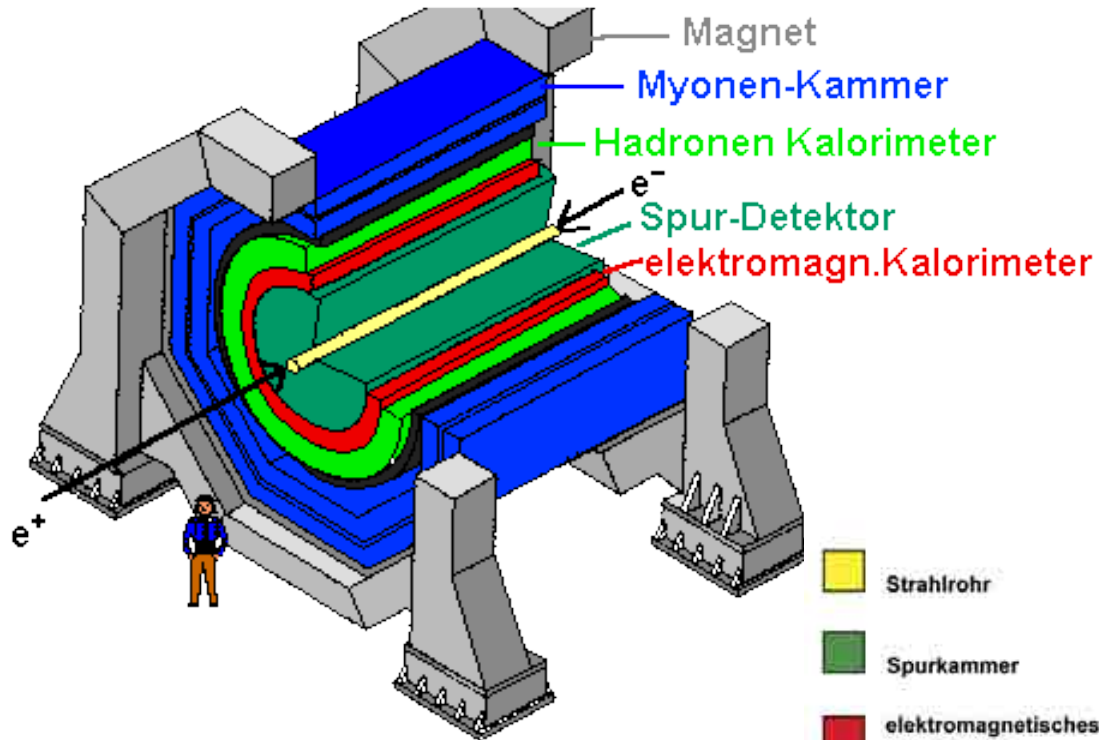


170 Universitäten und Institute aus 35 Ländern (u.a. TU Dresden)

Größenvergleich

- Zwiebelschalenartiger Aufbau verschiedener Komponenten

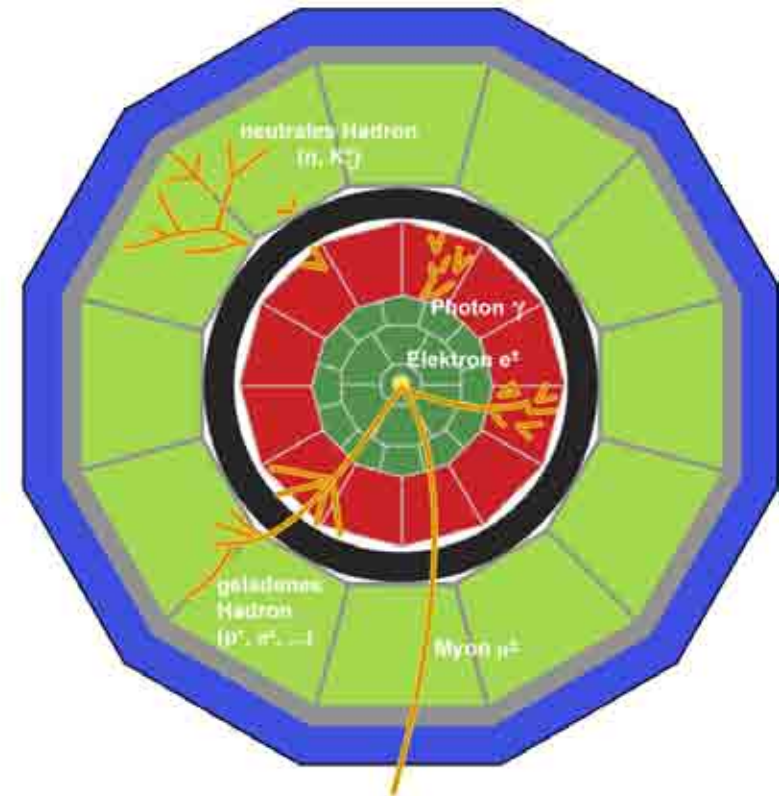
# Teilchenidentifikation



-  Strahlrohr
-  Spurkammer
-  elektromagnetisches Kalorimeter
-  magnetische Spule
-  hadronisches Kalorimeter
-  magnetisches Eisen
-  Myonen-Kammer

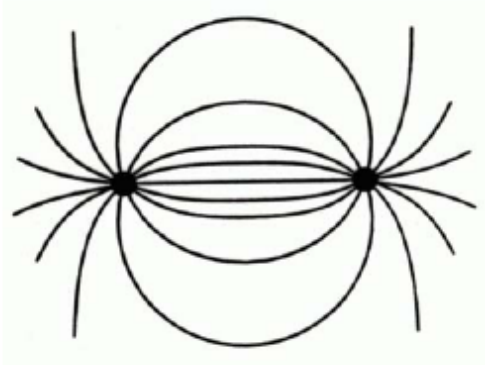
- feststellbare Teilcheneigenschaften:
  - aus Quarks („Hadronen“)
  - elektr. geladen / ungeladen
  - leicht / schwer

- Zwiebelschalenartiger Aufbau verschiedener Komponenten
- Jede Teilchenart hinterlässt bestimmte Kombination von Signalen in den Komponenten



# Confinement

QED



Feldlinien eines elektrischen Dipols reichen ins Unendliche

QCD

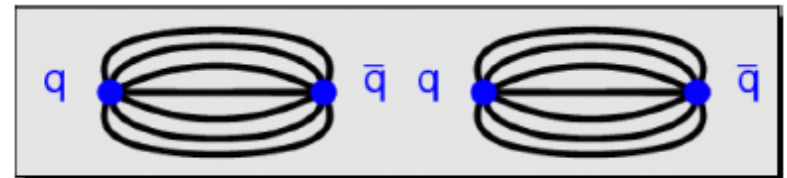


Feldlinien eines Farbdipols bilden einen engen Flussschlauch  
Grund: Selbstkopplung der Gluonen

Die Feldenergie des Farbdipols wächst proportional zur Länge:

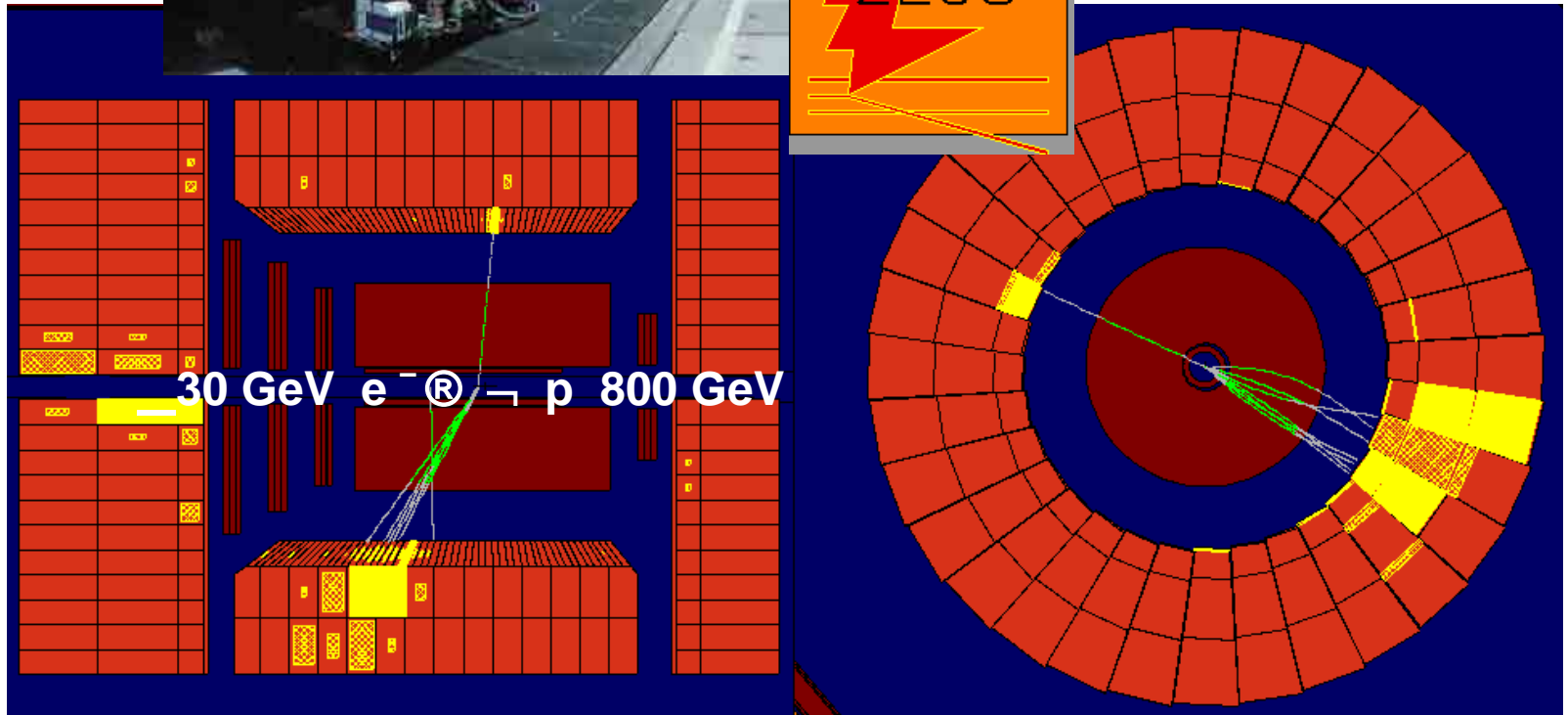
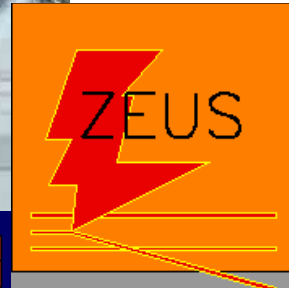
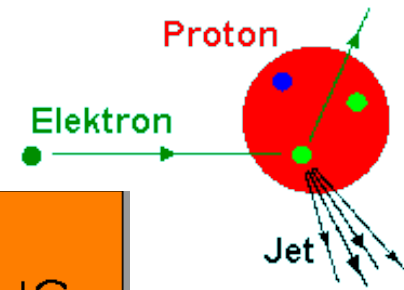
$$V(x) = k \cdot x \quad \text{mit} \quad k \approx 1 \text{ GeV} / \text{fm}$$

Bei Abständen von  $x > 1 \text{ fm}$  ist es energetisch günstiger neue Quark-Antiquark-Paare zu bilden, als das Farbfeld weiter in die Länge zu ziehen.



# Einzelne Quarks ergeben „Hadronen“ Jets

- e-p Kollisionen bei HERA am DESY



# Innerste Lage: Spurdetektoren

- Früher z.B: Blasenkammern, Nebelkammern  
manuelle und visuelle Rekonstruktion
- Heute:  
digital auslesbar
- Messung des  
Impulses über  
Spurkrümmung  $r$   
im B-Feld



$$p = Q e r B$$

$$p(\text{GeV}/c) = 0.3 Q r(\text{m}) B(\text{T})$$



# Materialien vom Netzwerk Teilchenwelt

- Anleitung zum Bau einer einfachen Nebelkammer



**BAU EINER NEBELKAMMER**  
TEILCHENSPIELER SICH BAR MACHEN

Ähnlich wie bei der Teilchenwelt sind die Teilchen auf die Erde. Über die Teilchenwelt sind die Teilchen durch eine Nebelkammer sichtbar, indem wir sie nicht sehen oder sehen. Eine Nebelkammer macht die kleinsten Teilchen sichtbar.

**MATERIALLISTE UND BAUPLAN**

- 1) Glasplatte (Kunststoff) von Größe
- 2) Filzmatte (z.B. 10x10cm)
- 3) Klebstoff
- 4) Kleber (Klebstoff)
- 5) Kleber
- 6) Kleber

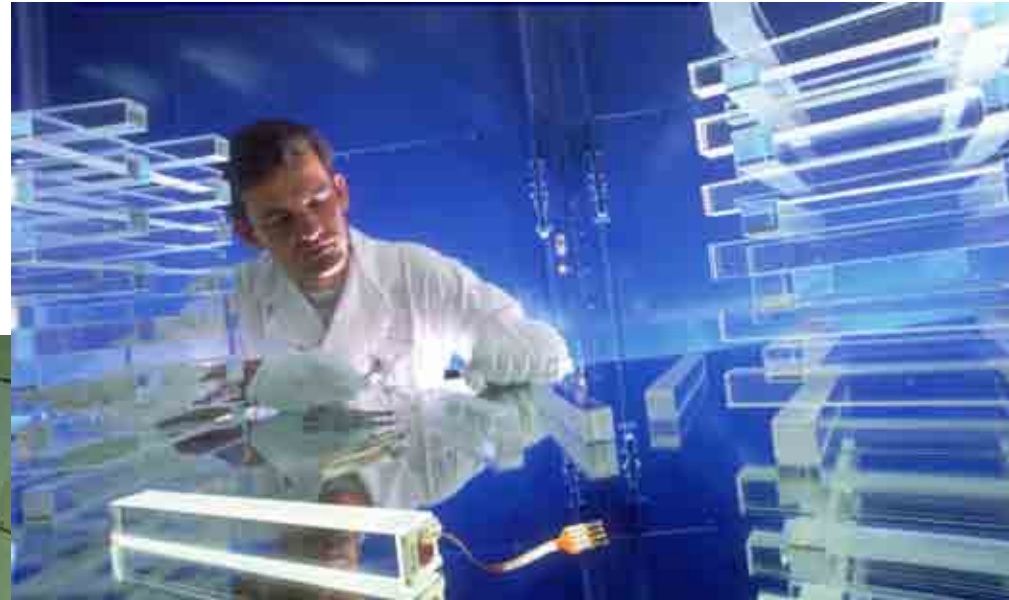
Kleber (Klebstoff) ist ein Kleber (Klebstoff) Kleber (Klebstoff) ist ein Kleber (Klebstoff)

