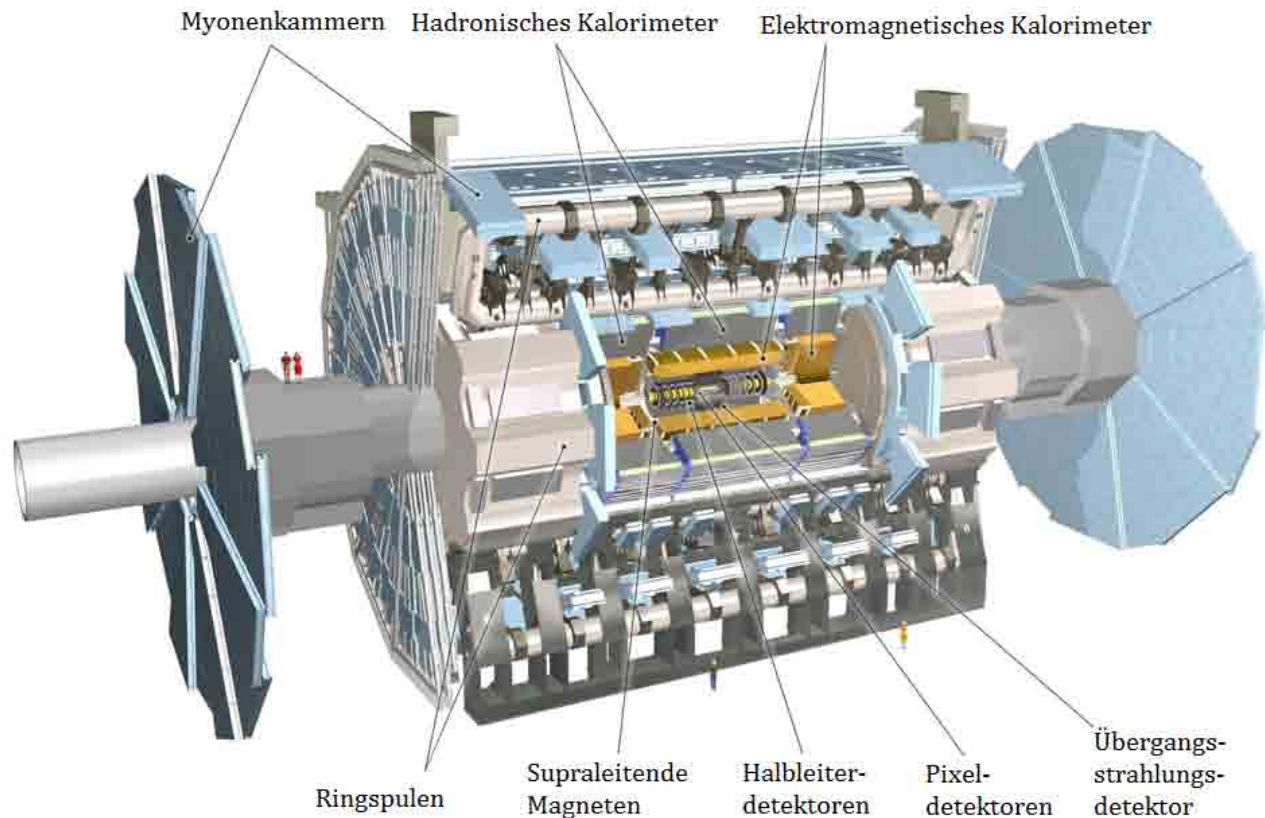
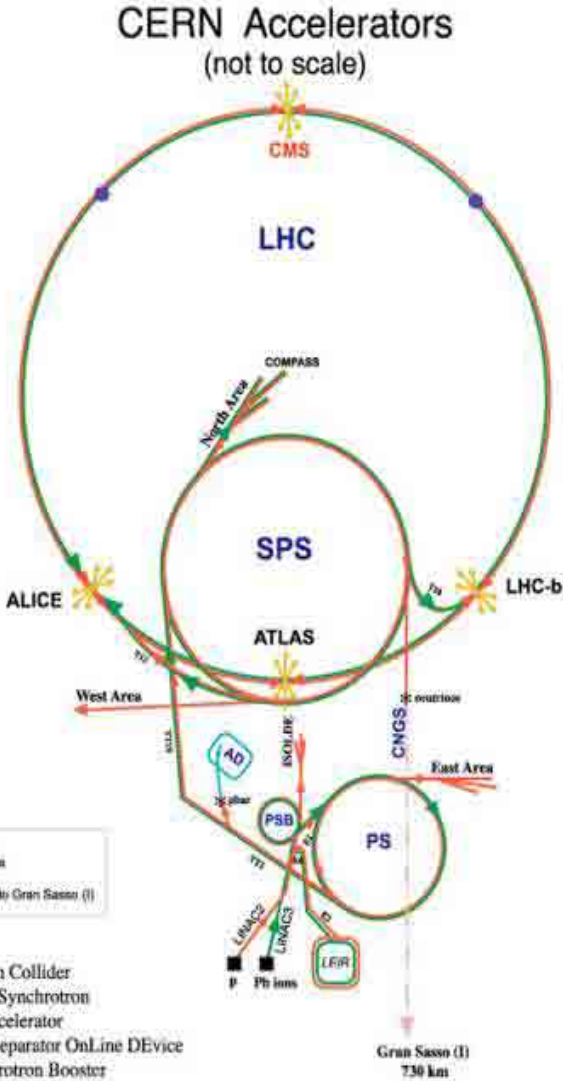


Masterclasses mit LHC Daten: Auf Augenhöhe mit der aktuellen Forschung

Michael Kobel (TU Dresden)

Lehrertag Internationale Masterclasses, Dresden
09.03.2013





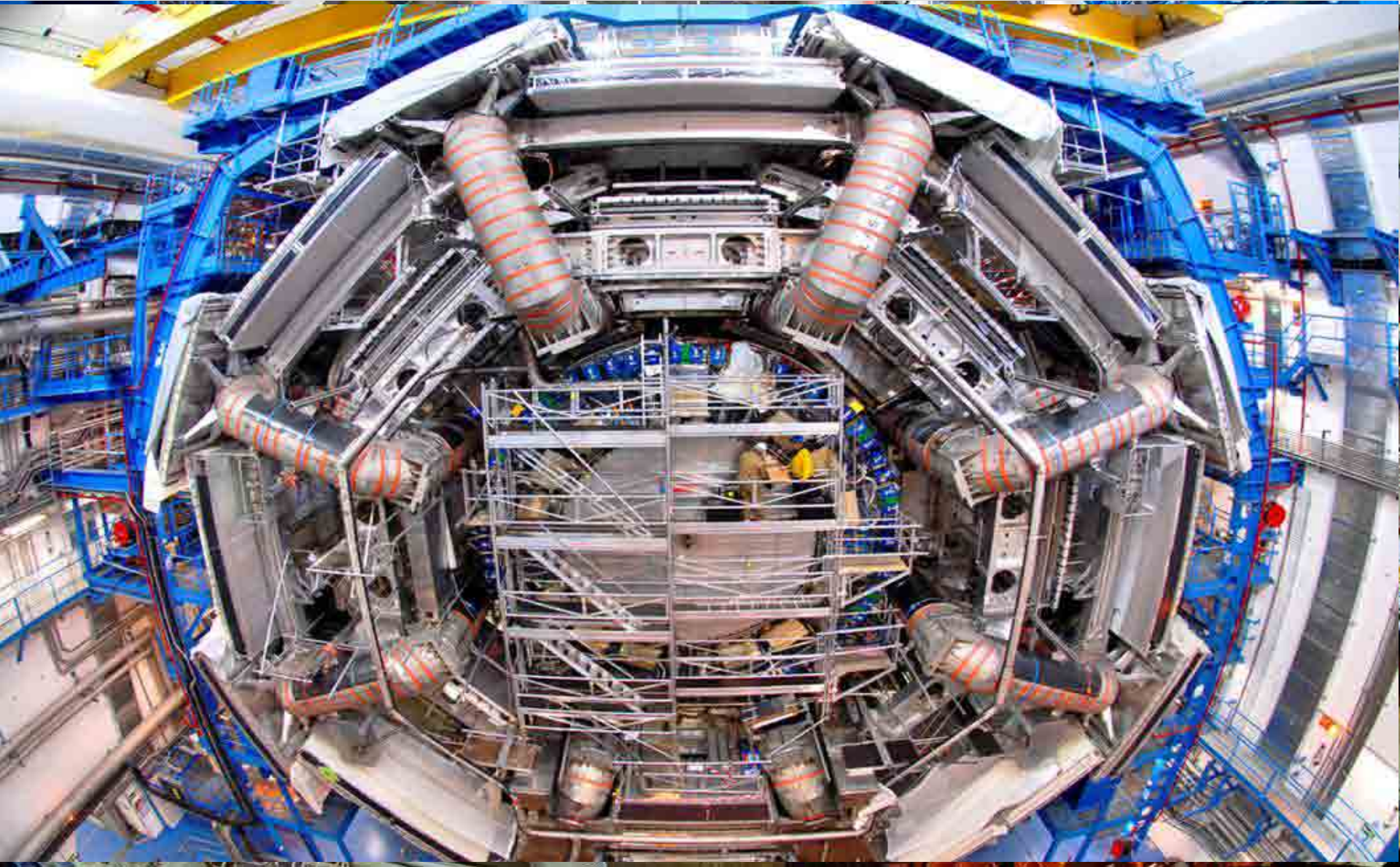
LHC: Large Hadron Collider
 SPS: Super Proton Synchrotron
 AD: Antiproton Decelerator
 ISOLDE: Isotope Separator OnLine DEvice
 PSB: Proton Synchrotron Booster
 PS: Proton Synchrotron
 LINAC: LINear ACcelerator
 LEIR: Low Energy Ion Ring
 CNGS: Cern Neutrinos to Gran Sasso

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

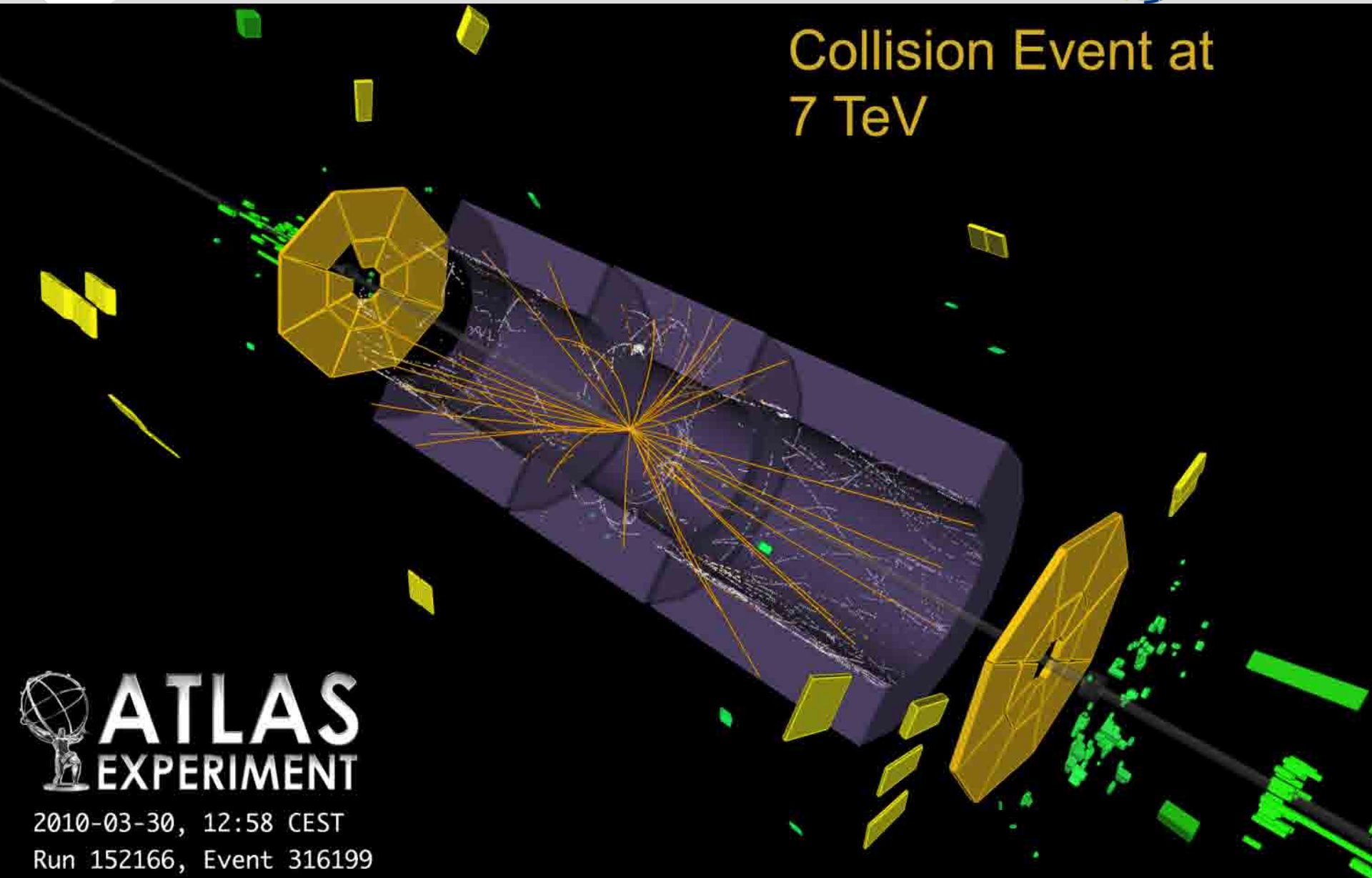
LEP (e^+e^-)	1989-1995	45+45 GeV
	1995-2000	bis 104+104 GeV
LHC (pp)	2010	3500+3500 GeV
	2011-2012	4000+4000 GeV
	> 2015	6500+6500 GeV?



CERN visit - Introduction





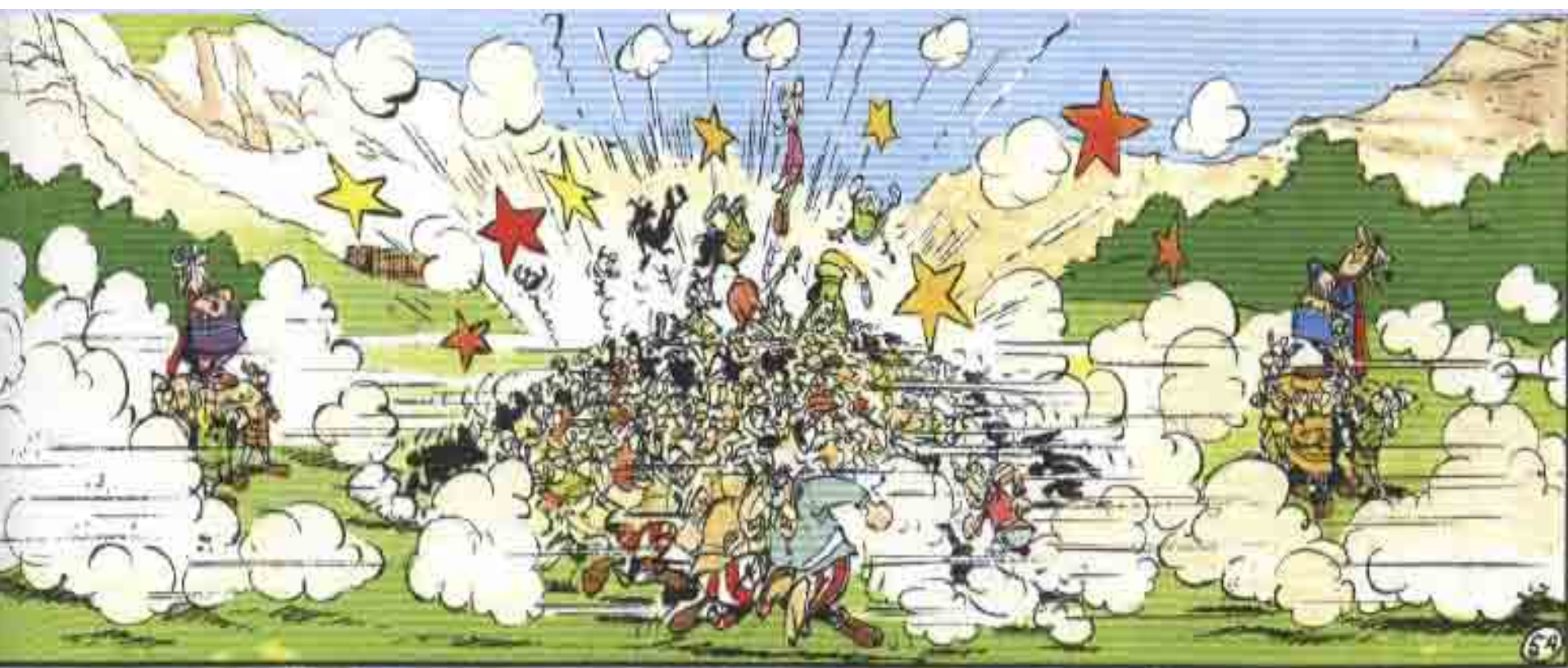
Collision Event at
7 TeV

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

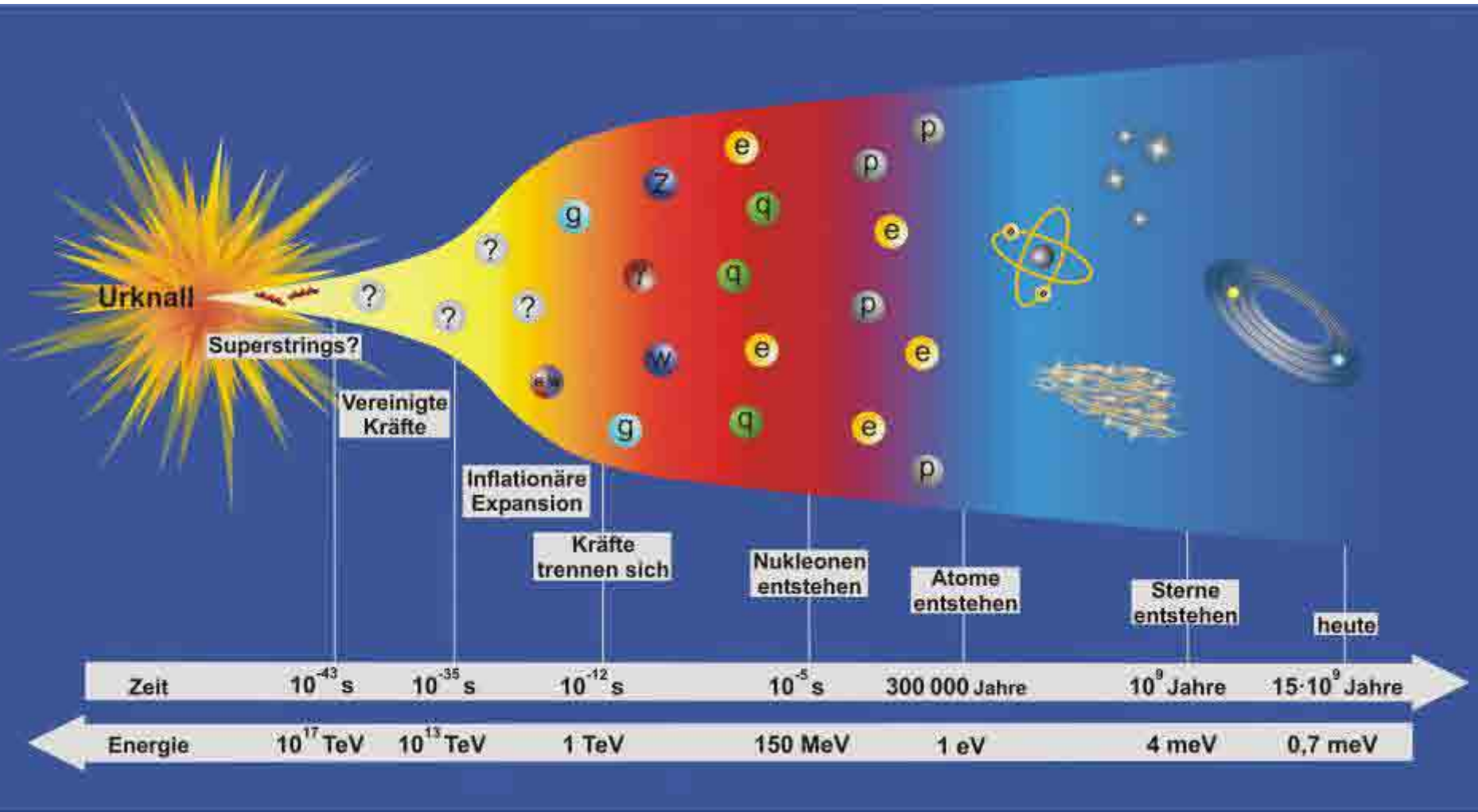
... Zeit:

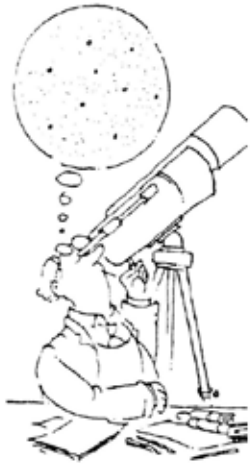
$$\langle E \rangle \approx k_b \cdot T$$

Ludwig Boltzmann

hohe Temperaturen

Die Temperatur des Universums fällt mit der Zeit

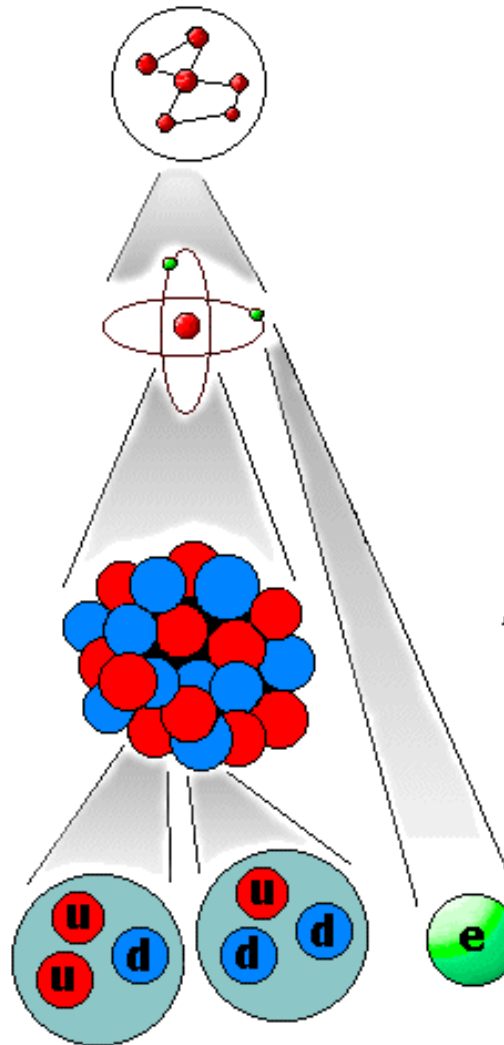




Makrokosmo



Mikrokosmos



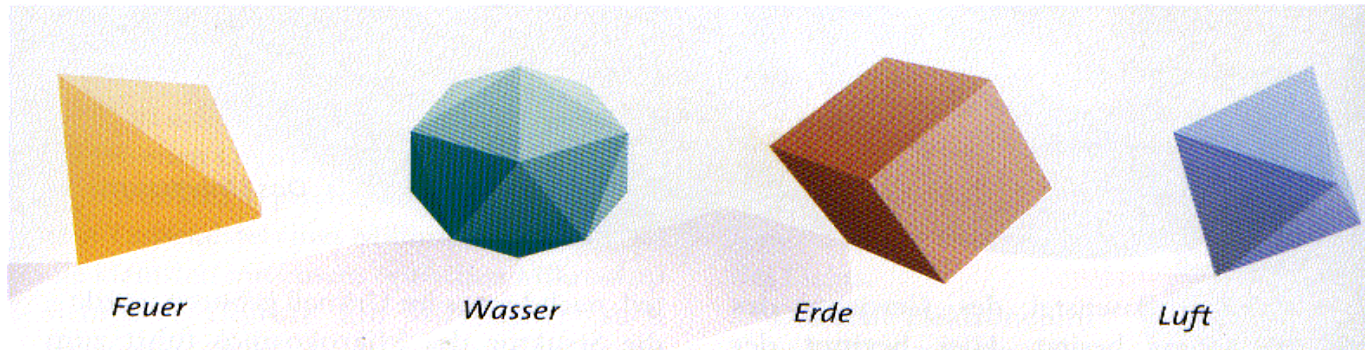
Molekül (aus Atomen)

Atom (aus Atomkern
und Atomhülle)

Atomkern (aus Protonen
und Neutronen)

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

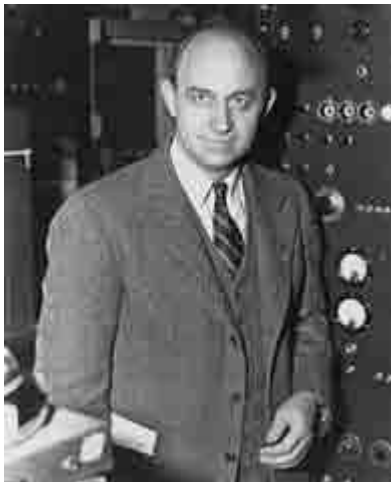
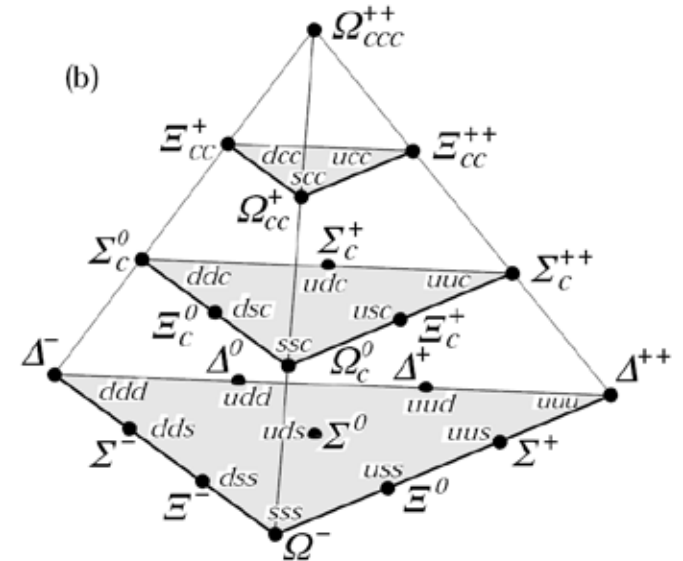
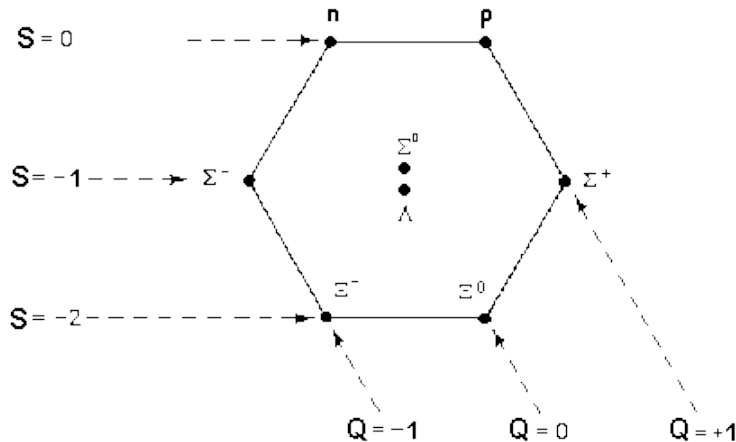
- ▶ **Elemente und Kräfte:** 500-430 v.Chr. Empedokles
 - ▶ **Vier Elemente:** Feuer, Wasser, Erde, Luft
 - ▶ **Zwei Urkräfte:** Liebe , Haß $\hat{=}$ Mischung , Trennung
- ▶ **Symmetrien:** 427-347 v.Chr. Platon
 - ▶ **Symmetrische Körper:** Schönheit der Gesetze



- ▶ **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!"