- à Anleitung und Hintergrundinfos online verfügbar,  
[www.teilchenwelt.de/material/materialien-fuer-lehrkraefte/selbstbau-einer-nebelkammer](http://www.teilchenwelt.de/material/materialien-fuer-lehrkraefte/selbstbau-einer-nebelkammer)
- à 10 Nebelkammersets in Dresden ausleihbar



# Nächste Lage: Elektromagnetisches Kalorimet

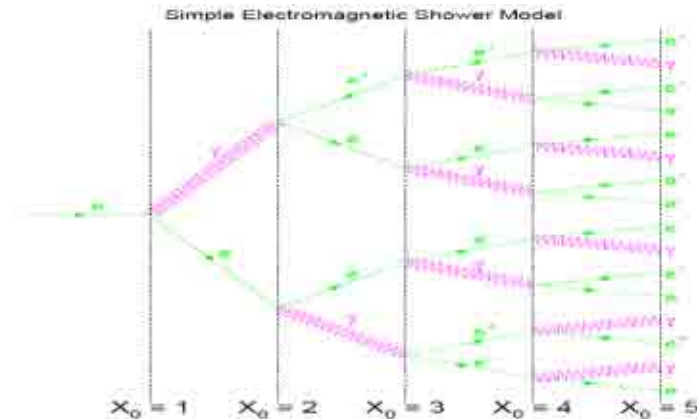
- Elektromagnetischer Schauer:
  - Entsteht bei \*leichten\* Teilchen über elektromag. Wechselwirkung
  - $\rightarrow$  e und  $\gamma$  geben hier ihre gesamte Energie ab



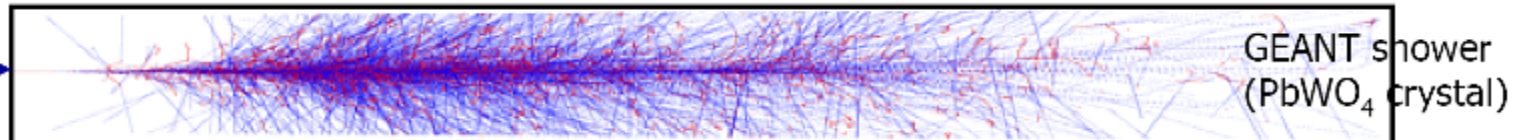
107

Wolfgang Funk - CERN CMS

8



e

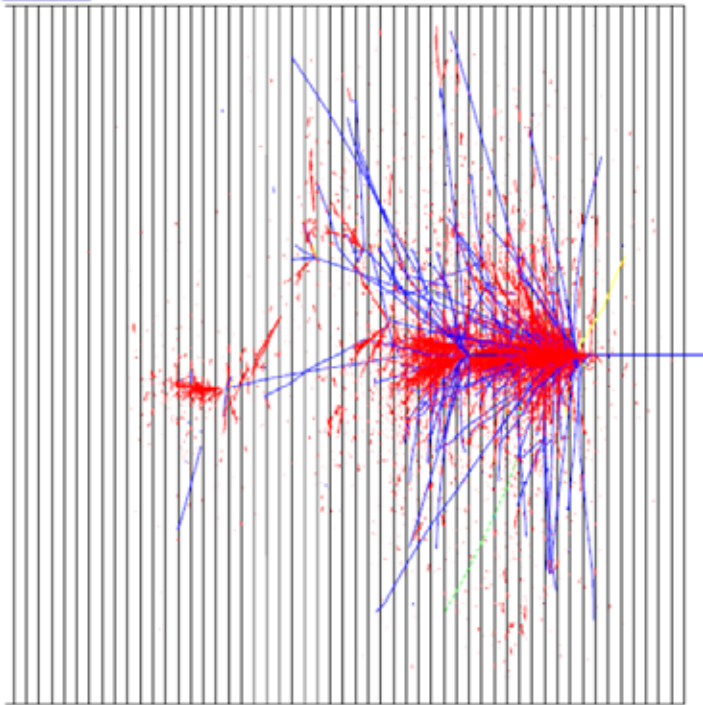


# Nächste Lage: Hadronische Kalorimeter

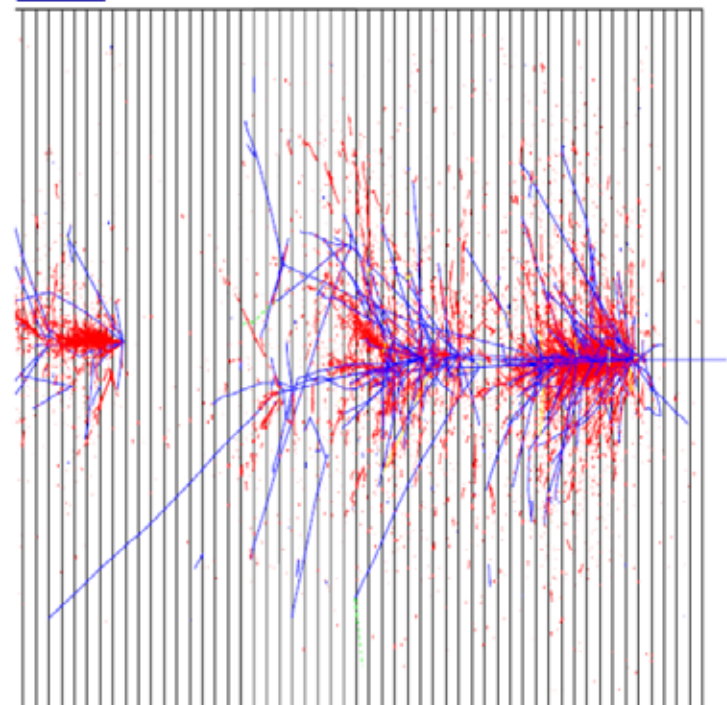
- Hadronische Schauer

- Nur bei Hadronen, d.h. Teilchen aus (Anti-)Quarks die mit den Atomkernen im Kalorimeter stark wechselwirken können
- **Hadronische (Ionisation)** und **Elektromagnetische** ( $p^0 \rightarrow \gamma\gamma$ ) Komponente
- wesentlich unregelmäßiger als elektromagnetischer Schauer

1.

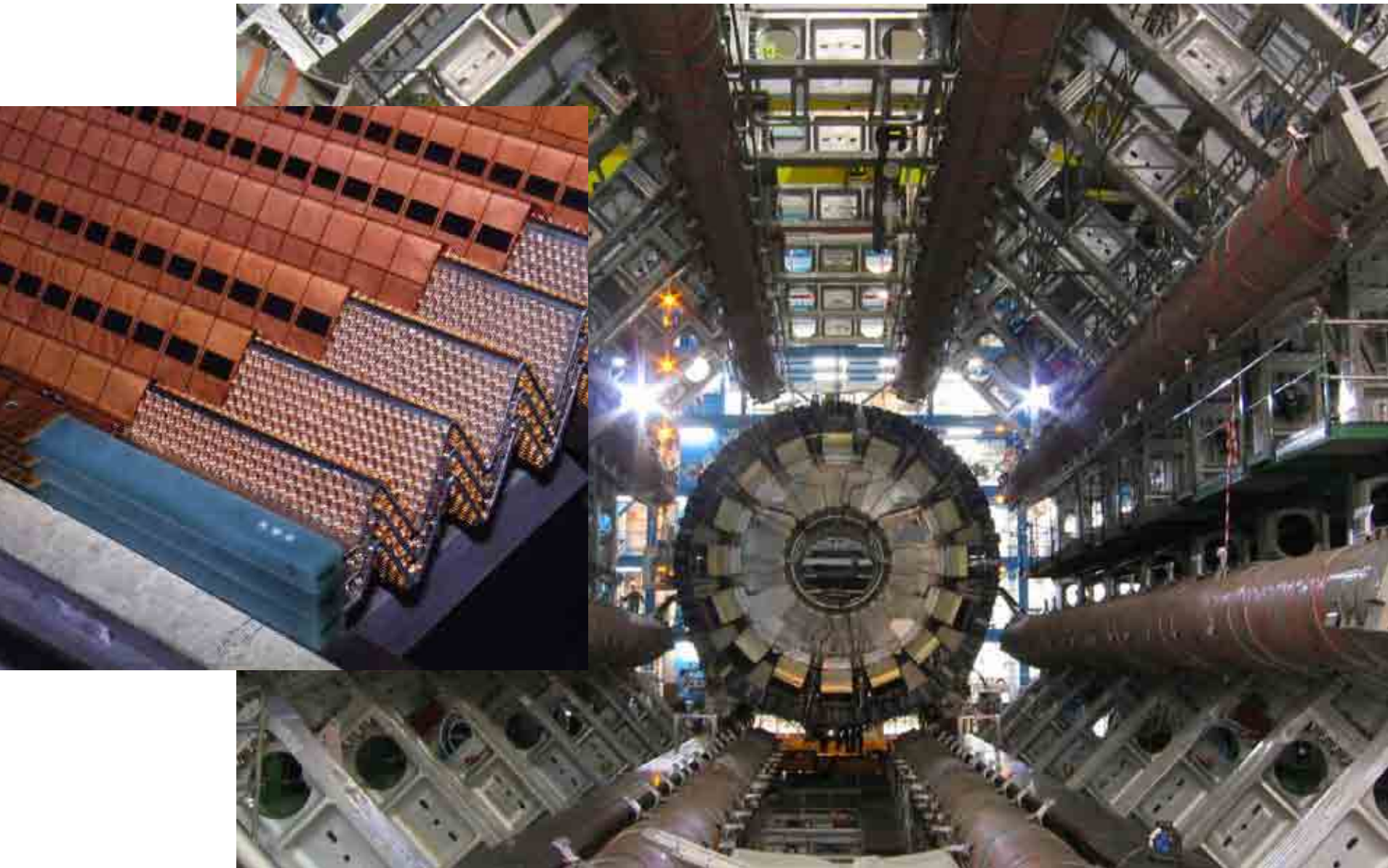


2.

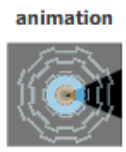


red - e.m. component  
blue - charged hadrons

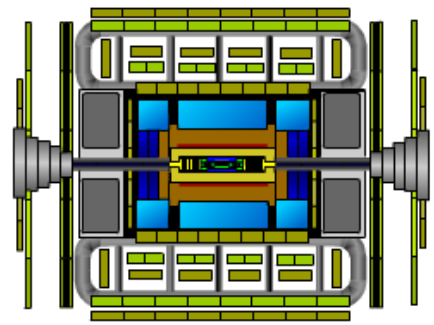
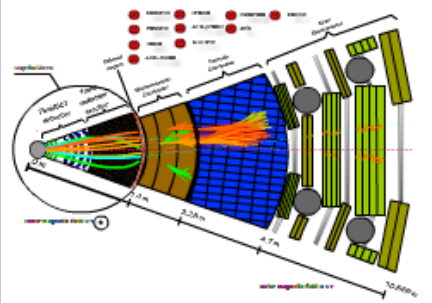
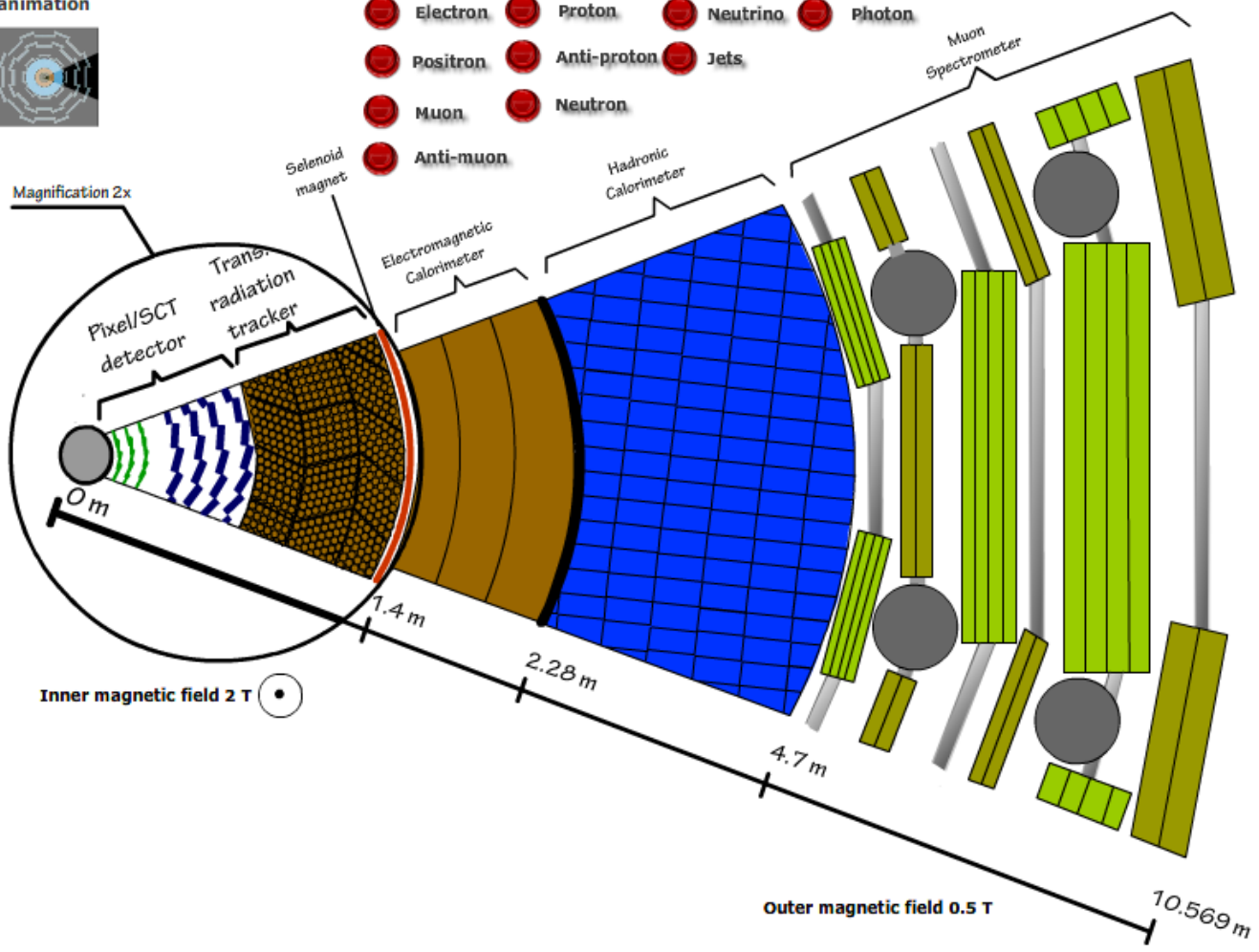
- Das ATLAS Flüssig-Argon Calorimeter: "Akkordeon"



# ATLAS



- Electron
- Proton
- Neutrino
- Photon
- Positron
- Anti-proton
- Jets
- Muon
- Neutron
- Anti-muon



Created by Jeřábek, Jende 2010



Atlas\_9.swf

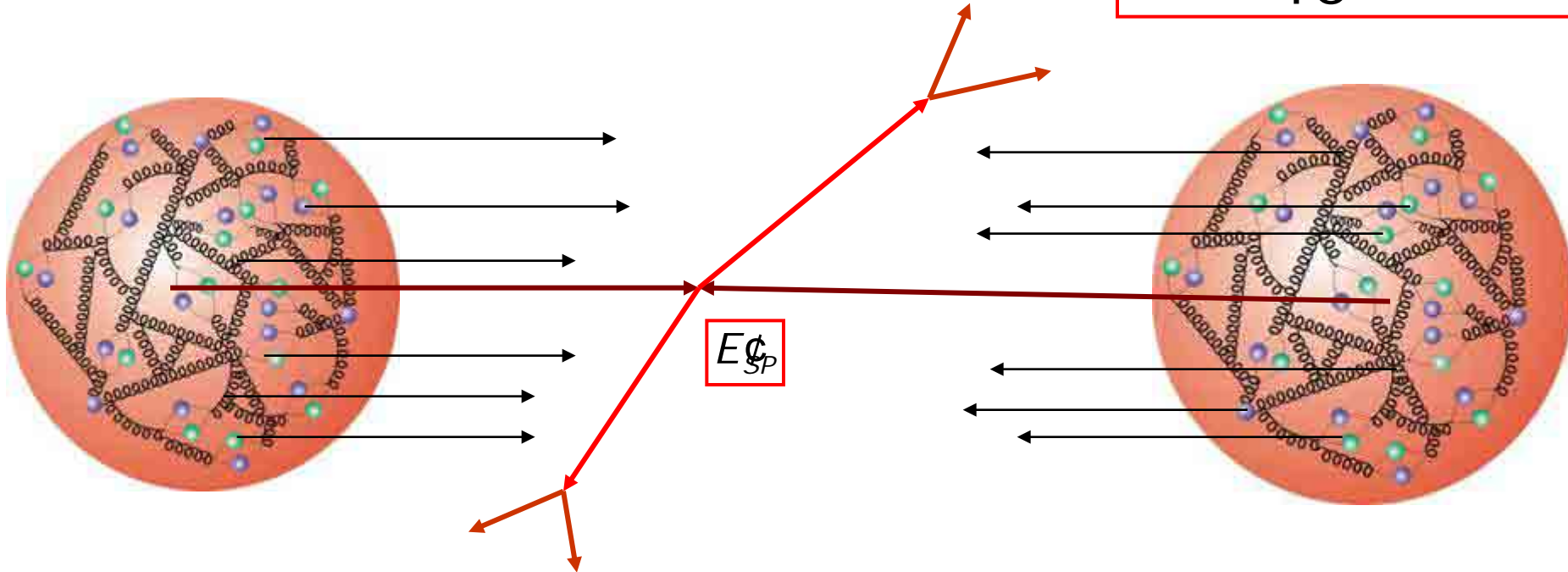
[https://kjende.web.cern.ch/kjende/de/wpath\\_teilchenid1.htm](https://kjende.web.cern.ch/kjende/de/wpath_teilchenid1.htm)

# Was kollidiert da eigentlich?

Wechselwirkung nur von Bruchteilen des Protons (Partonen: Quarks und Gluonen)

**Schwerpunktsenergie** der kollidierenden Partonen (q, g)

$$E_{SP} \gg \frac{1}{10} E_{SP}(pp)$$

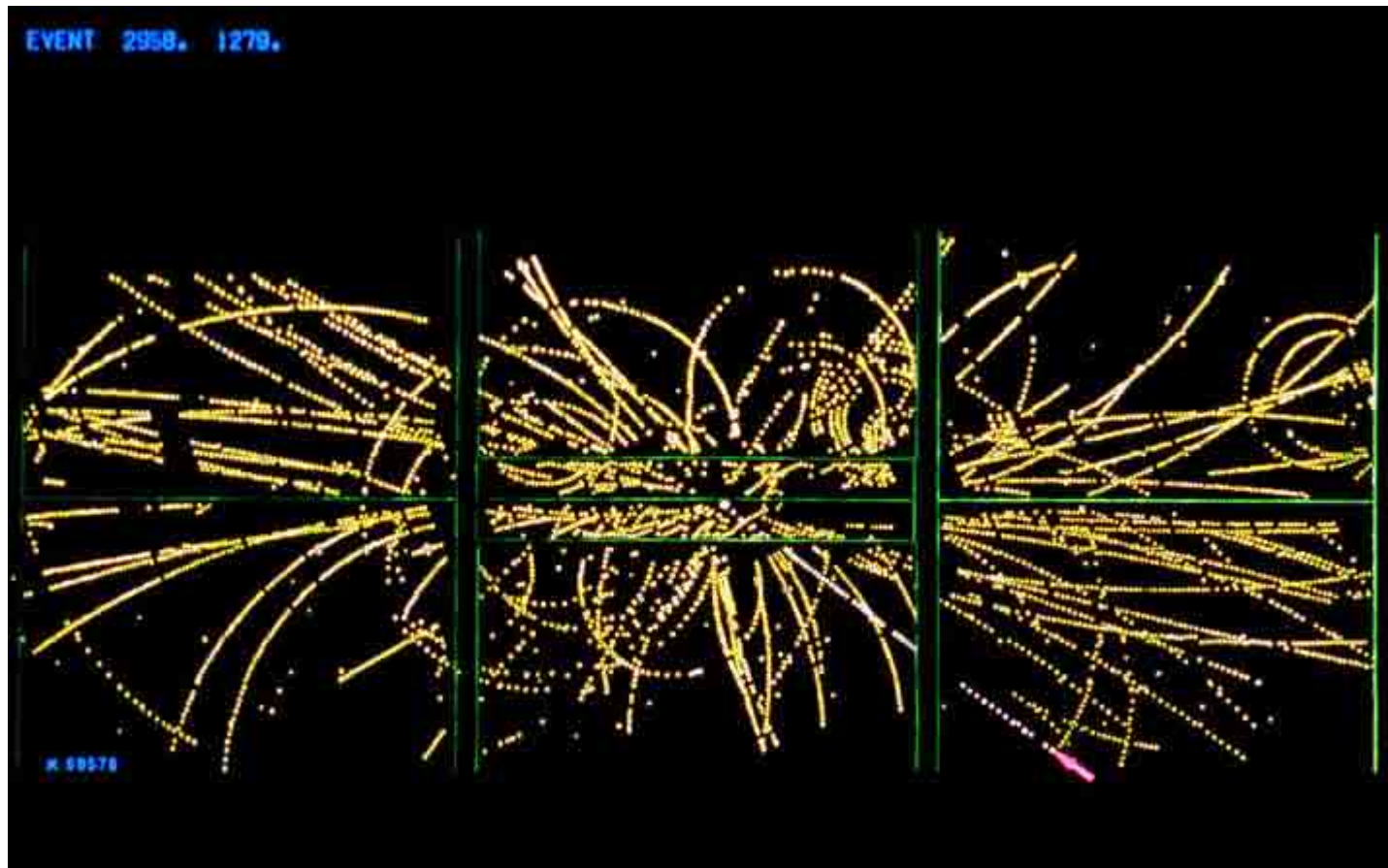


**Neue Teilchen** mit Massen bis zu  $\sim 1$  TeV (ca. 1000 Protonmassen) erzeugbar

# Die Entdeckung des W

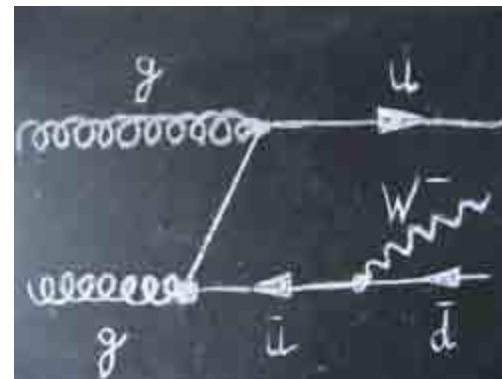
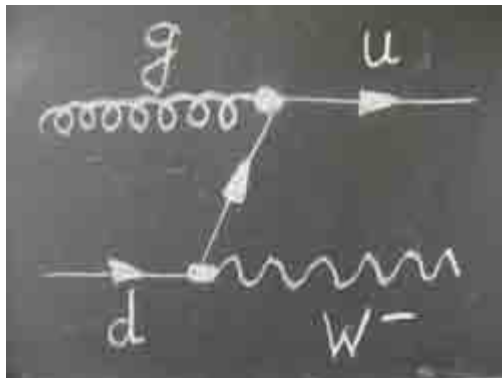
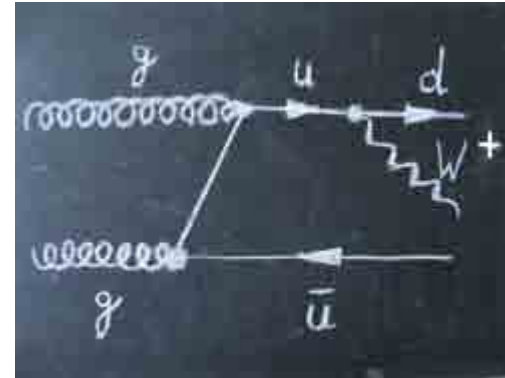
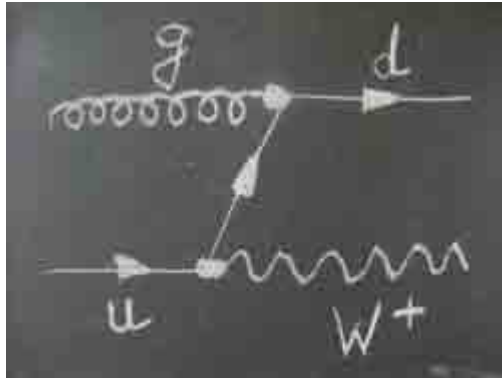
1983 am Super-Antiproton-Proton Synchrotron (S<sup>-</sup> ppS) am CERN

- Erstes Ereignis  $\bar{p}p \rightarrow W + \dots \rightarrow e\nu + \dots$
- Das Elektron ist durch den roten Pfeil gekennzeichnet
- Das Neutrino wird durch fehlenden Transversalimpuls (Summe aller Spuren!) indirekt nachgewiesen



# Mögliche Herstellung am LHC

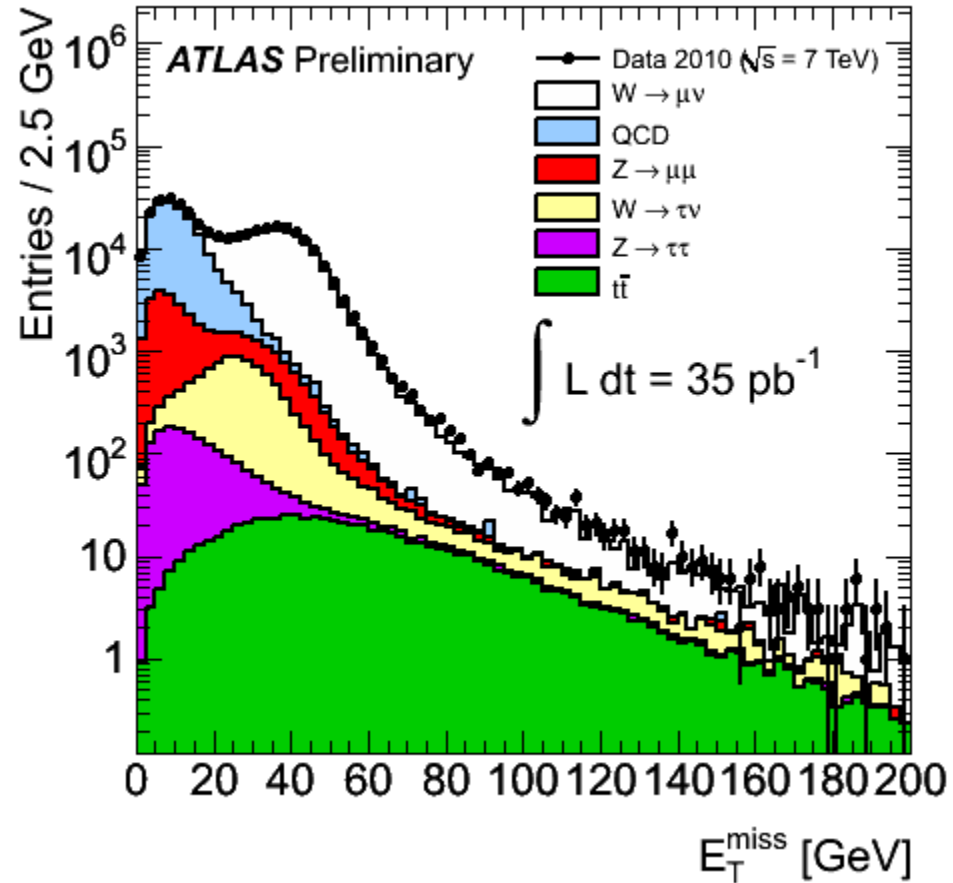
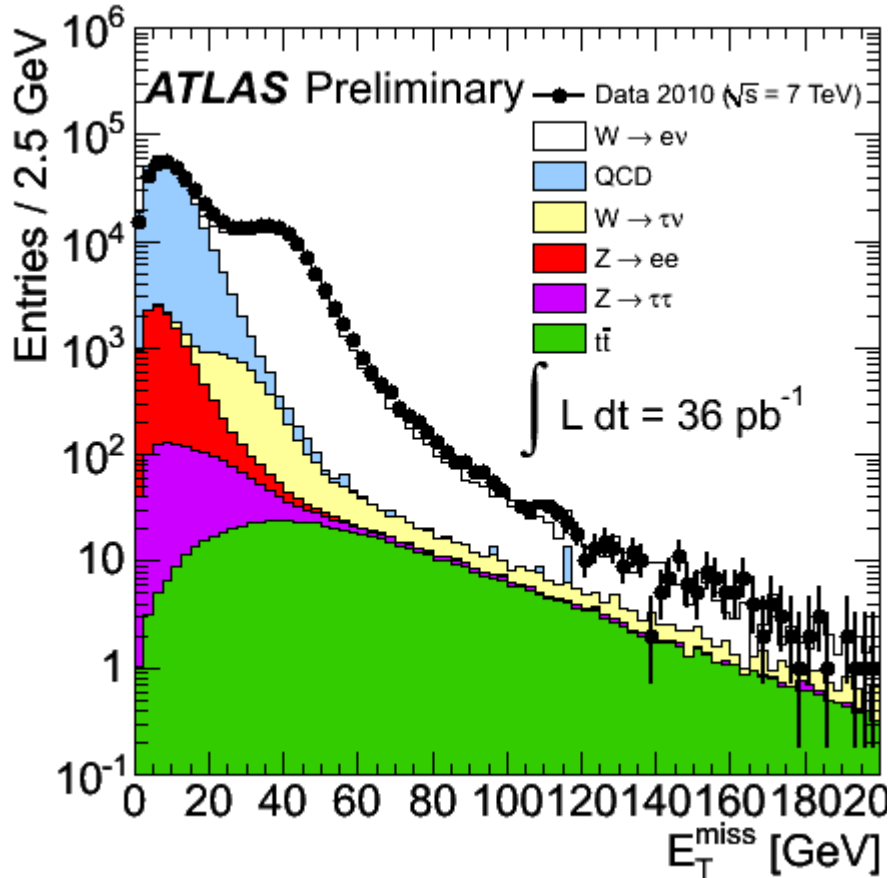
- Entweder durch Gluon-Quark oder Gluon-Gluon