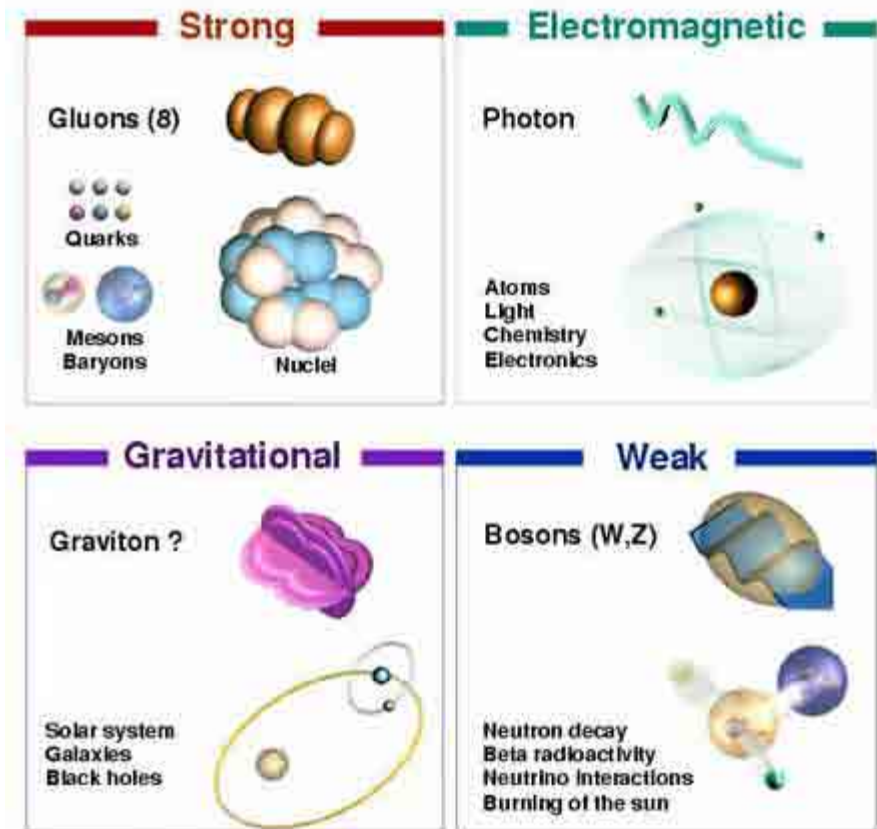
Zentraler Begriff #1: Wechselwirkung

- 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 (Aufgabe für Jugendliche)

- 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

Ordne die Stärke der Wechselwirkungen !

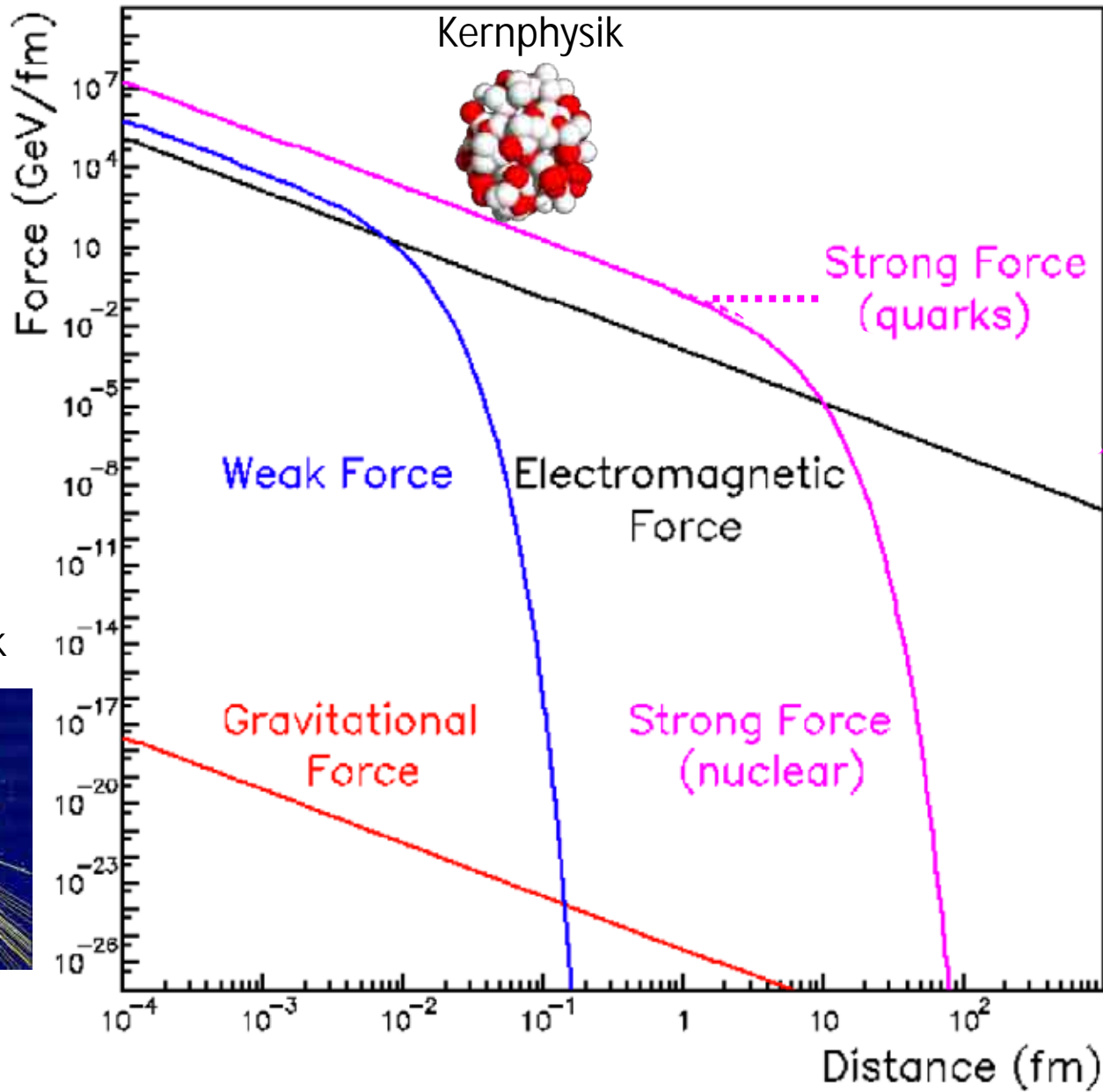
- Verbreiteter Fehler:

z.B. www.drillingsraum.de/4_grundkraefte_physik/4_grundkraefte_physik.html
(keine der schlechtesten Physikseiten...!)

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

- Dies geht nicht eindeutig!

Die Ordnung der WW-Stärke hängt vom Abstand ab!



Kernphysik



Strong Force (quarks)

Weak Force

Electromagnetic Force

Gravitational Force

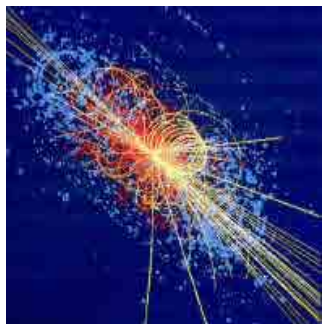
Strong Force (nuclear)

„Wir“





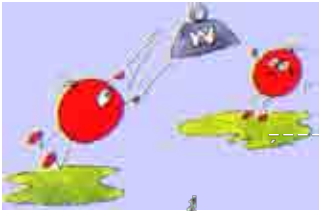
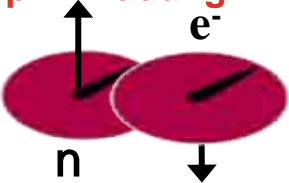
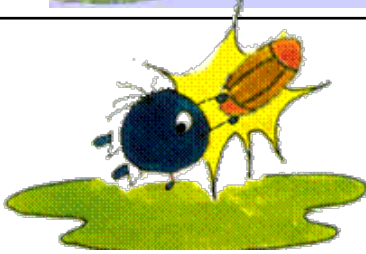
www.schmunze.mal.de

Teilchenphysik



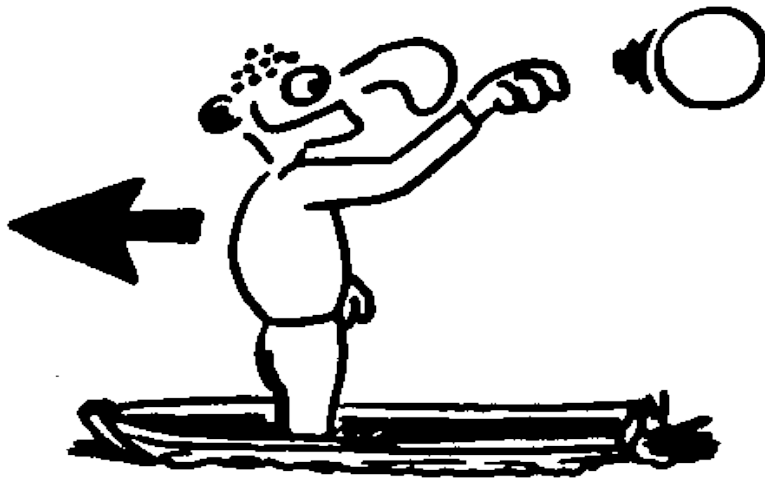
Fundamentale Wechselwirkungen

- 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 $I_3^W = \begin{matrix} \uparrow & 1/2 & \ddot{o} \\ \downarrow & -1/2 & \ddot{o} \end{matrix}$ 
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



Abstoßend



Anziehend

www.physicsmasterclasses.org/exercises/unischule/baust/bs_6fram_lv123.html

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

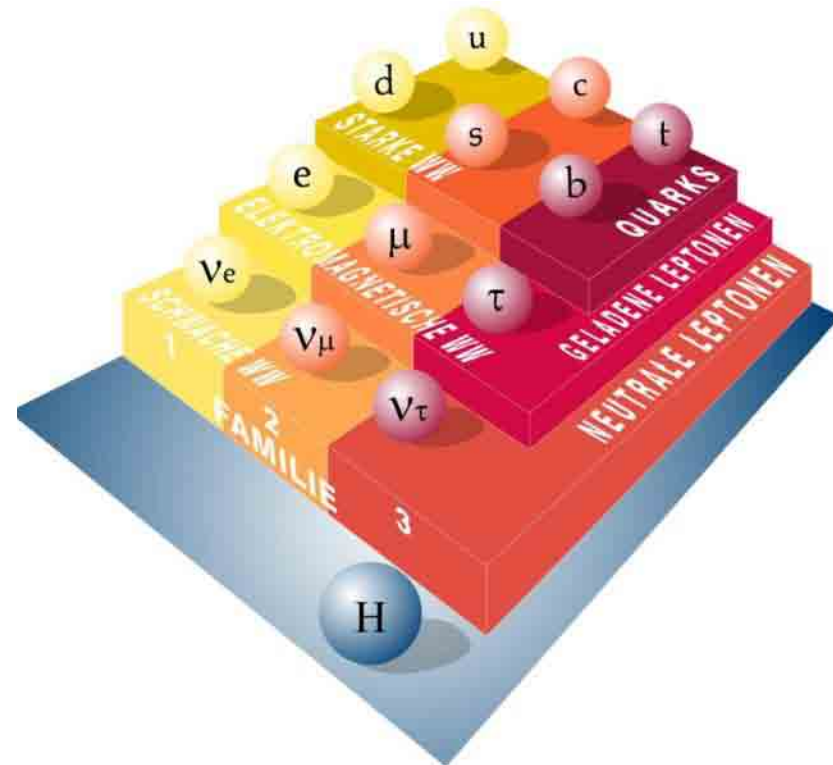
Neues über Ladung

- 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_W^3	Starke Ladung	Blau Grün Rot	
$+2/3$	$+1/2$	u	c	t
$-1/3$	$-1/2$	d	s	b
0	$+1/2$	ν_e	ν_μ	ν_τ
-1	$-1/2$	e	μ	τ
		1.	2.	3.
		Familie		

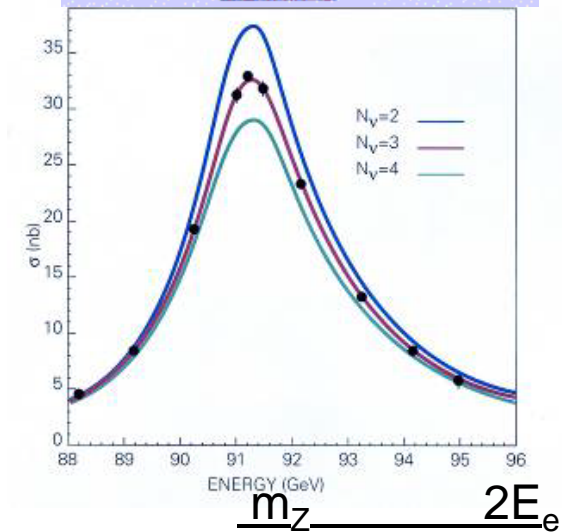
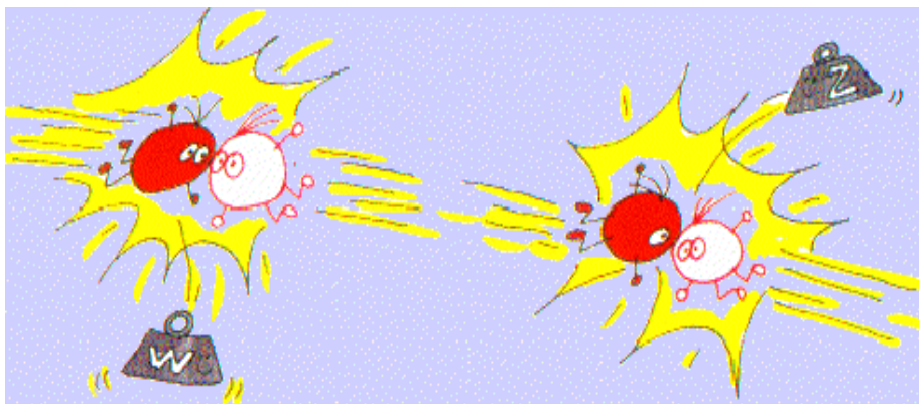
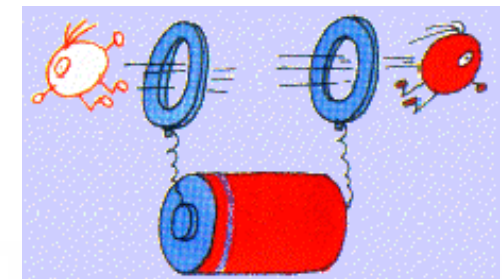
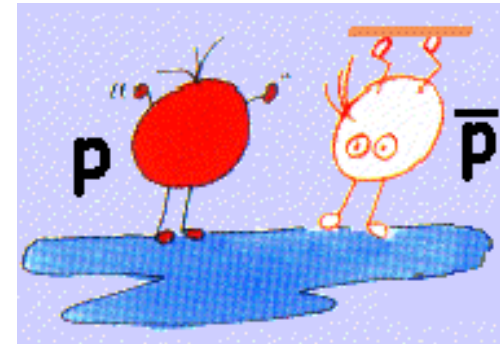
Quarks