- Aus den auslaufenden Quarks entstehen Jets

# Charakteristik

fehlender Impuls durch Neutrinos senkrecht zum Strahl:  $\vec{p}_T^{\text{miss}}$   
 Definition: fehlende „transversale“ Energie:  $E_T^{\text{miss}} := |\vec{p}_T^{\text{miss}}|c$



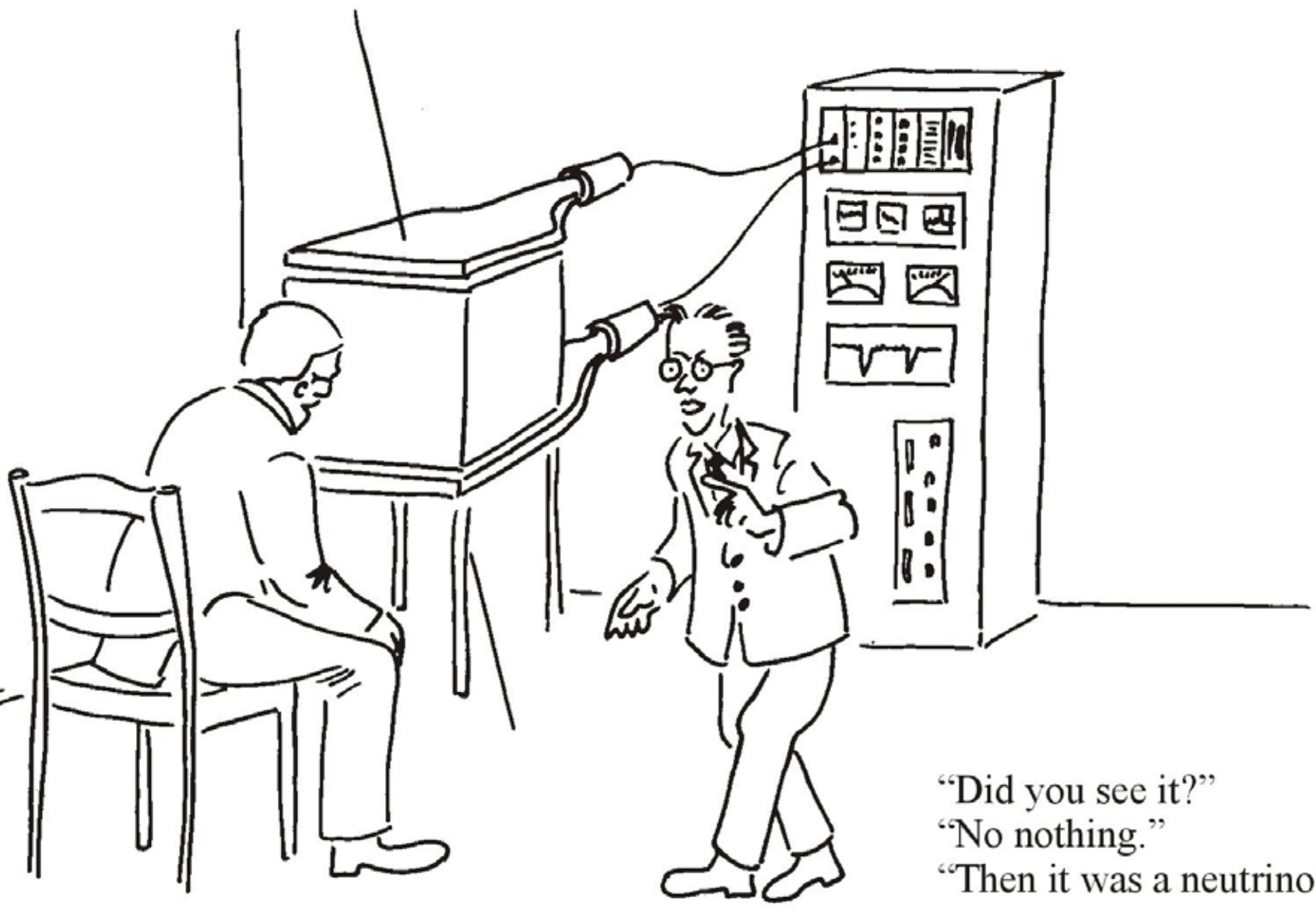
sichtbar: elektrisch geladenes Lepton

W → eν

W → μν

aber trotzdem immer vorhanden: „**Signal**“ und „**Untergrund**“



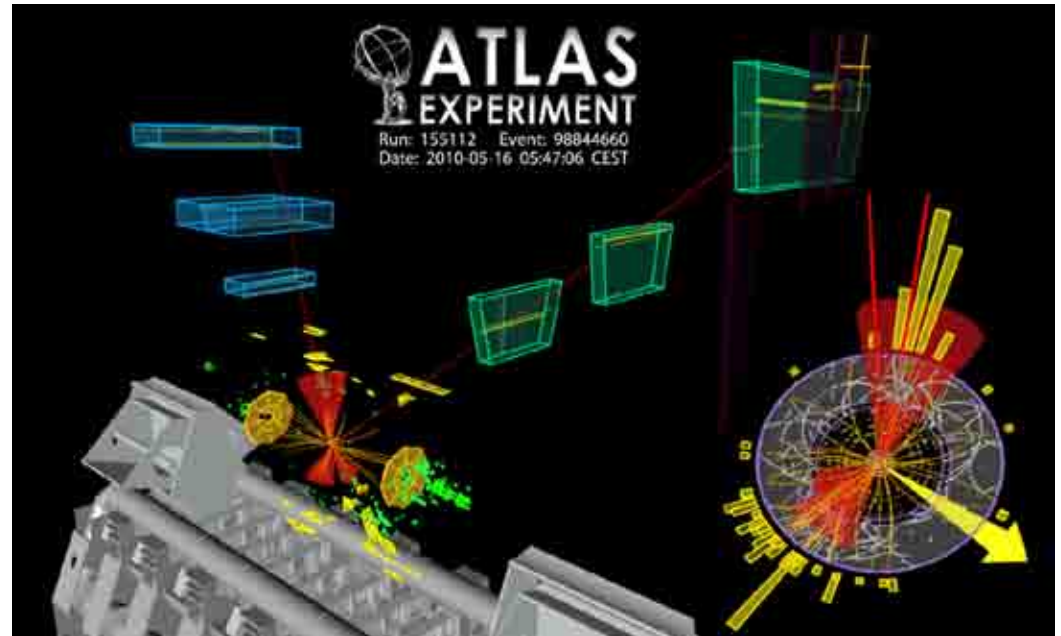
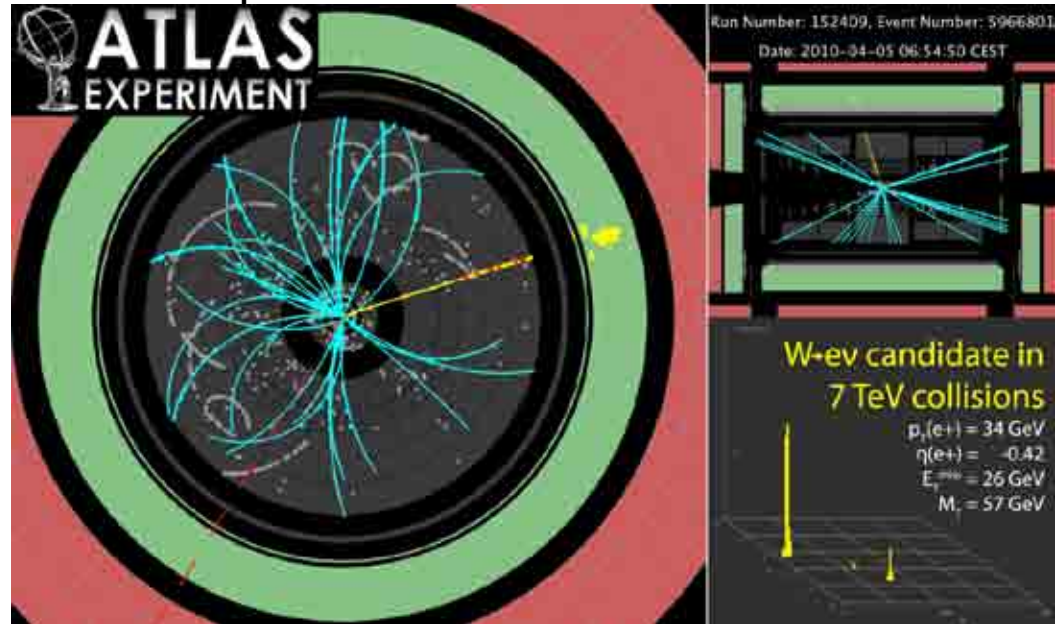
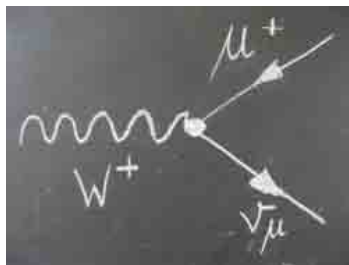
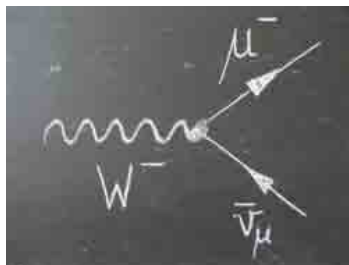
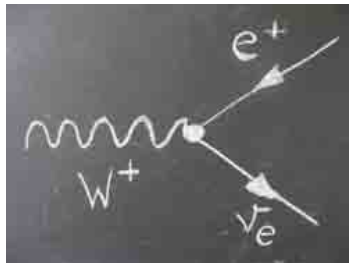
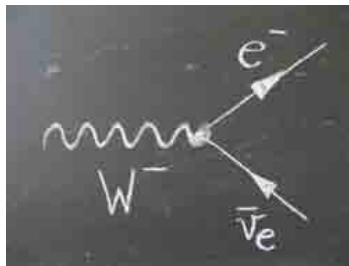


C. G. G. G.

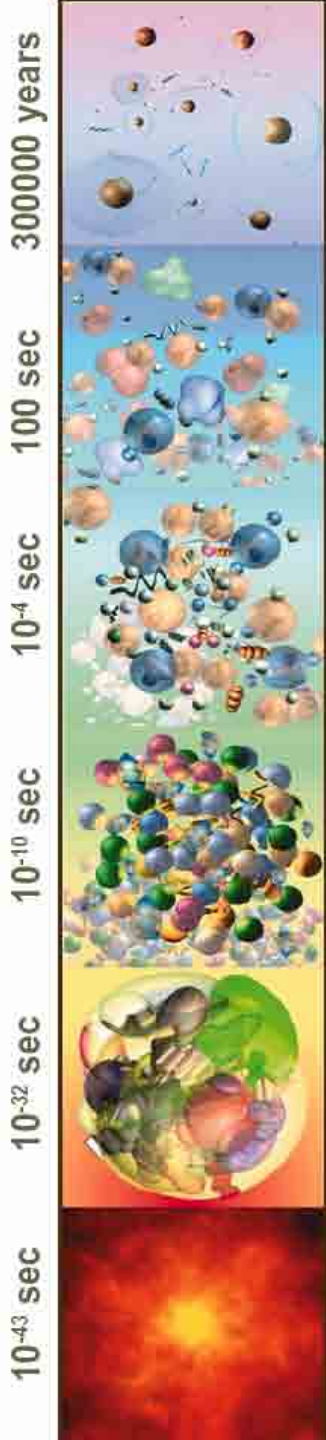
“Did you see it?”  
“No nothing.”  
“Then it was a neutrino!”

# Signaturen des W-Teilchens

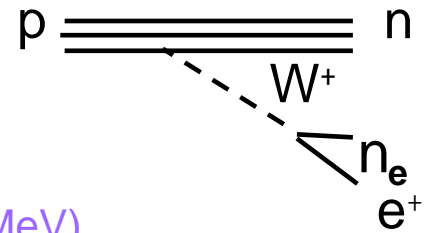
- Am einfachsten zu sehen :  $e\nu$  und  $\mu\nu$



# Massen der Teilchen



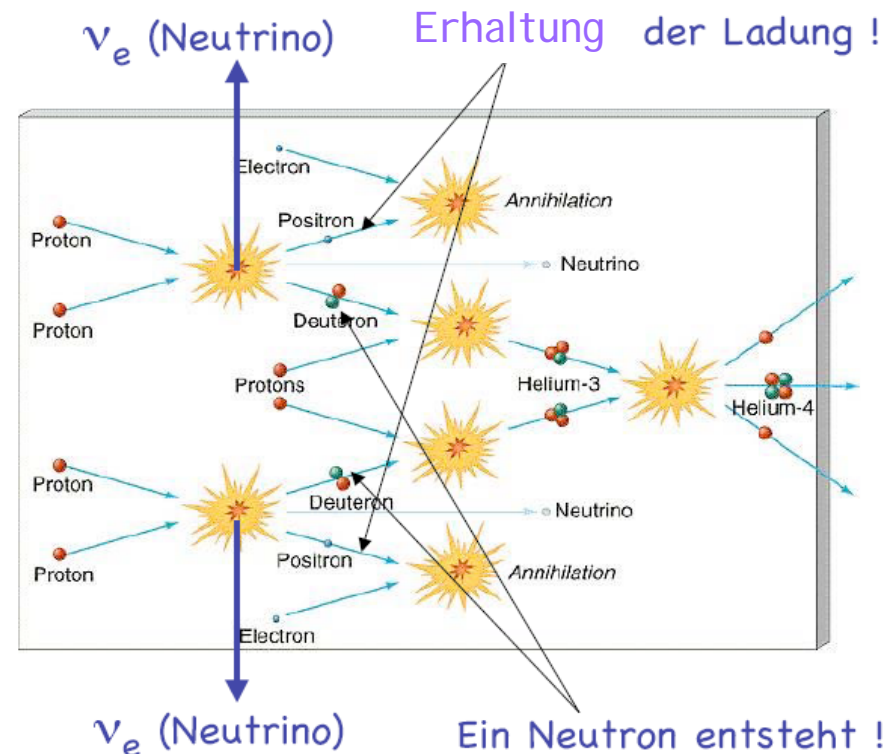
- Unter Benützung experimenteller Teilchenmassen beschreibt Theorie der schwachen Kraft alles, z.B.
- langsames Brennen der Sonne
  - $p + p \rightarrow D + e^+ + n$  (Energiegewinn:  $\Delta E = 0,9 \text{ MeV}$ )
  - Masse des Zwischenzustands  $m_W = 80400 \text{ MeV}$
  - Rate unterdrückt um  $\sim (\Delta E / m_W)^4 > 10^{-20}$



## Fundamentales Problem

(MeV)	Experim.	Theorie
$m_W$	<b>80400</b>	<b>0</b>
$m_Z$	<b>91200</b>	<b>0</b>
$m_e$	<b>0,5</b>	<b>0</b>
$m_t$	<b>173000</b>	<b>0</b>
...		