Leptonen

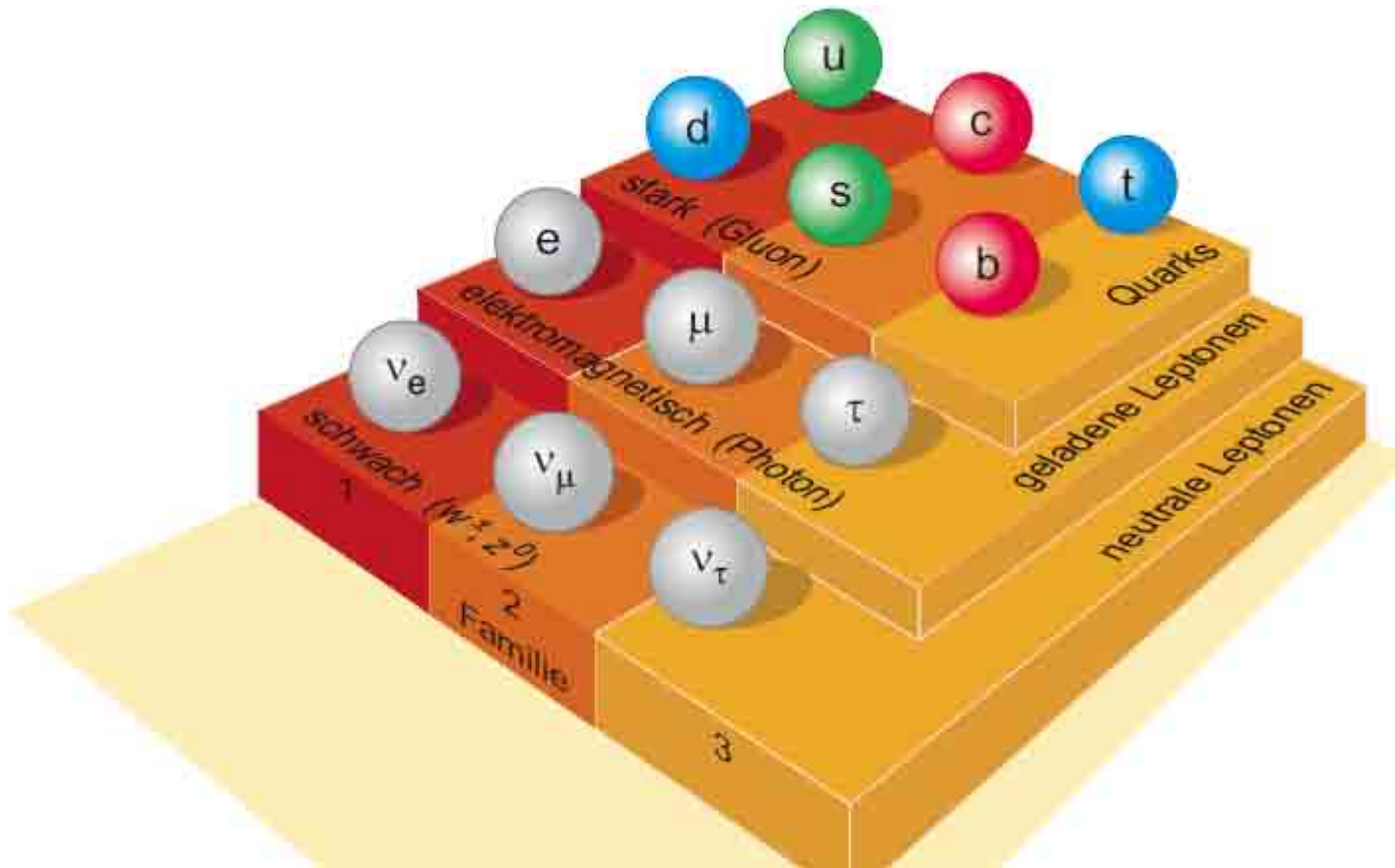


Antimaterie

- 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**



Standardmodell = Elementare Bausteine ?

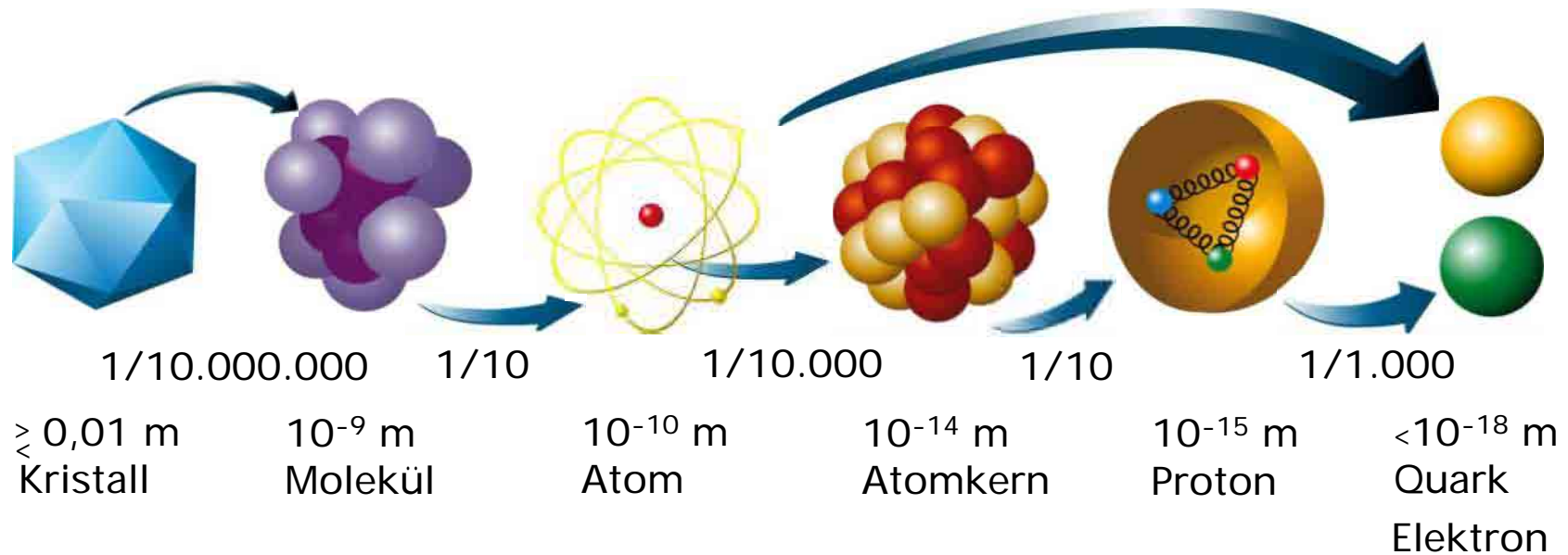


1. Elementare Bausteine sind eine **herausragende experimentelle Erkenntnis**
x eine weitere Substruktur ist „so gut wie“ ausgeschlossen !
2. Aber: sind **nicht die theoretische Grundidee** des Standardmodells
x Anordnung weder vorhergesagt, noch bisher nachträglich verstanden !
3. Bergen außerdem Gefahr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

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

Materie und fundamentale Bausteine



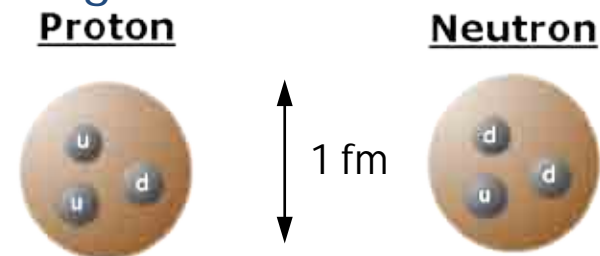
- Aufbau der stabilen Materie nur aus der ersten Familie

- Zwei „Quarks“ zu Protonen und Neutronen gebunden

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

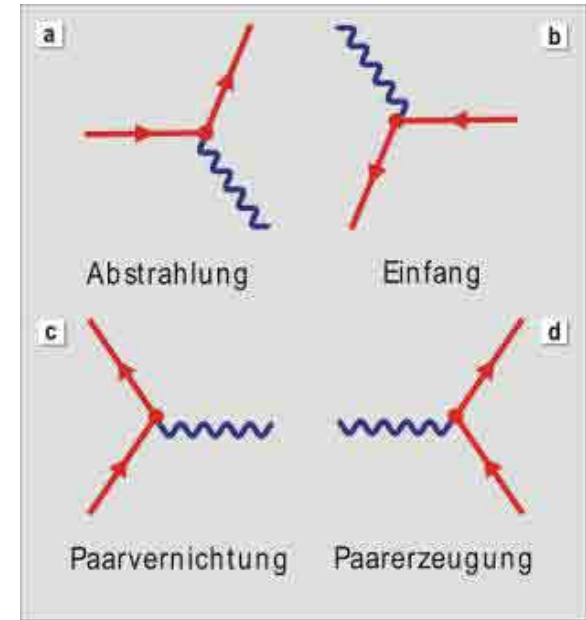
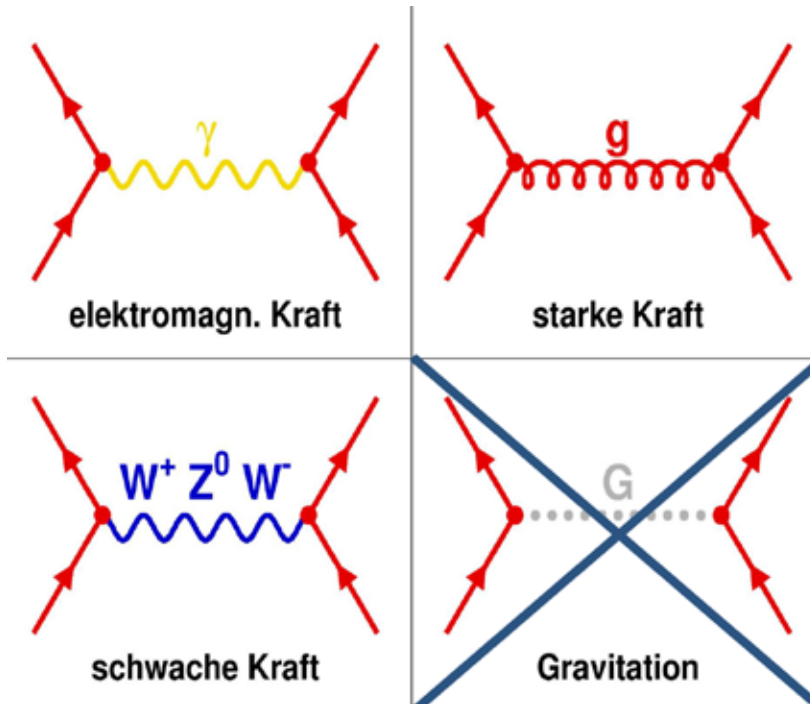
- Zwei „Leptonen“

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



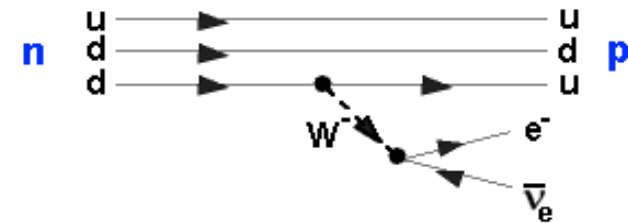
Eindeutige Vorhersagen

- 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 β symbolisiert Antiteilchen
Es läuft trotzdem in der Zeit nach rechts

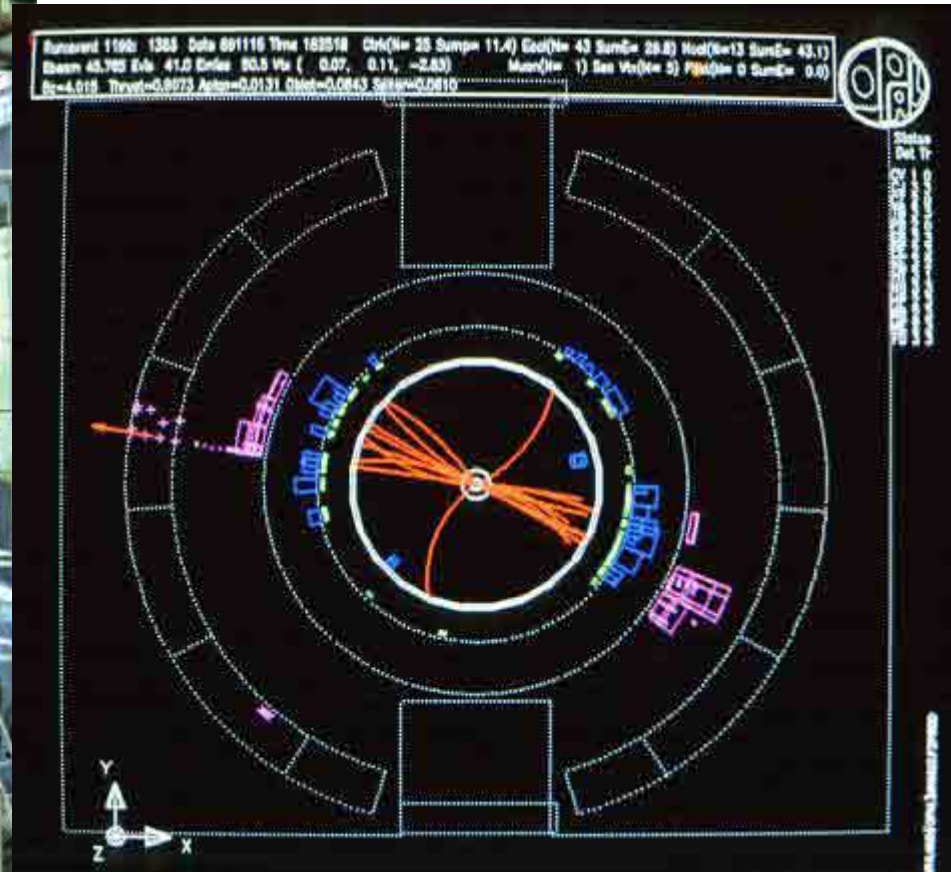
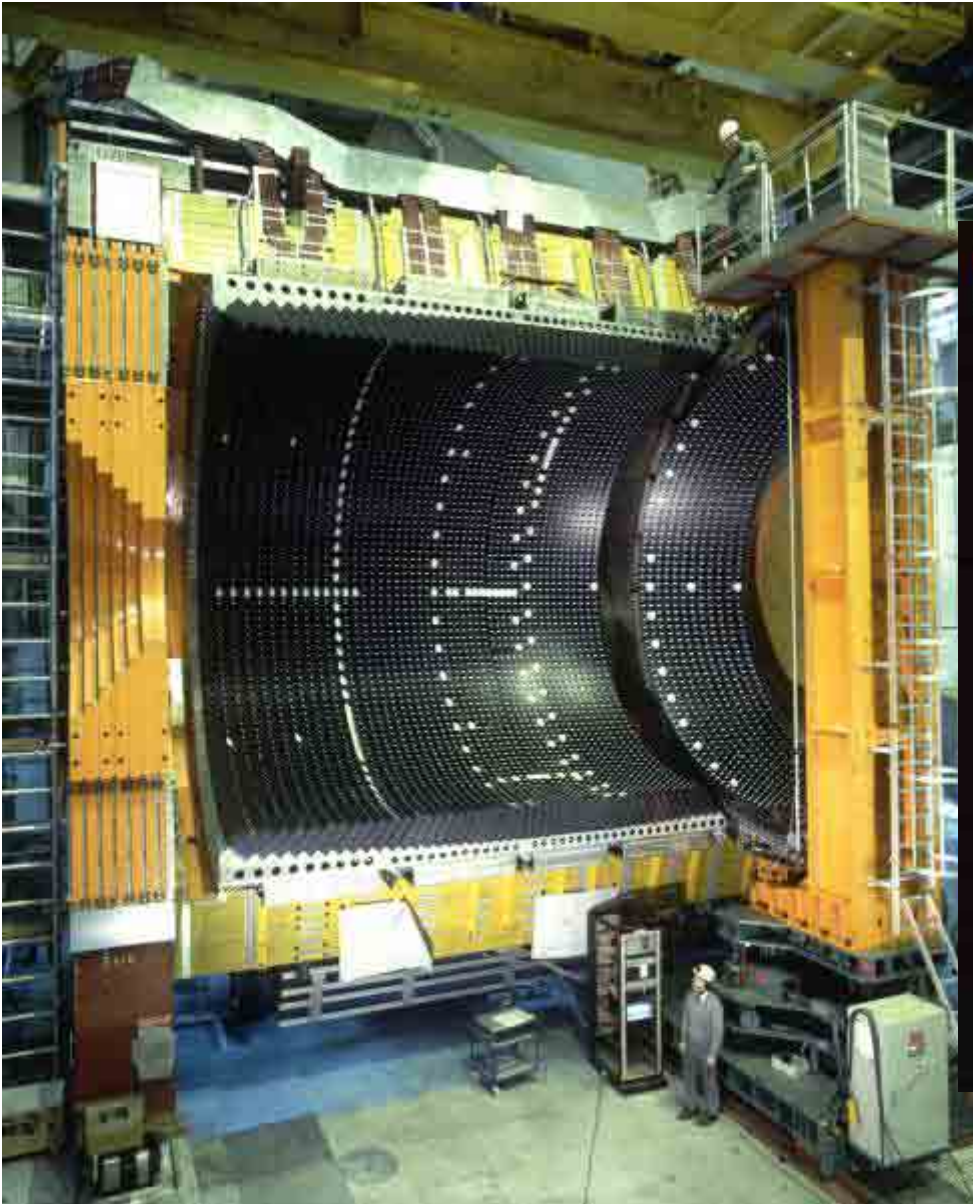
Beispiel: Kalium 40

- Instabiles Isotop mit 40 Nukleonen (19 Protonen und 21 Neutronen)
- Zerfällt durch den Betaminus- oder Betapluszerfall 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



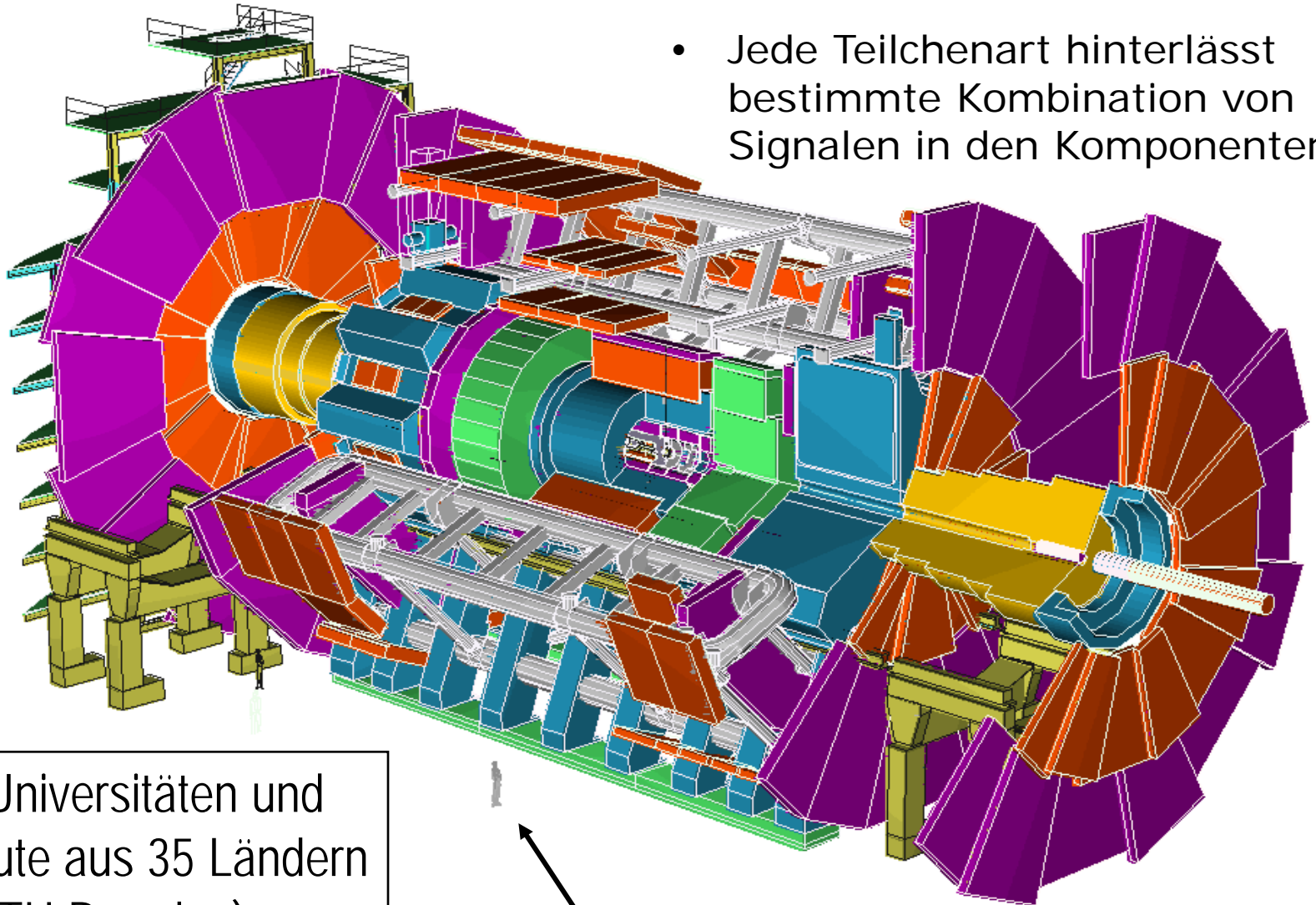
CERN, Genf,
bis 2000



Elektronische Bilder

Aktivität heute : ATLAS Experiment, LHC

- Jede Teilchenart hinterlässt bestimmte Kombination von Signalen in den Komponenten

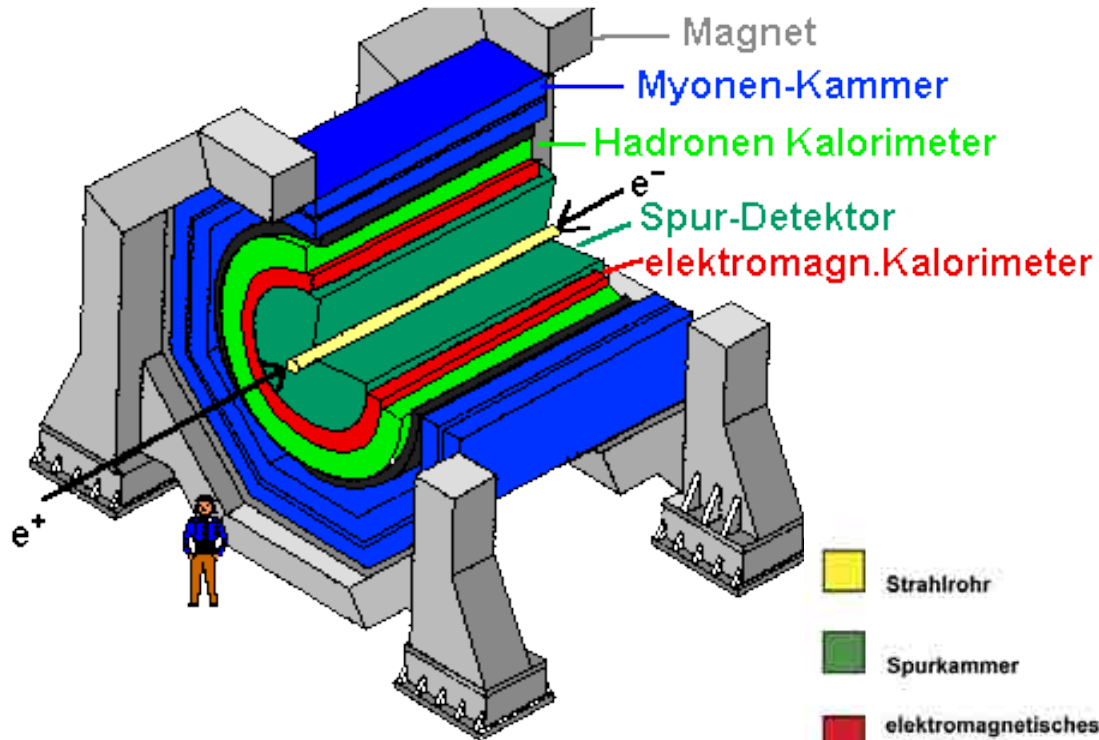


170 Universitäten und Institute aus 35 Ländern (u.a. TU Dresden)

Größenvergleich

- Zwiebelschalenartiger Aufbau verschiedener Komponenten

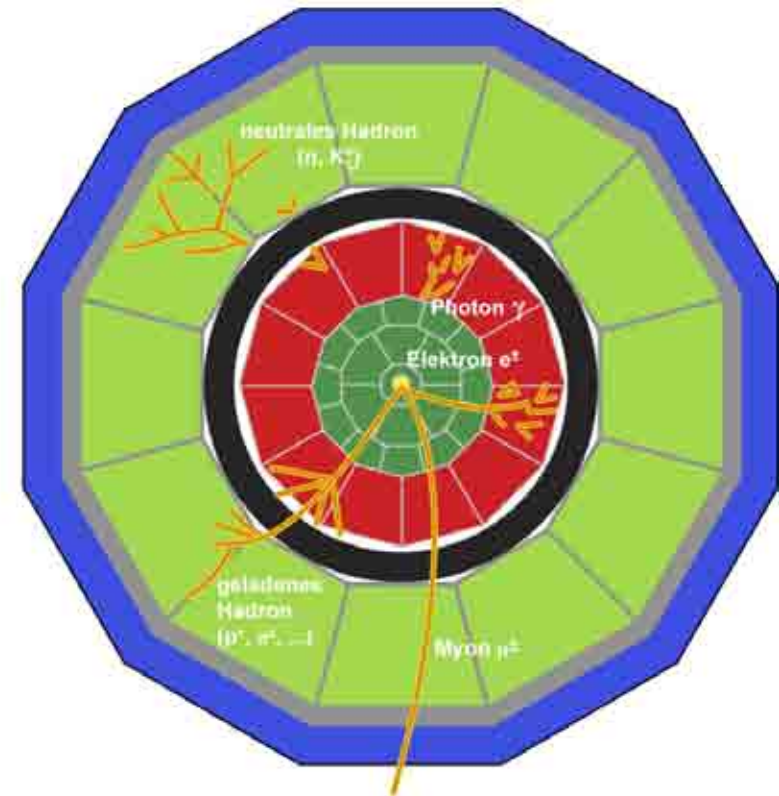
Teilchenidentifikation



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

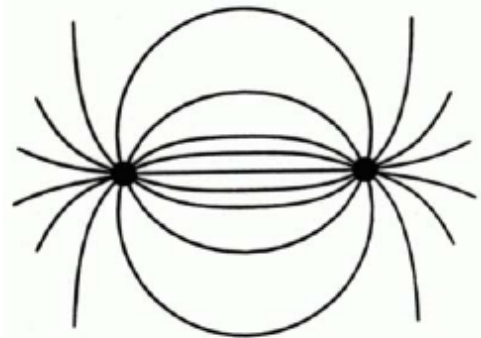
- feststellbare Teilcheneigenschaften:
 - aus Quarks („Hadronen“)
 - elektr. geladen / ungeladen
 - leicht / schwer