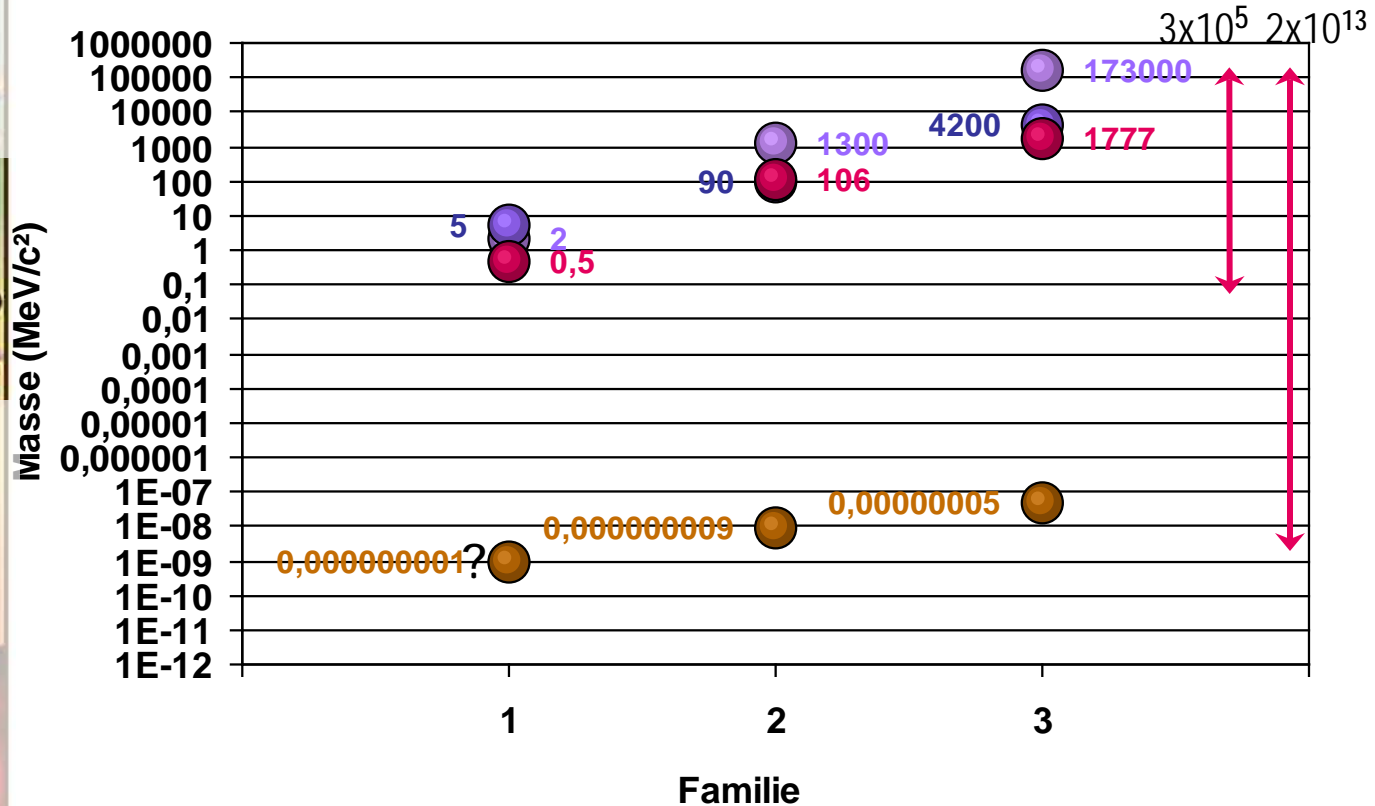
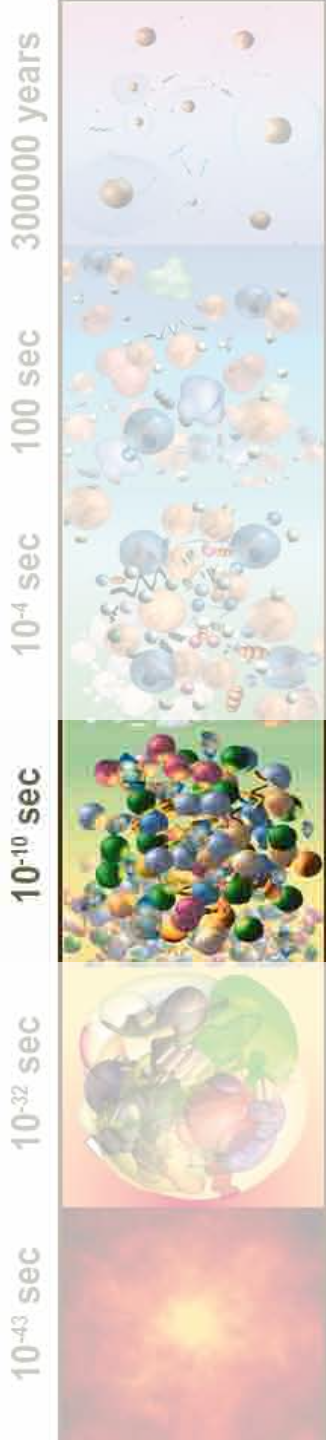
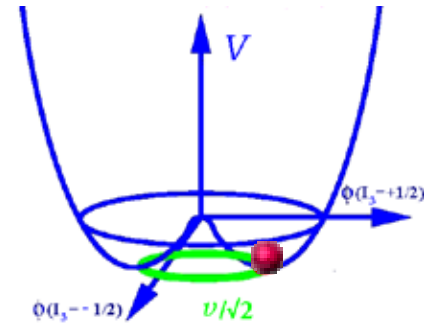
- Grund: schwache Eichsymmetrie



# Die Ruhemassen der Bausteine

## n Symmetrien erfordern masselose Teilchen

- Erhalten Masse erst  $\sim 10^{-12}$  sec nach Urknall durch „spontane“ Symmetriebrechung
- Entsteht Masse durch Kopplung an „Brout-Englert-Higgs“ Hintergrundfeld?
- Was verursacht die riesigen Massenunterschiede ?



- Up Typ
- Down Typ
- Lepton +/-
- Neutrino

# Bedeutung der Teilchenmassen

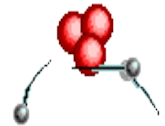
- Ⓜ **Beispiel: Elektron**
- Ⓜ Einfluss auf Größen- und Energieskala der Atome (Moleküle, Festkörper, Lebewesen, ...)

Elektronmasse (und WW-Stärke  $a_{em} = \frac{1}{137,0359991...}$ )  
regieren atomare **Energien** und **Radien**

- Ⓜ Bindungsenergie steigt mit  $m_e$

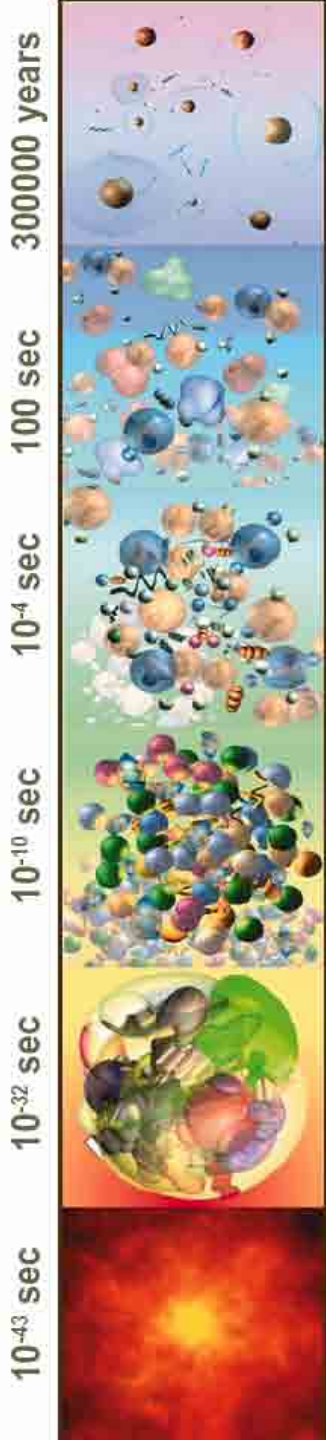
$$E_0(m_e) = -\frac{1}{2} Z^2 a_{em}^2 m_e$$

$$\text{H-Atom: } -\frac{1}{2} a_{em}^2 m_e = 13,6 \text{ eV}$$

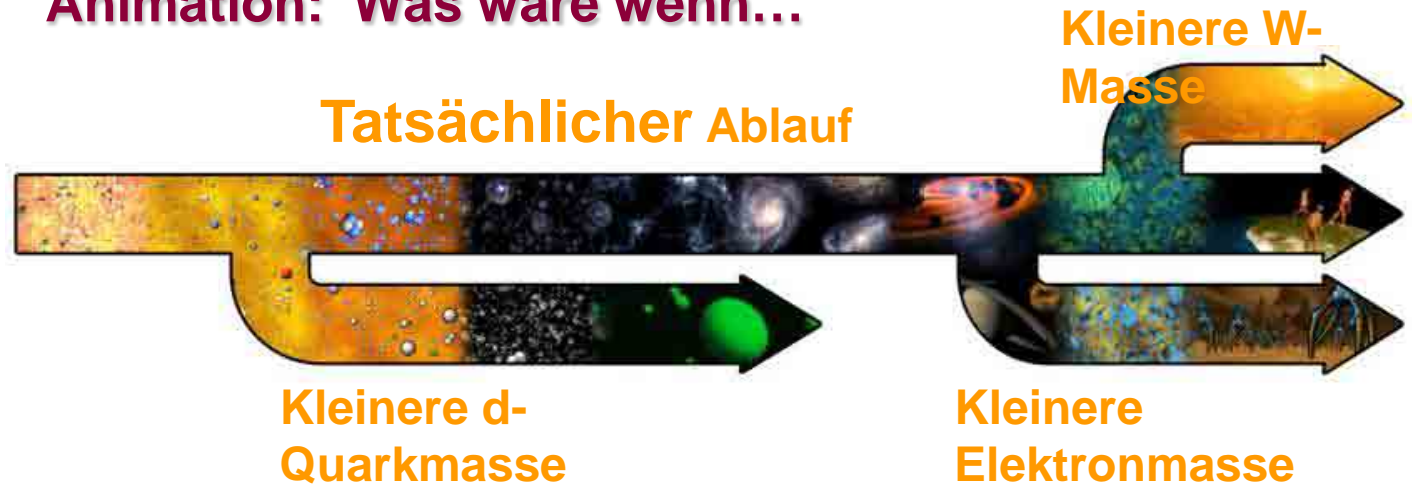
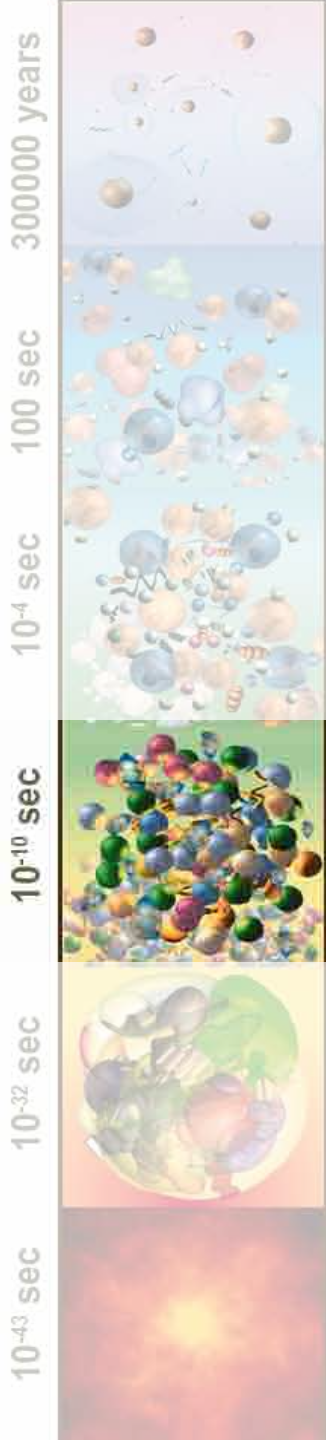


- Ⓜ Größe der Atomhülle (Bohr—Radius) fällt mit  $1 / m_e$

$$r_0(m_e) = \frac{1}{Z a_{em} m_e}$$



# Animation: Was wäre wenn...



View Online: [www.youtube.com/watch?v=p5cPg62z8xs](http://www.youtube.com/watch?v=p5cPg62z8xs)

Download: : [www.teilchenphysik.de/multimedia/informationmaterial/veranstaltungen](http://www.teilchenphysik.de/multimedia/informationmaterial/veranstaltungen)

- n Erst nachdem der LHC geklärt hat, wie Teilchenmassen überhaupt entstanden sind, wird man erforschen können, wie ihre Werte zustande kamen.
- n [http://prola.aps.org/abstract/RMP/v68/i3/p951\\_1](http://prola.aps.org/abstract/RMP/v68/i3/p951_1)  
R.N. Cahn, „The 18 arbitrary parameters of the standard model in your everyday life“(1996)
- n <http://arxiv.org/abs/hep-ph/9707380>  
V.Agrawal, S.M.Barr, J.F.Donoghue, D.Seckel,  
„The anthropic principle and the mass scale of the Standard Model“ (1997)
- n <http://arxiv.org/abs/astro-ph/9909295v2>  
C. Hogan, „Why the Universe is Just So“ (1999)
- n <http://arxiv.org/abs/0712.2968v1>  
Th Damour und J.F.Donoghue,  
„Constraints on the variability of quark masses from nuclear binding“ (2007)