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



Confinement

QED



Feldlinien eines elektrischen Dipols reichen ins Unendliche

QCD

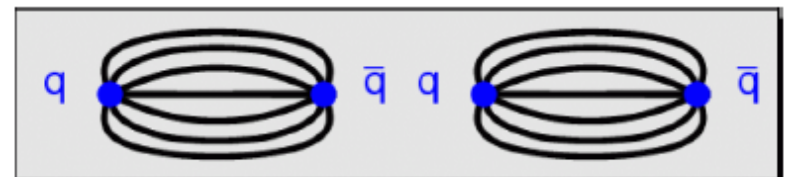


Feldlinien eines Farbdipols bilden einen engen Flusschlauch
Grund: Selbstkopplung der Gluonen

Die Feldenergie des Farbdipols wächst proportional zur Länge:

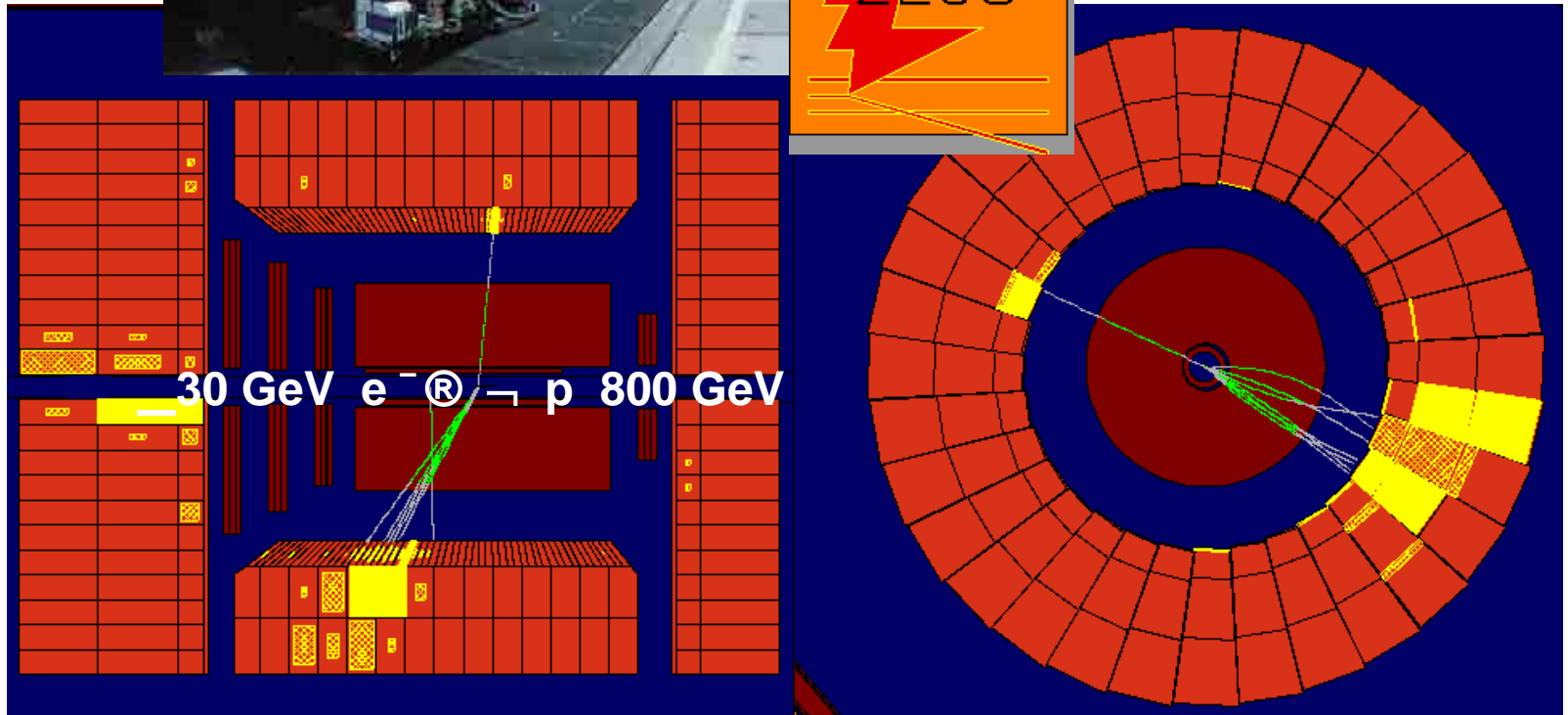
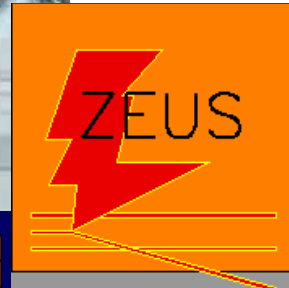
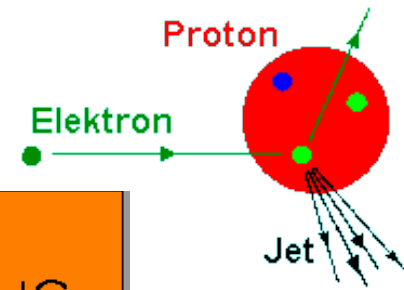
$$V(x) = k \cdot x \quad \text{mit} \quad k \approx 1 \text{ GeV} / \text{fm}$$

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.



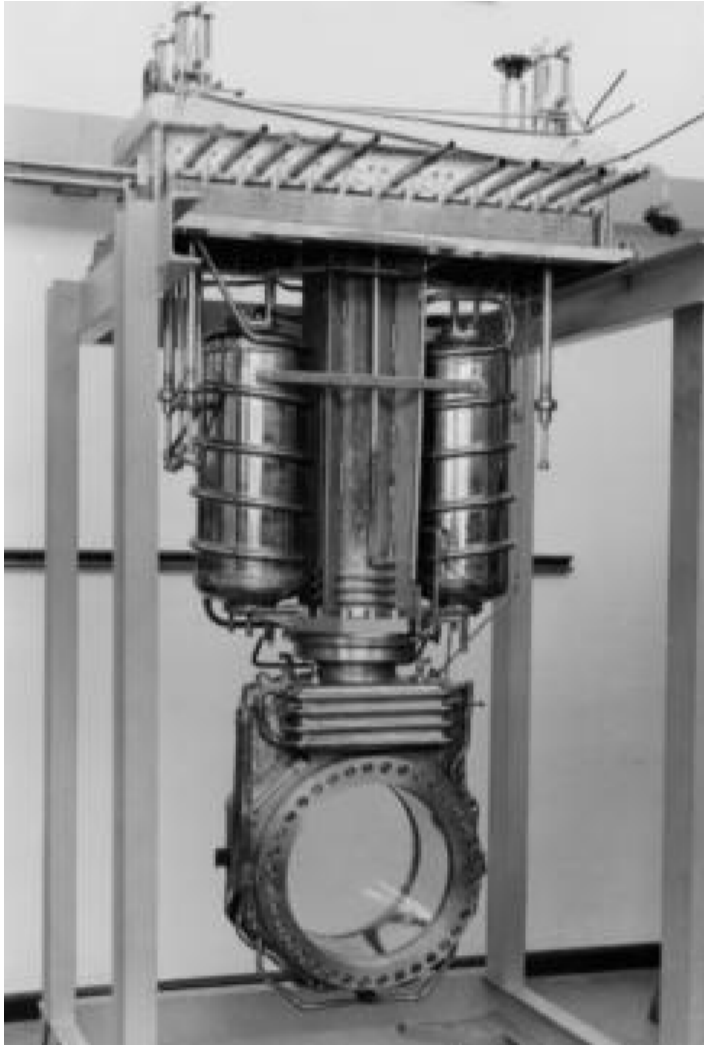
Einzelne Quarks ergeben „Hadronen“ Jets

- e-p Kollisionen bei HERA am DESY

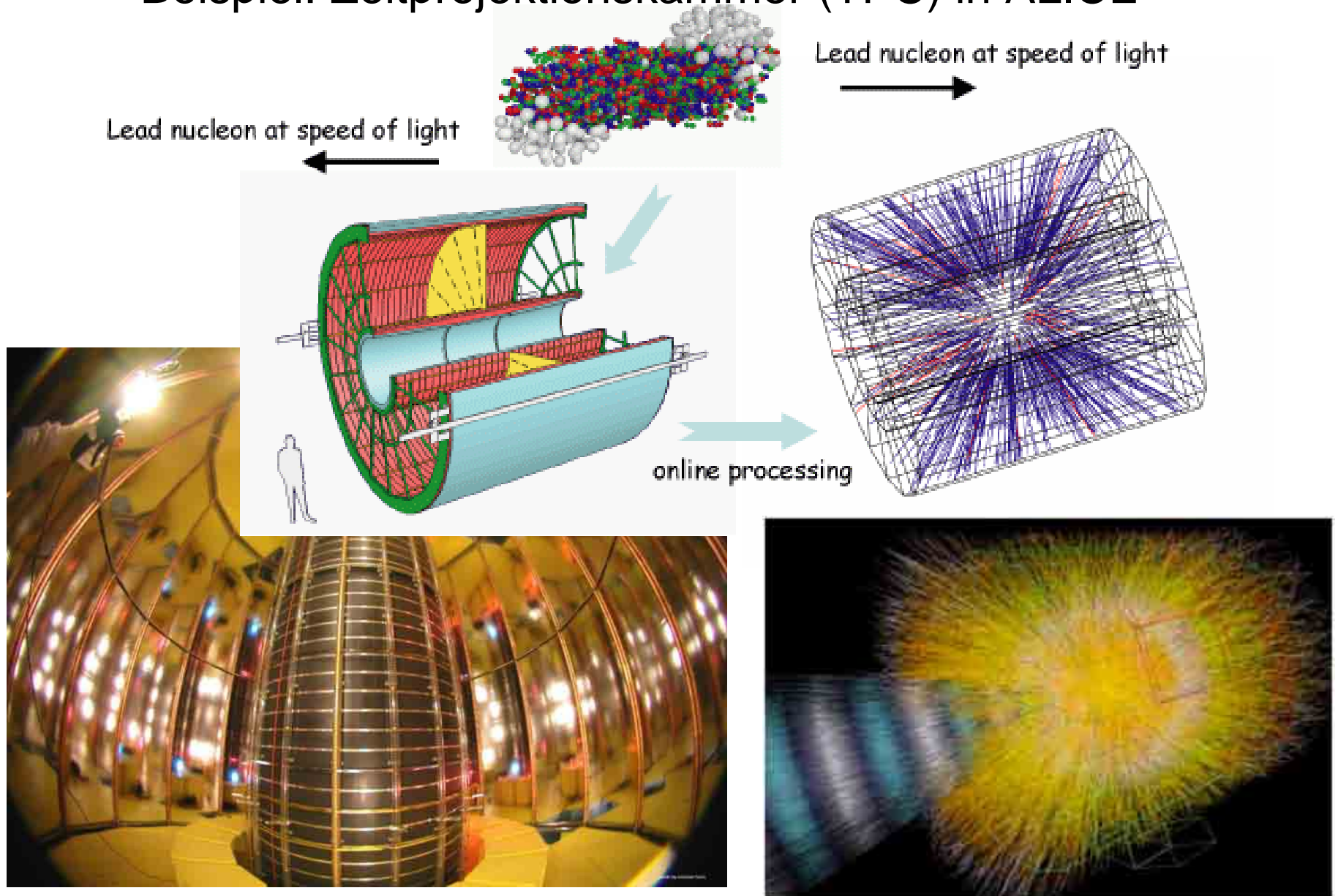


Innerste Lage: Spurdetektoren

- Früher z.B: Blasenkammern, Nebelkammern
manuelle und visuelle Rekonstruktion

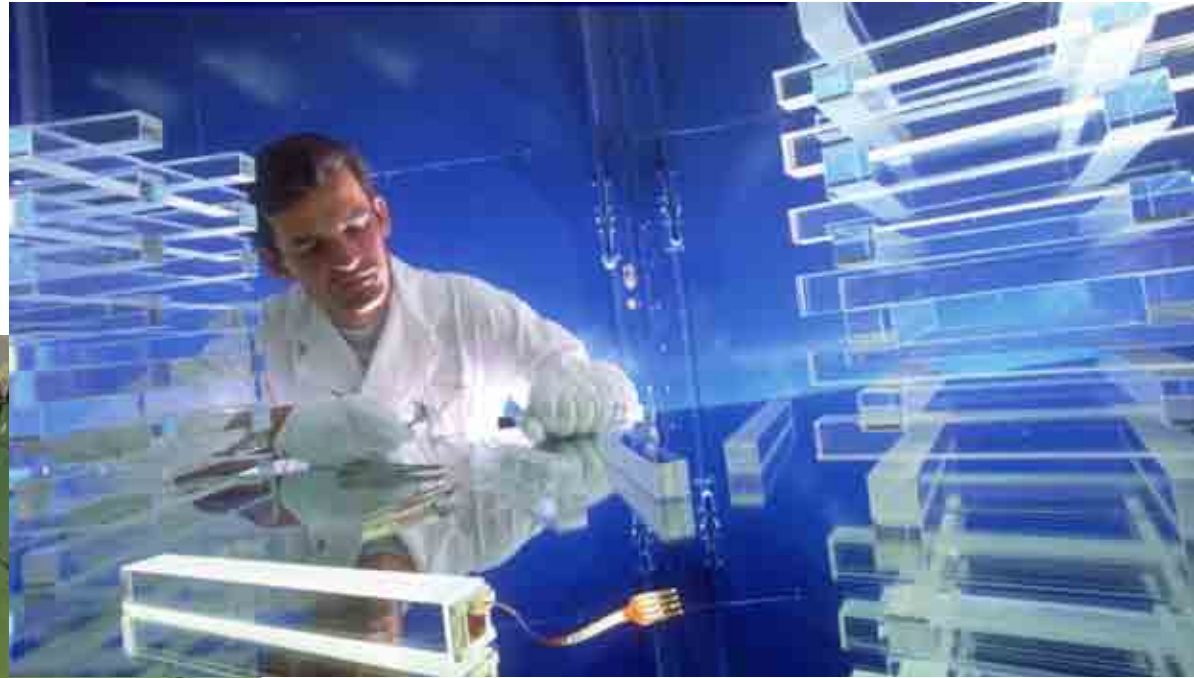


- Heute: digital auslesbar
Beispiel: Zeitprojektionskammer (TPC) in ALICE

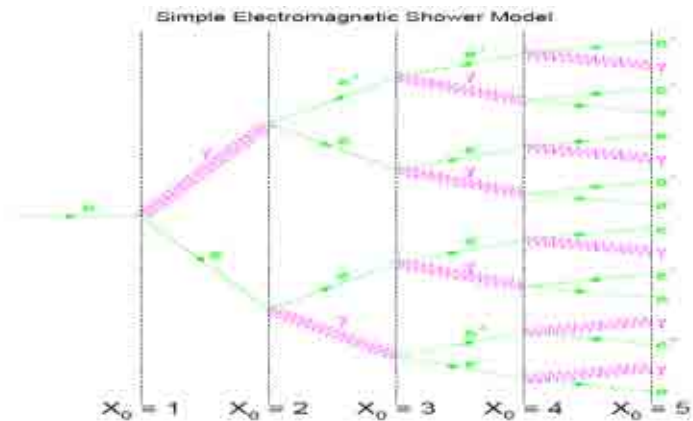


Nächste Lage: Elektromagnetisches Kalorimeter (CMS)