# Was ist Masse?

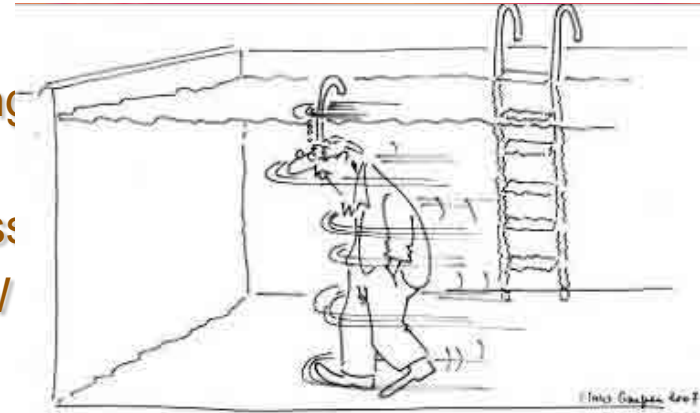
## “Leeres” Vakuum

- Alle Teilchen sind masselos
- bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit



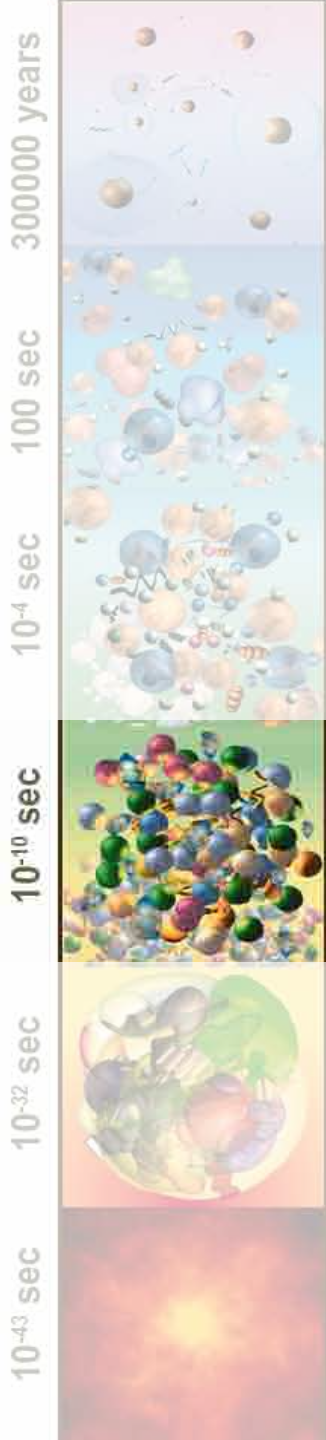
## Vakuum mit Hintergrundfeld

- Teilchen werden d. Wechselwirkung mit dem Feld verlangsamt
- Teilchen erhalten effektiv eine Masse
- Wert hängt von der Stärke der WW mit dem Hintergrundfeld ab



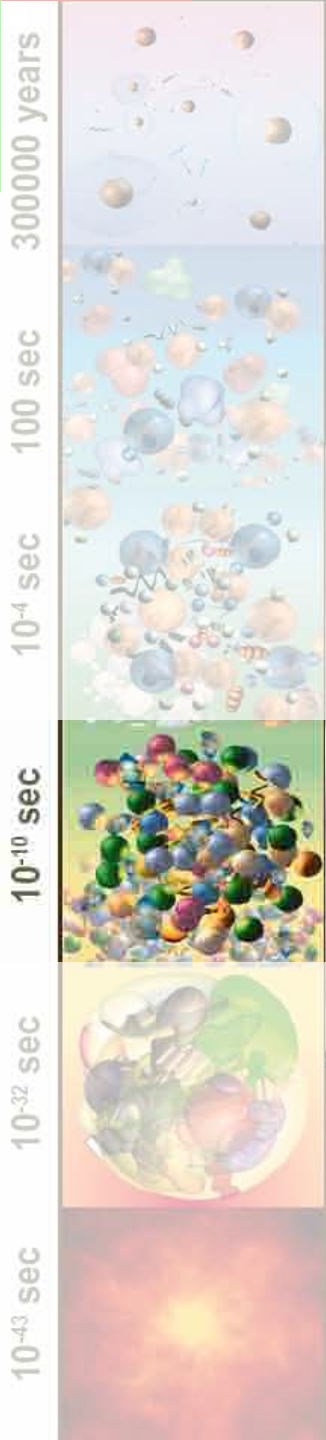
## Higgs-Teilchen

- quantenmechanische Anregung des Hintergrundfeldes
- **notwendige Konsequenz des Konzepts!**



# Mechanische Analogie zur Higgs Produktion

- n Luft (~ Hintergrundfeld) normalerweise kaum zu spüren  
am Besten erfahrbar, wenn in Bewegung
- n Objekte hoher Energie erzeugen Anregungen der Luft
- n Objekte hoher Masse erzeugen Anregung im Hintergrundfeld  
= Higgs-Teilchen

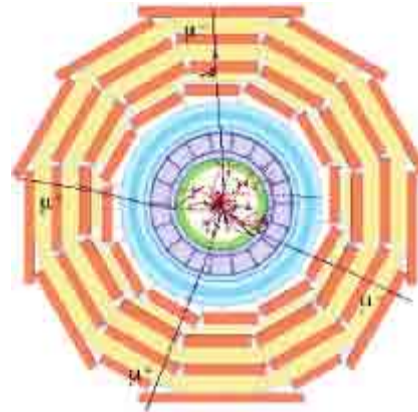
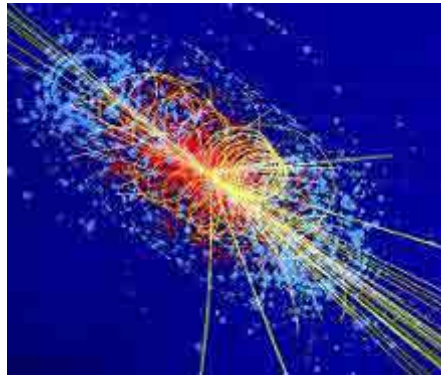




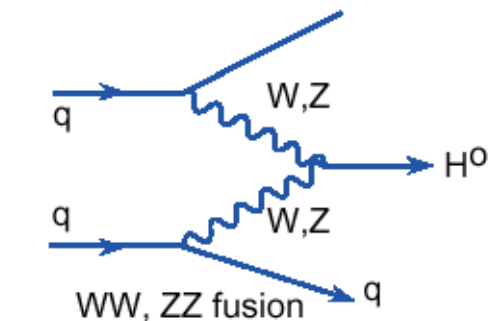
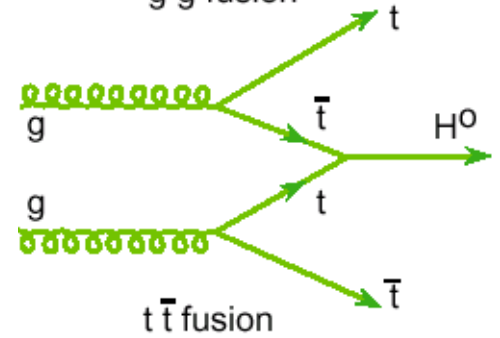
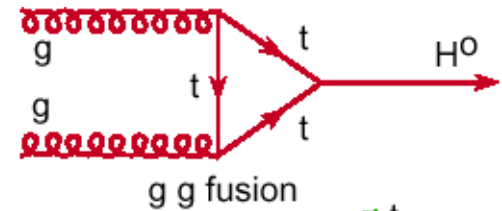
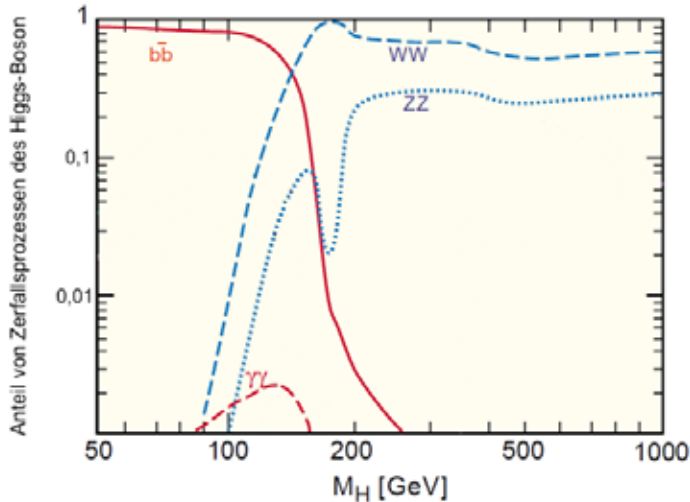
# Higgs Suche am LHC

n Higgs Masse unbekannt:

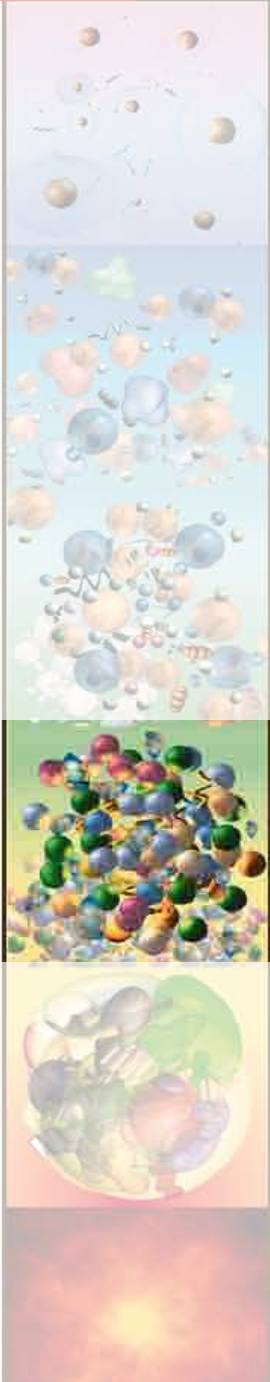
- Viele Produktionsmechanismen
- Viele mögliche Zerfälle



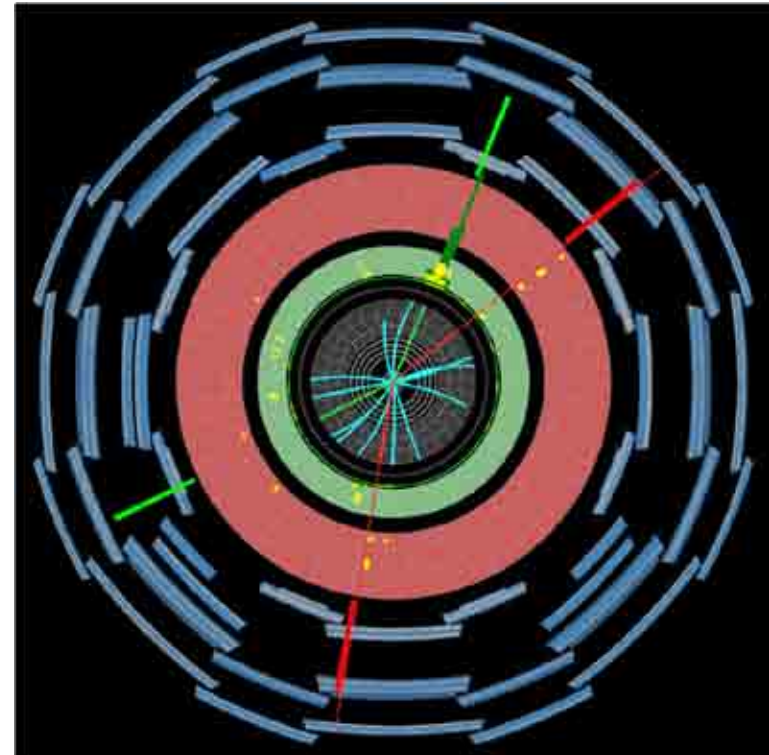
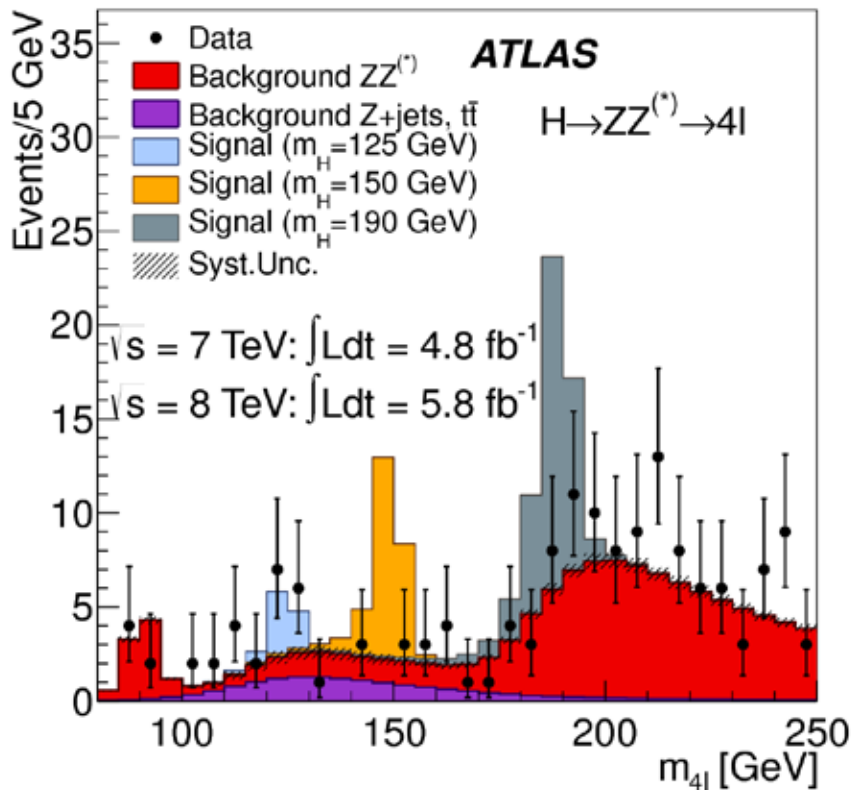
• Als Funktion der Masse vorhersagbar