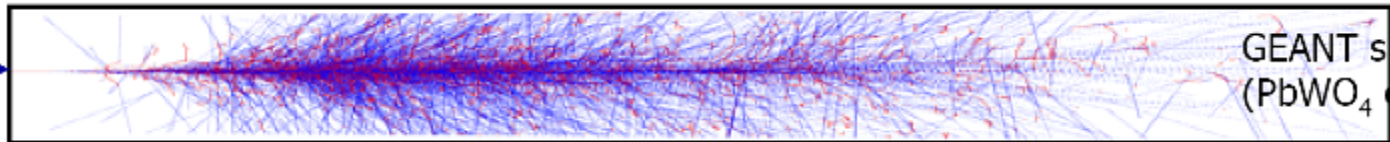
- Ein Kristall:
 - 2cm x 2cm x 23cm
 - $26 X_0$



Wolfgang Funk - CERN CMS



e

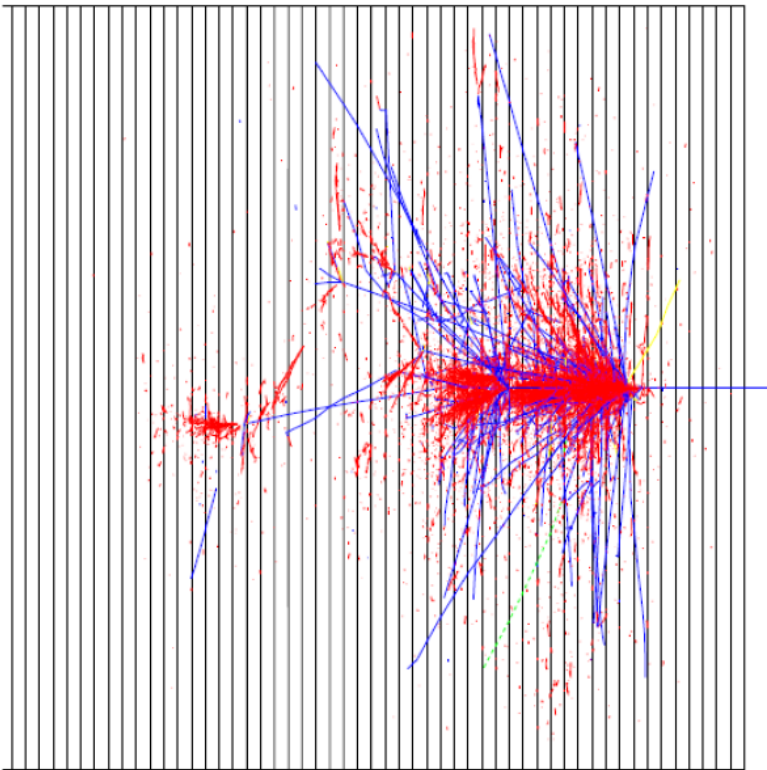


GEANT shower
($PbWO_4$ crystal)

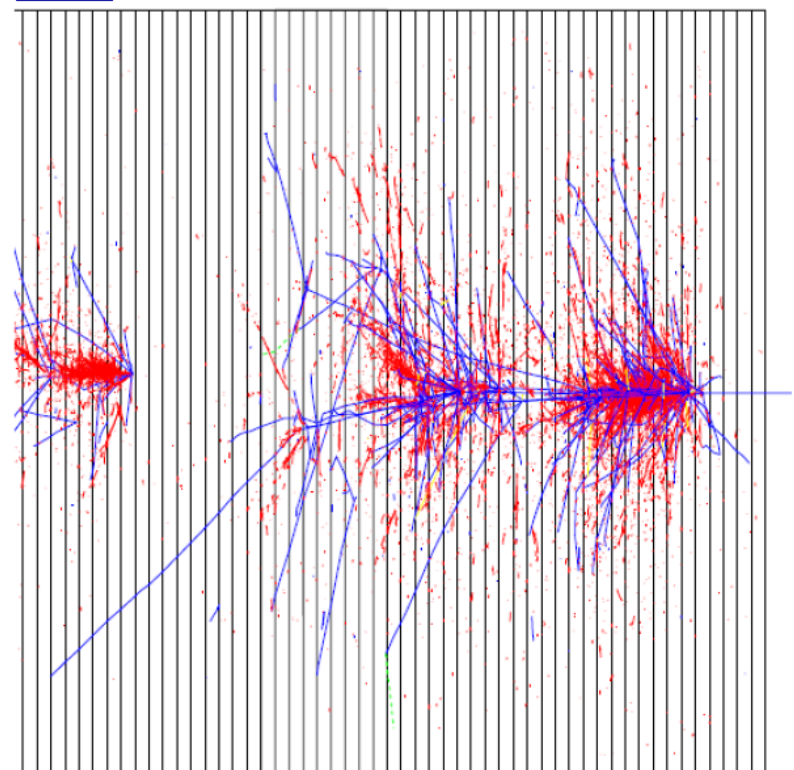
Nächste Lage: Hadronische Kalorimeter

- Hadronische Schauer wesentlich unregelmäßiger
- **Hadronische** und **Elektromagnetische** ($p^0 \rightarrow gg$) Komponente

1.

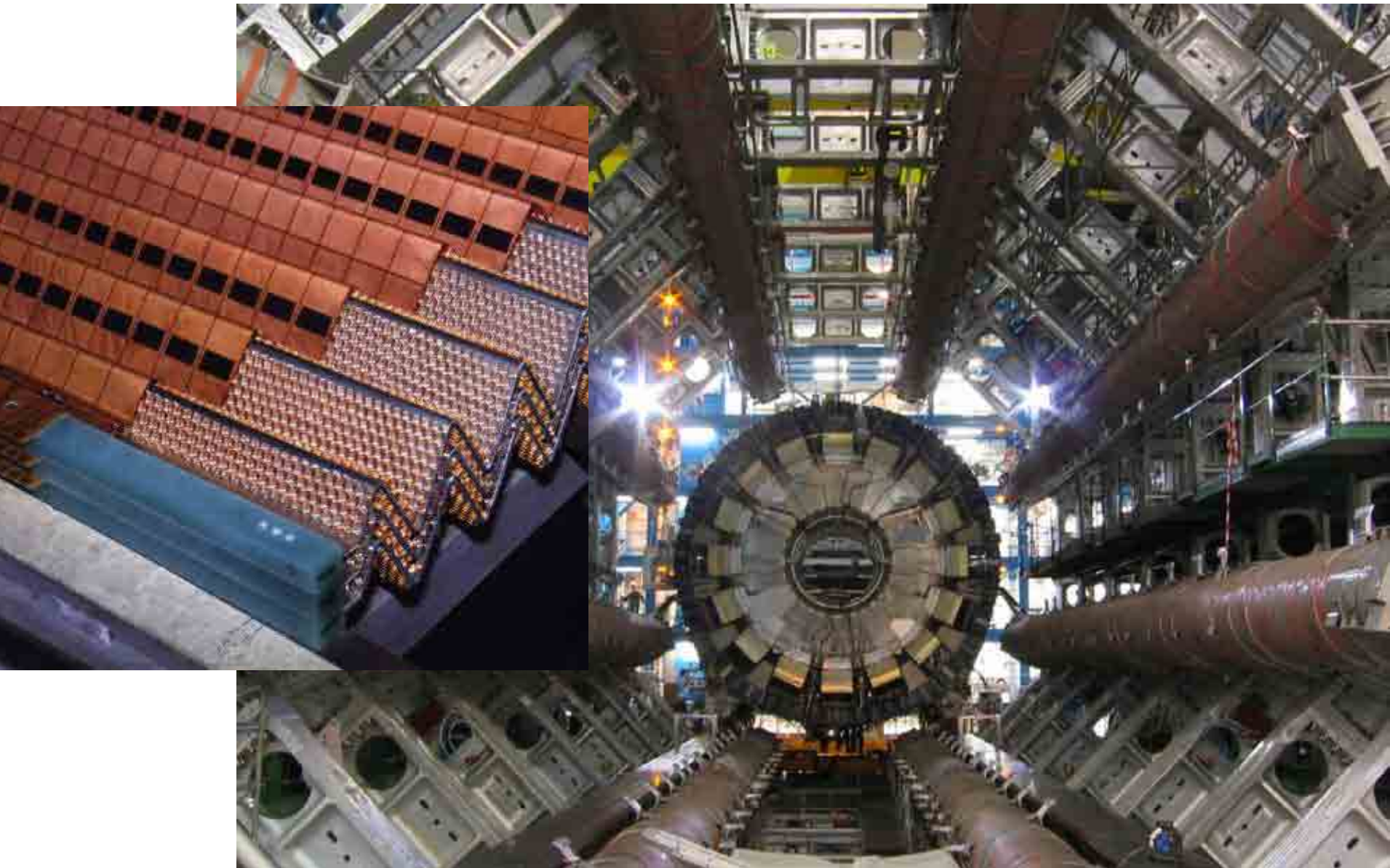


2.

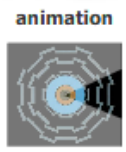


red - e.m. component
blue - charged hadrons

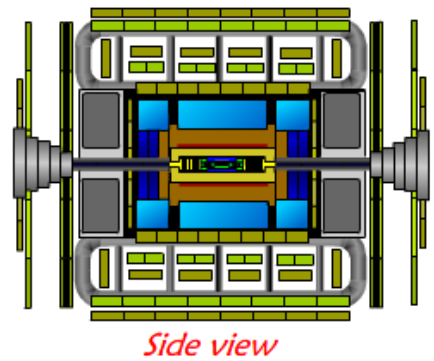
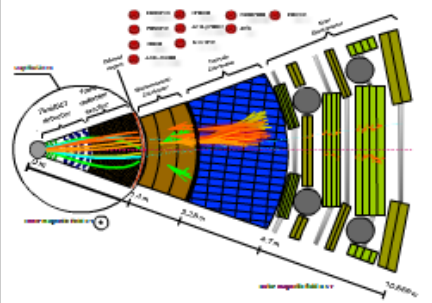
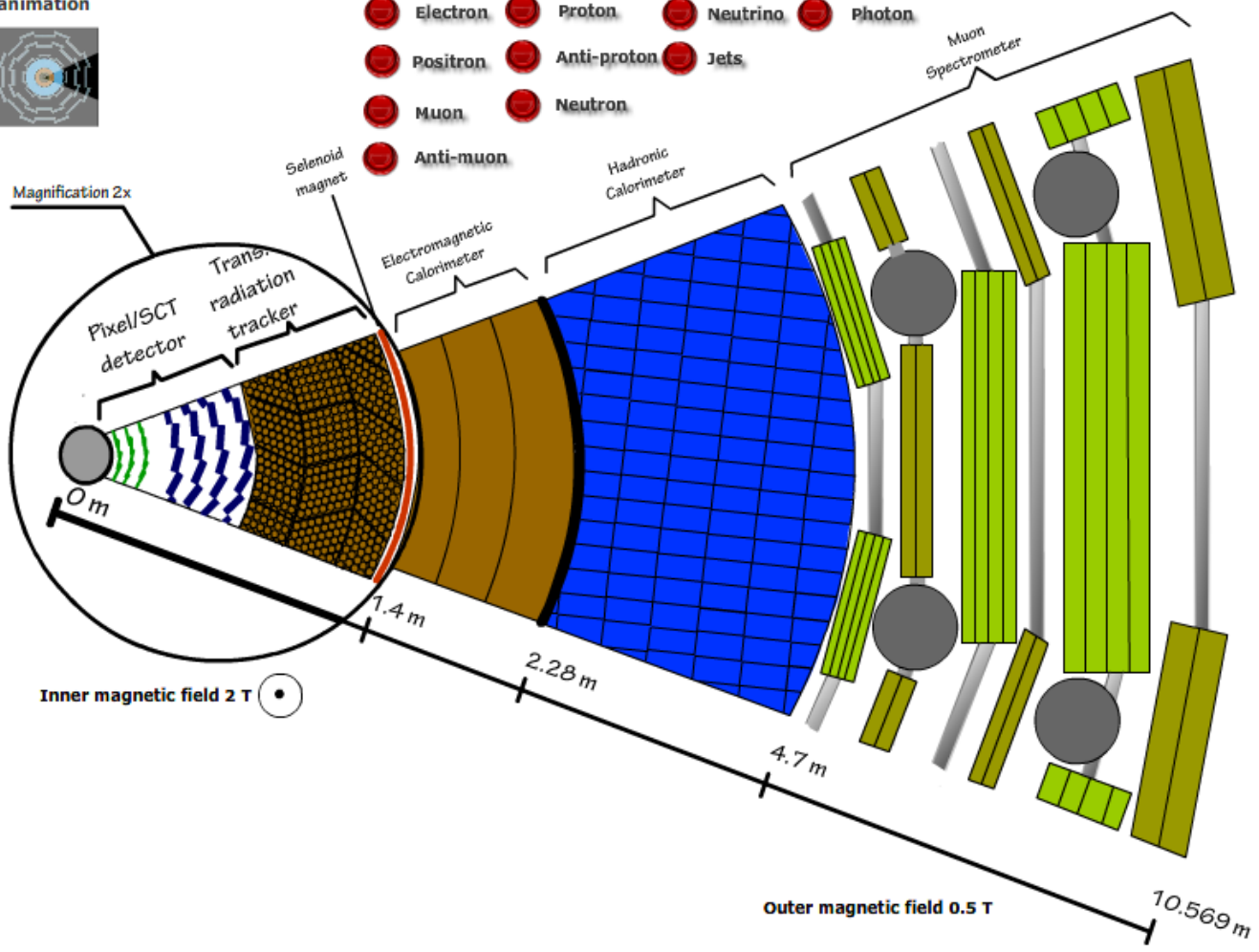
- Das ATLAS Flüssig-Argon Calorimeter: "Akkordeon"