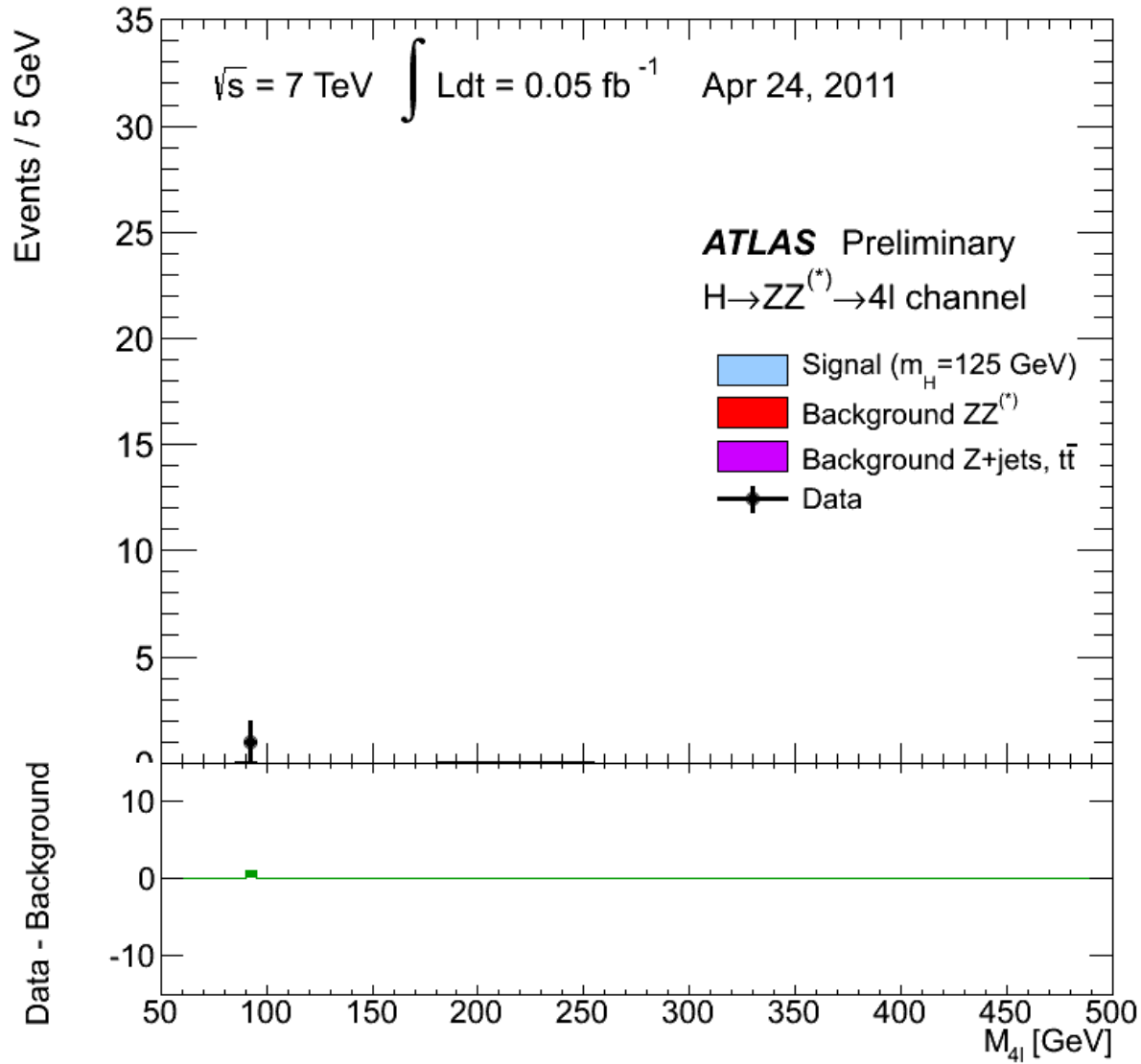


300000 years  
100 sec  
10<sup>-4</sup> sec  
10<sup>-10</sup> sec  
10<sup>-32</sup> sec  
10<sup>-43</sup> sec



- ✓ „Goldener Kanal“ (praktisch kein Untergrund außer ZZ ohne Higgs)
- ✓ **Sensitivster Endzustand für  $200 \text{ GeV} < m_H < 275 \text{ GeV}$**
- ✓ zweitensensitivster (nach WW) für  $130 \text{ GeV} < m_H < 200 \text{ GeV}$
- ✓ **Sehr gute Massenrekonstruktion möglich**



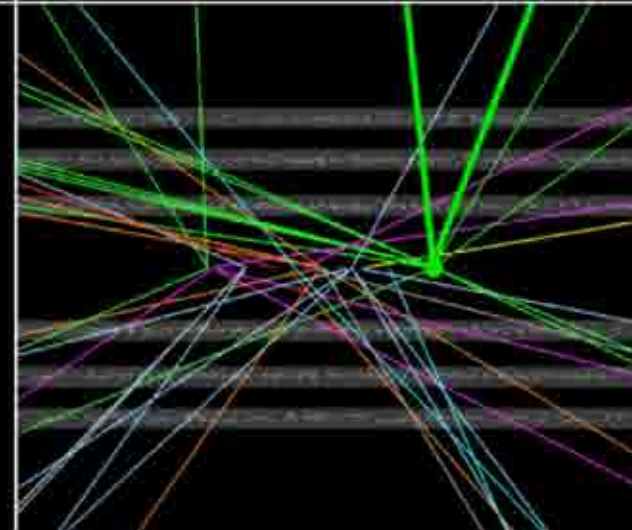
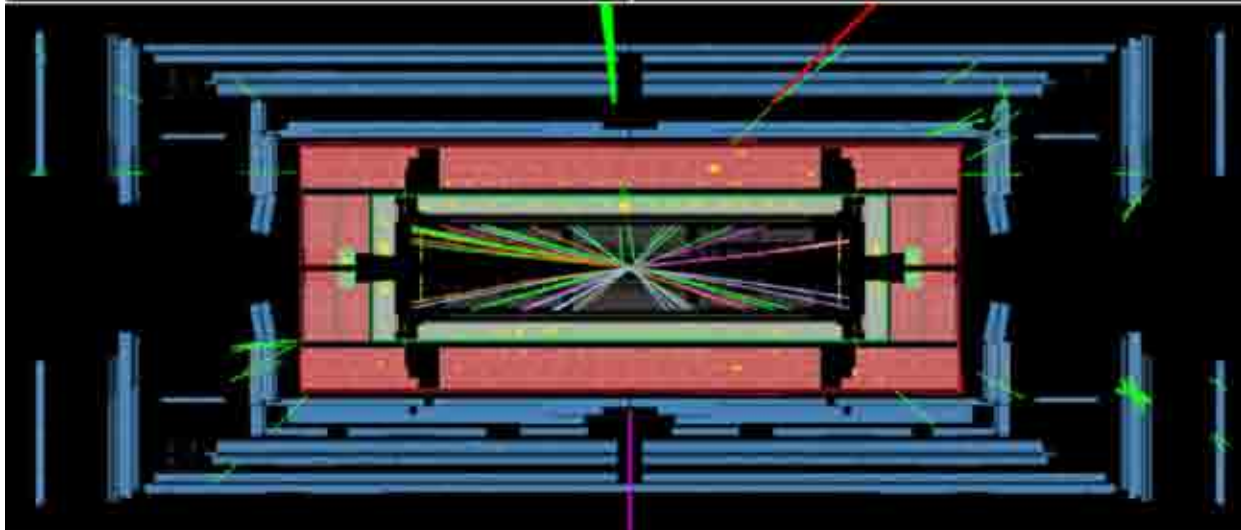
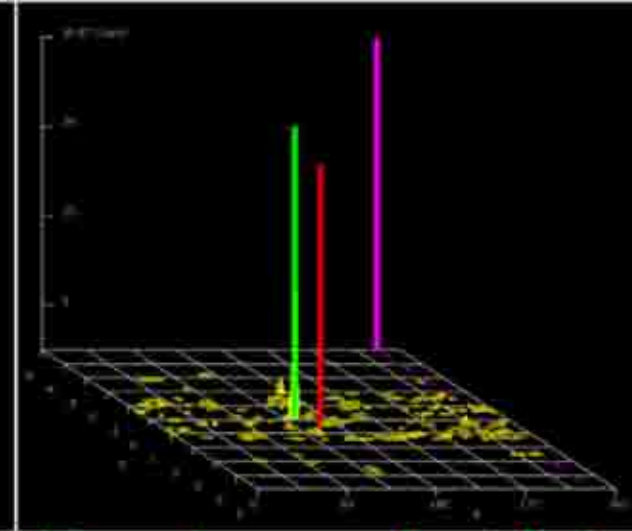
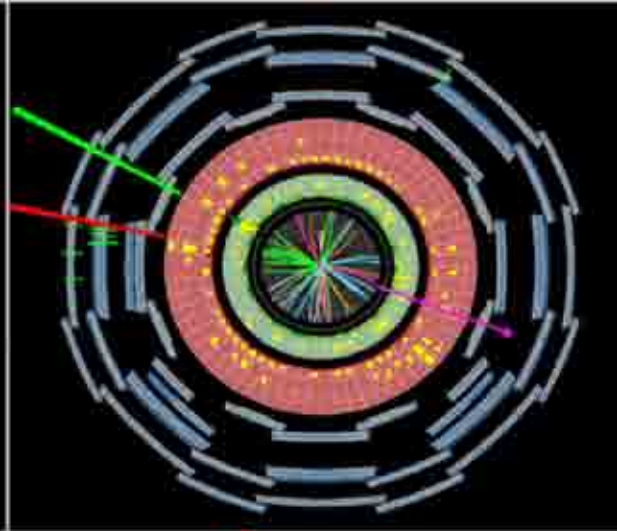


Entwicklung des 4-Lepton invarianten Massenspektrums in 2011 und 2012

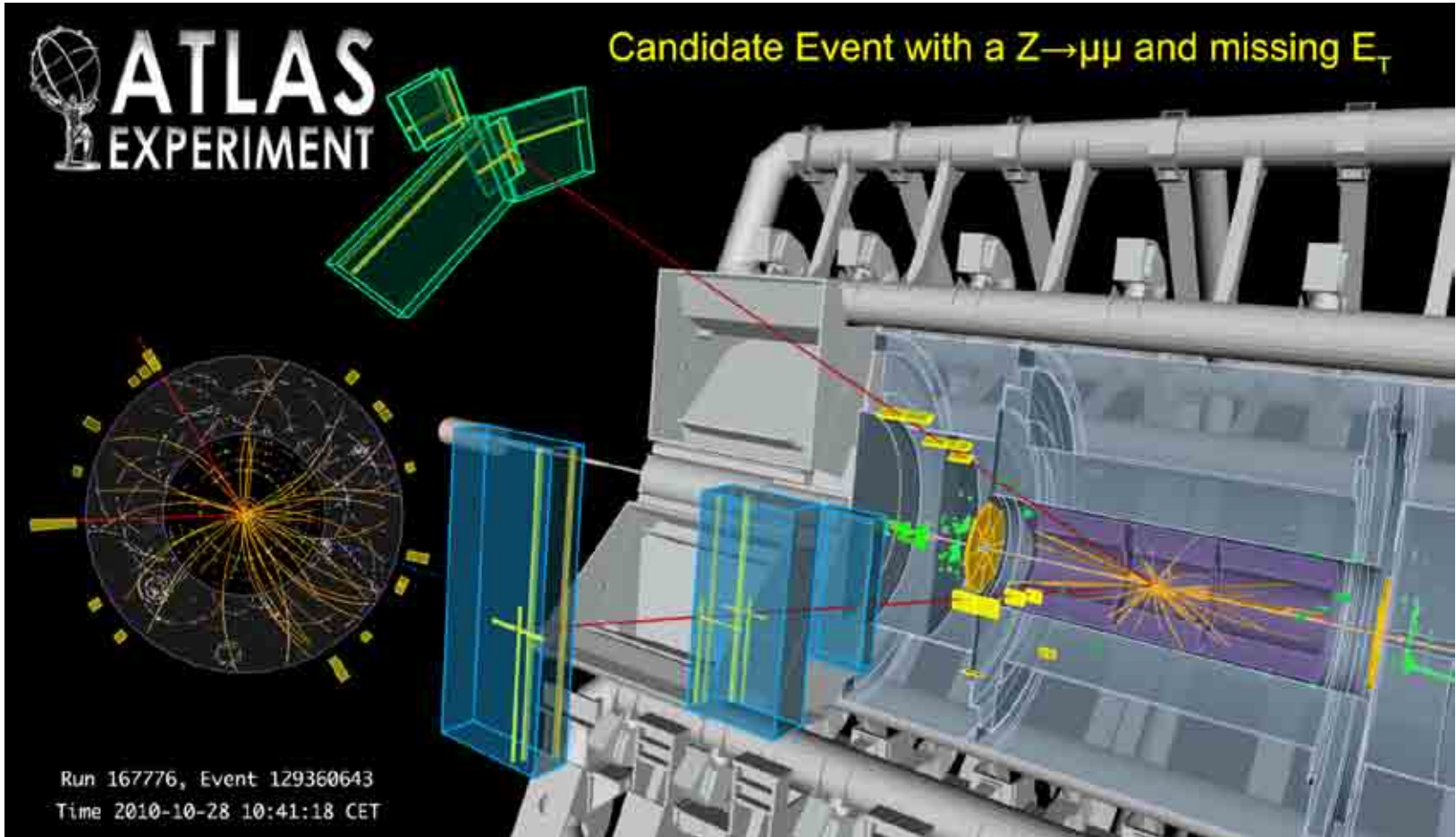


**ATLAS**  
EXPERIMENT

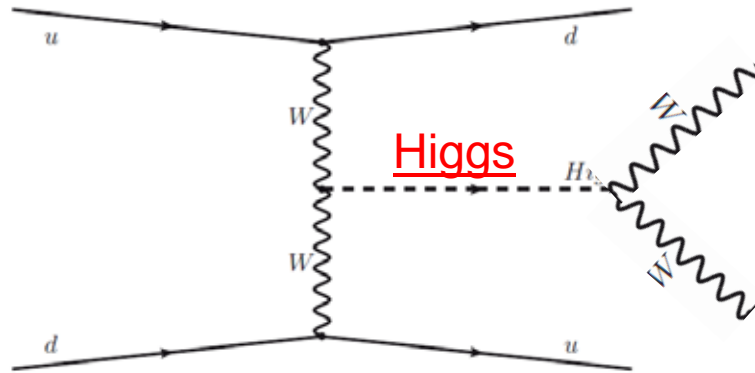
Run Number: 204026, Event Number: 33133446  
Date: 2012-05-28 07:23:47 CEST



- ✓ Scheinbares  $WW$ -Paar  $W^+W^- \rightarrow \mu^+\nu \mu^-\nu$  über  $Z \rightarrow \mu^+\mu^-$  und fehlende Energie durch exp. Messunsicherheiten

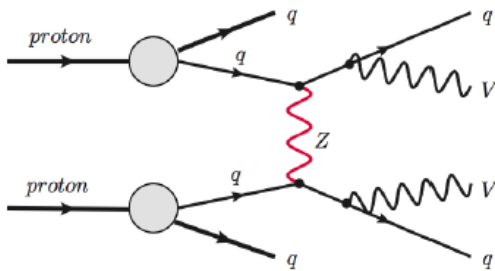


n Gesuchtes Signal  $H \rightarrow W^+ W^-$

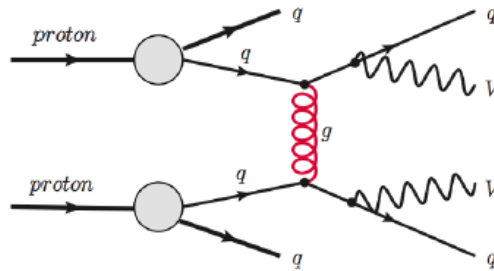


n Untergrund aus anderer  $W^+ W^-$  Erzeugung oder scheinbare  $WW$

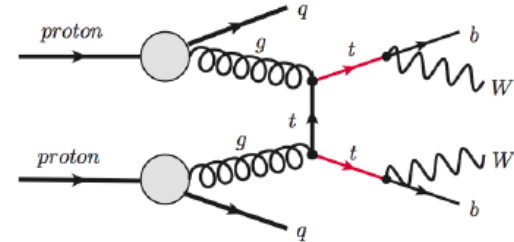
A) EW



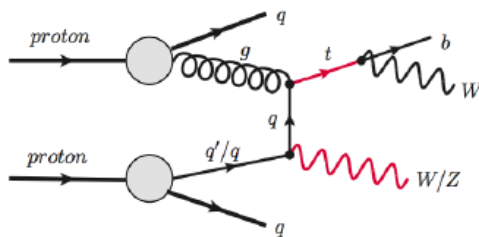
B) QCD



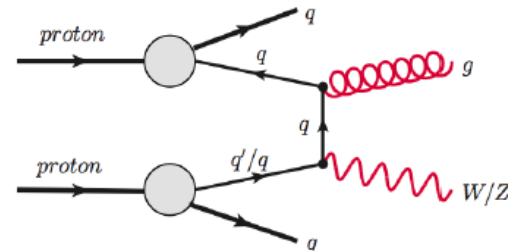
C) Top pairs



D) Single top

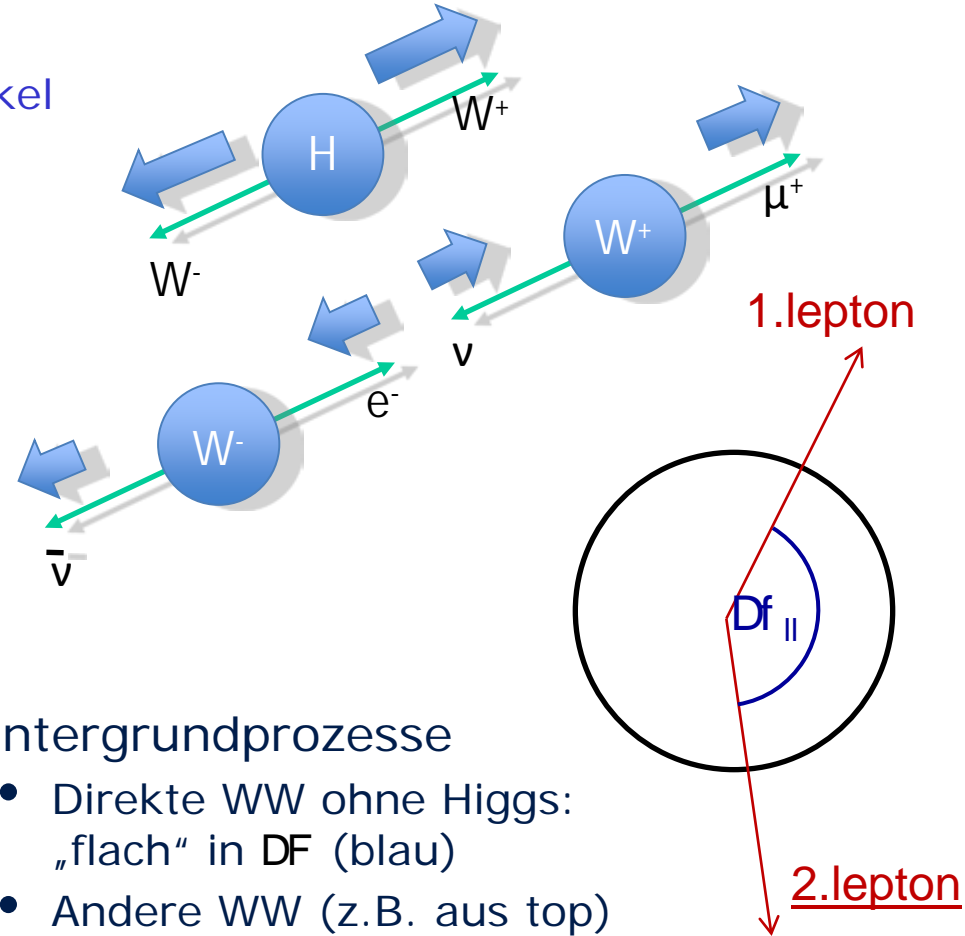


E)  $W/Z$  + jets



✓ Spin-Korrelation:

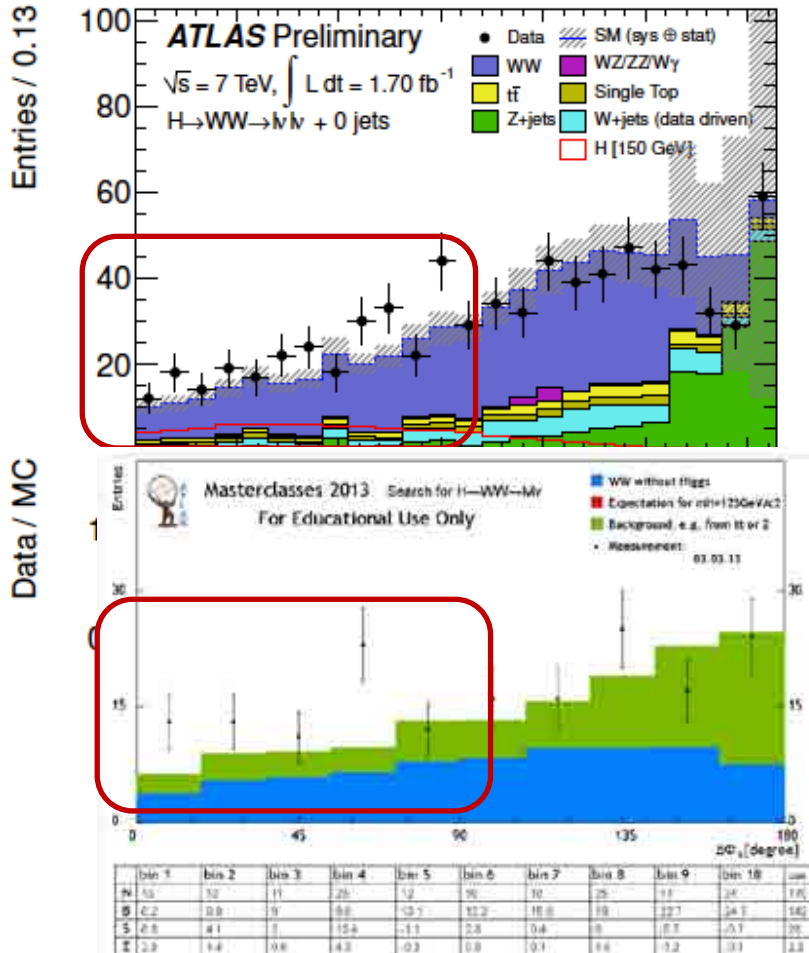
- Leptonen aus H → WW Zerfall bevorzugen kleine DF Öffnungswinkel



✓ Untergrundprozesse

- Direkte WW ohne Higgs: „flach“ in DF (blau)
- Andere WW (z.B. aus top) o. scheinbare WW (z.B. aus Z): „ansteigend“ in DF (gelb/grün)

✓ Suche Überschuss bei kleinen DF



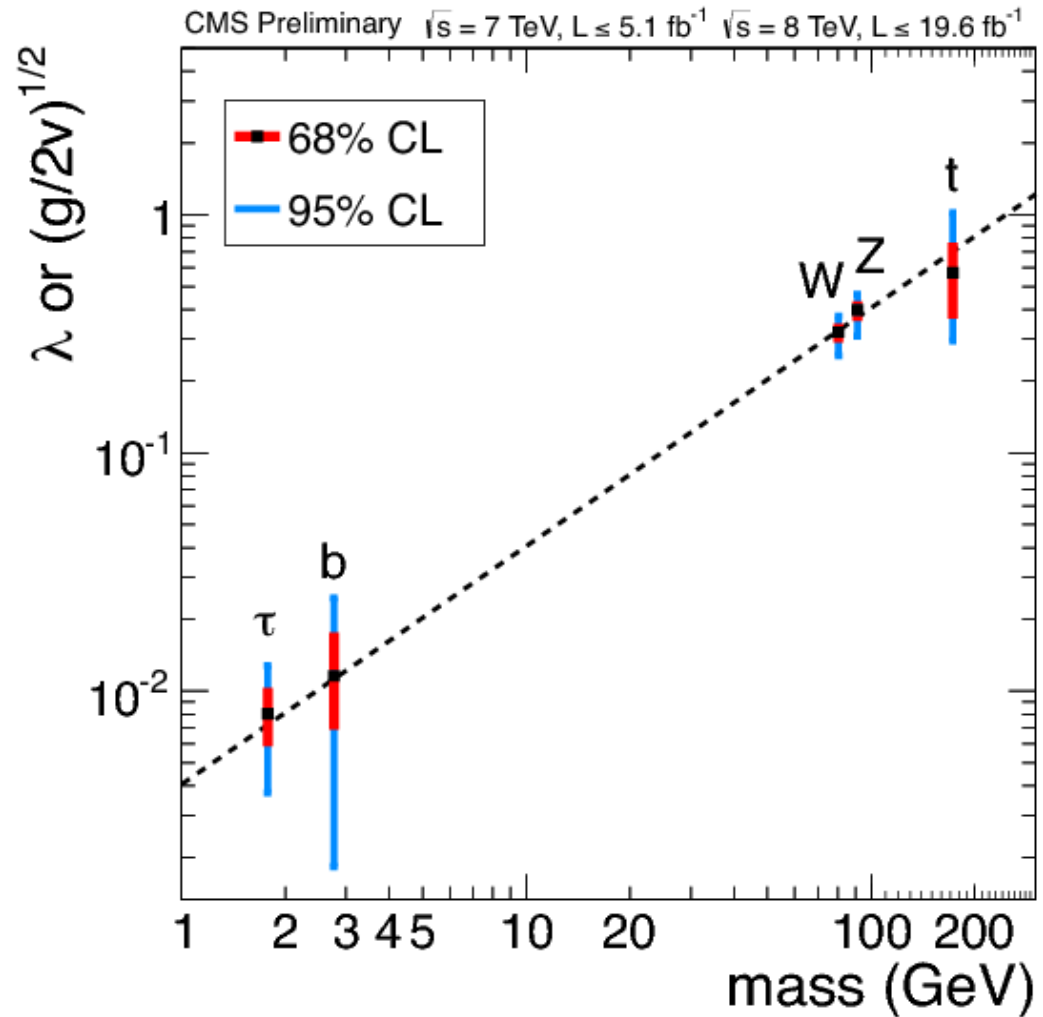
✓ Vorhersage für Higgs:

- Kopplung  $\sim$  Masse

✓ Experiment:

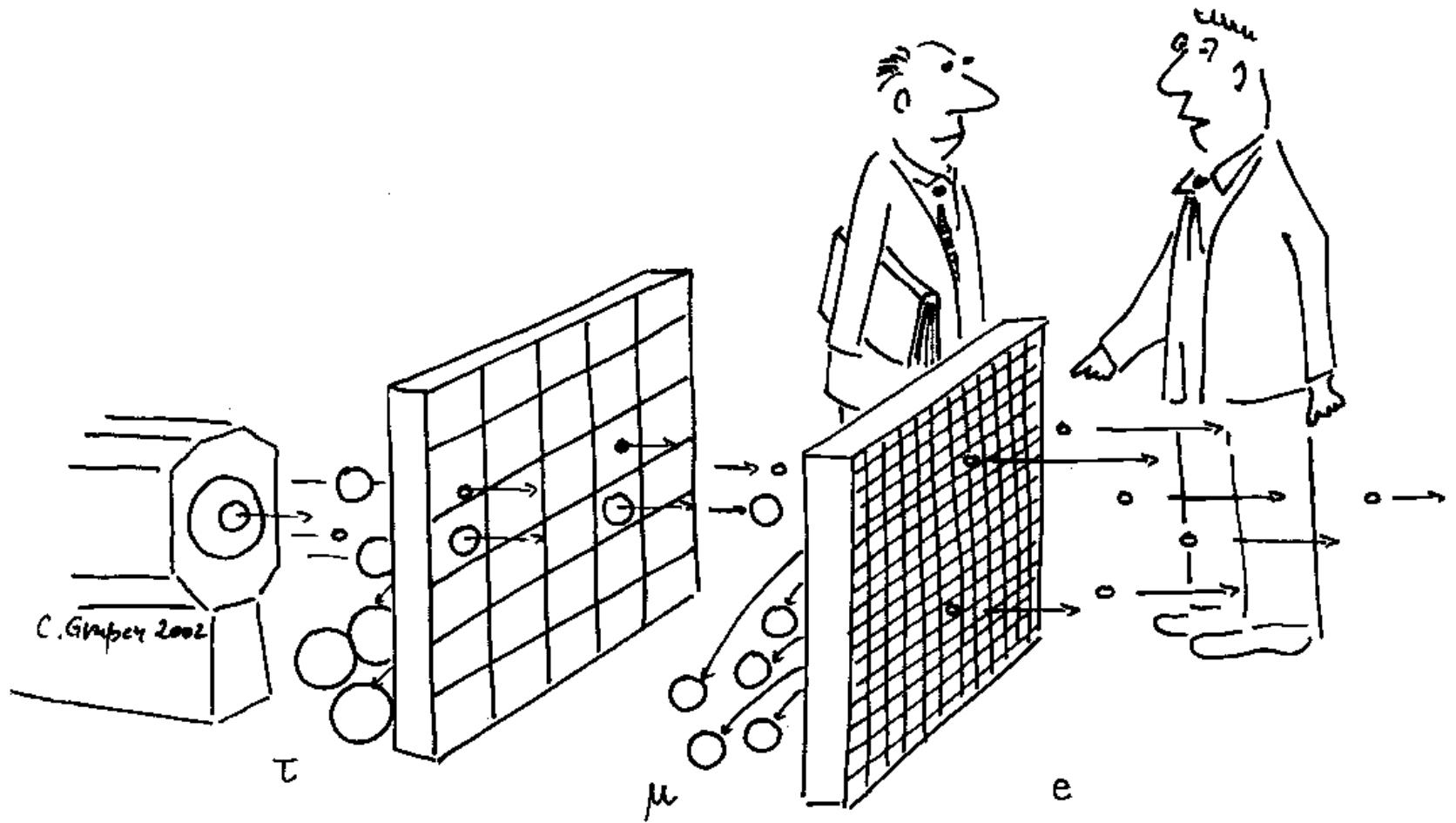
bestätigt über Bereich  
von Faktor 100 für

- Bosonen: W, Z
- Fermionen: t, b,  $\tau$





# VIEL SPAß BEIM MESSEN!



"Our new lepton identifier!"