ATLAS



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



Created by Jeřábek, Jende 2010



Atlas_9.swf

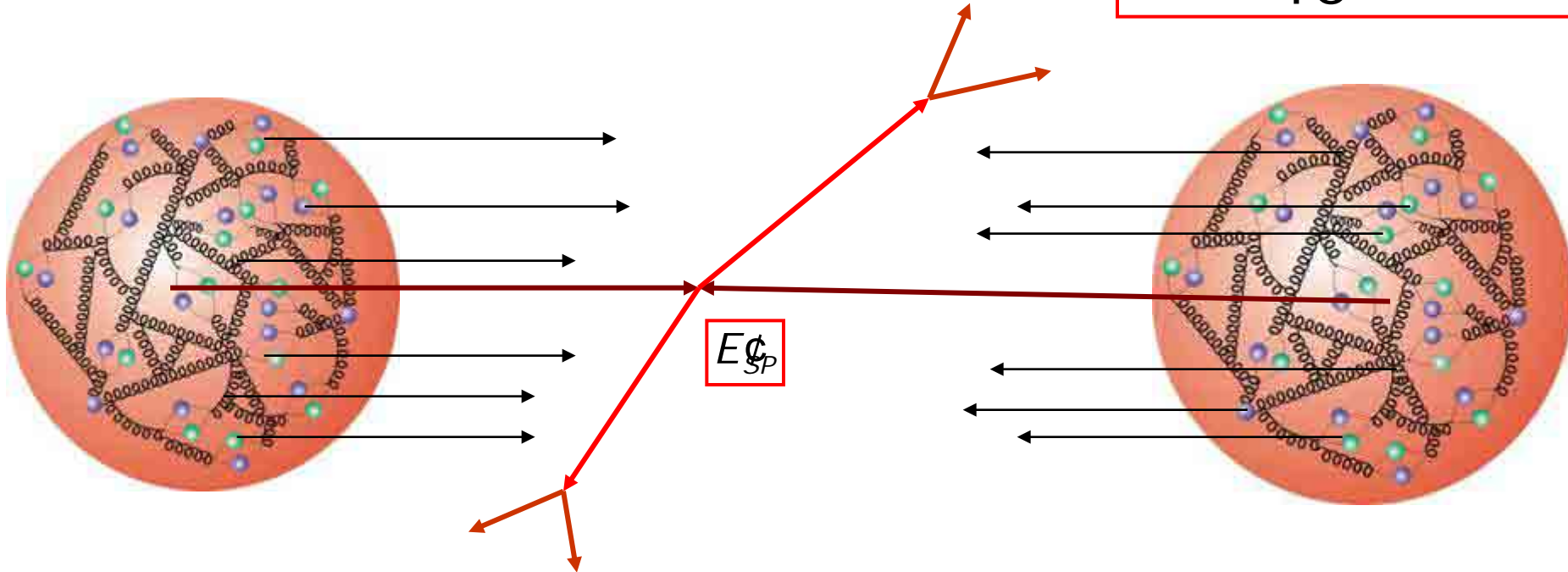
https://kjende.web.cern.ch/kjende/de/wpath_teilchenid1.htm

Was kollidiert da eigentlich?

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

Schwerpunktsenergie der kollidierenden Partonen (q, g)

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

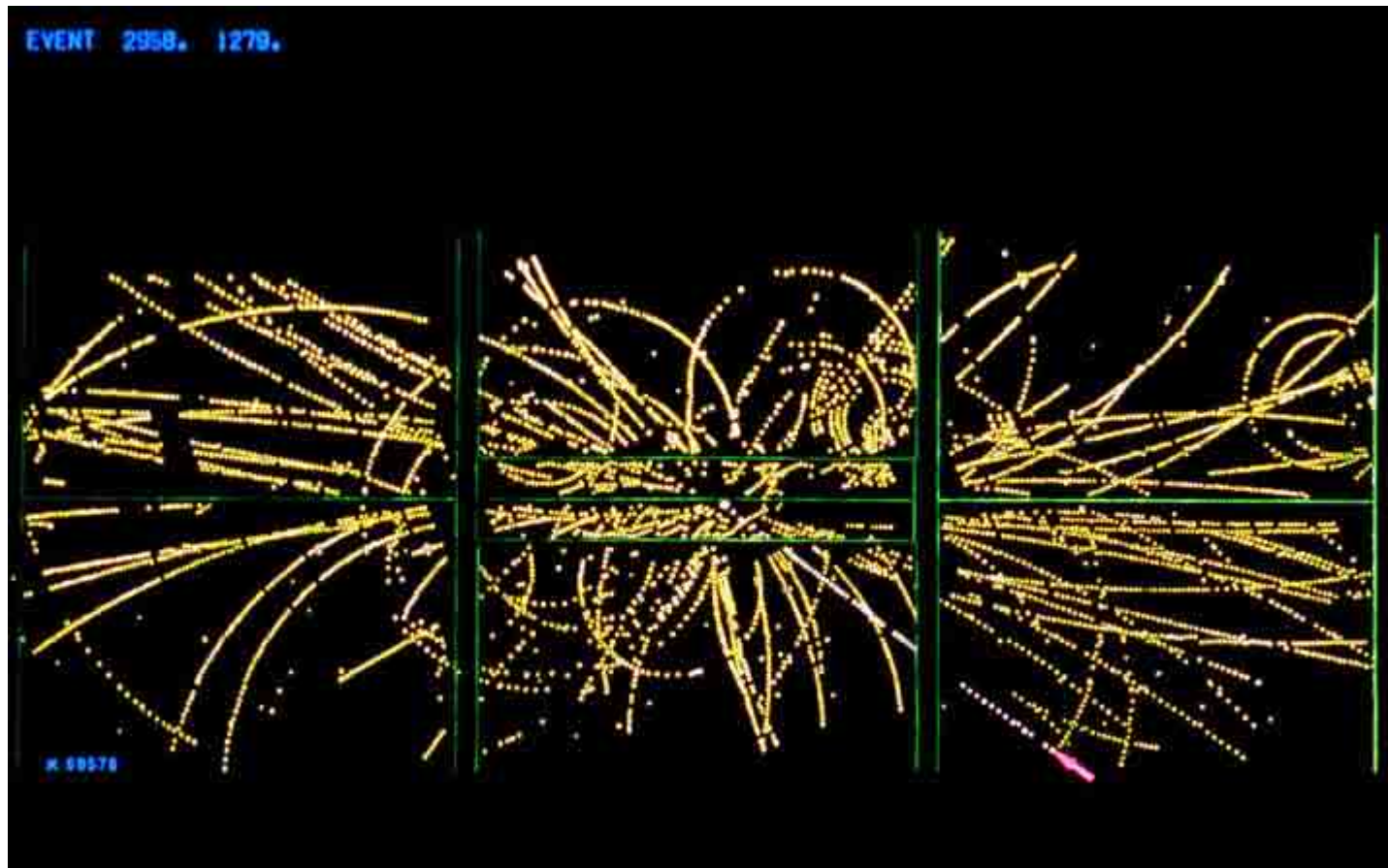


Neue Teilchen mit Massen bis zu ~ 1 TeV (ca. 1000 Protonmassen) erzeugbar

Die Entdeckung des W

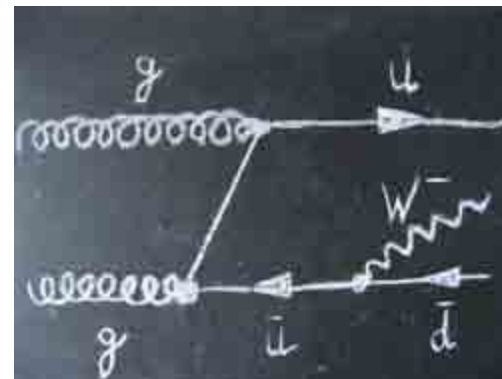
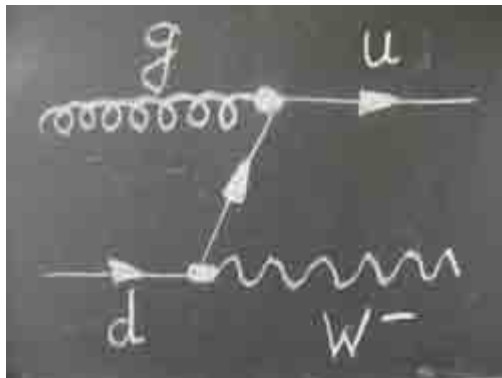
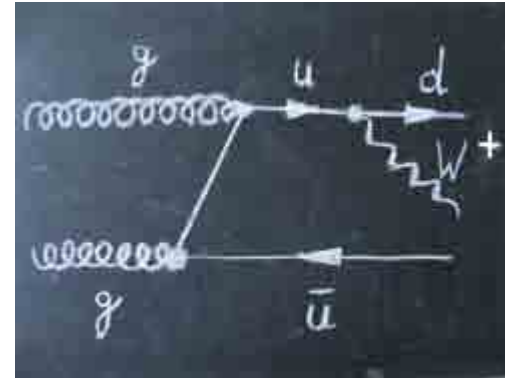
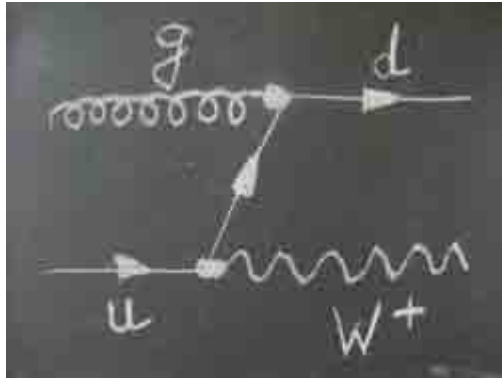
1983 am Super-Antiproton-Proton Synchrotron (S⁻ ppS) am CERN

- 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

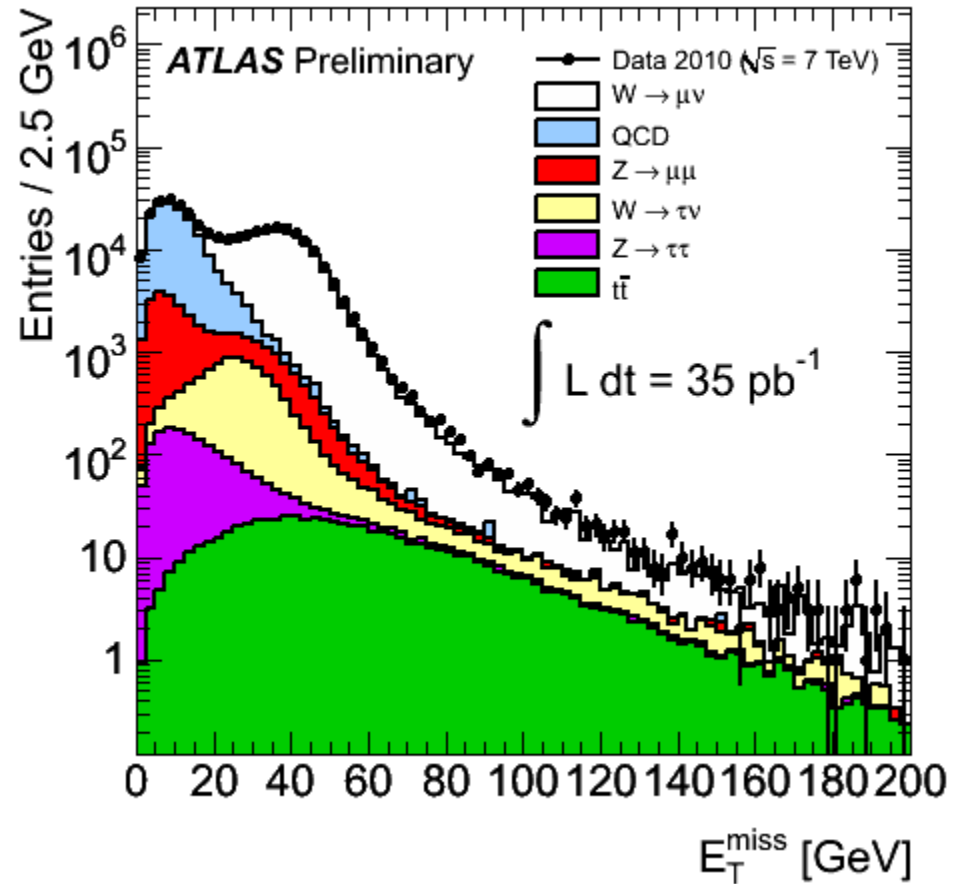
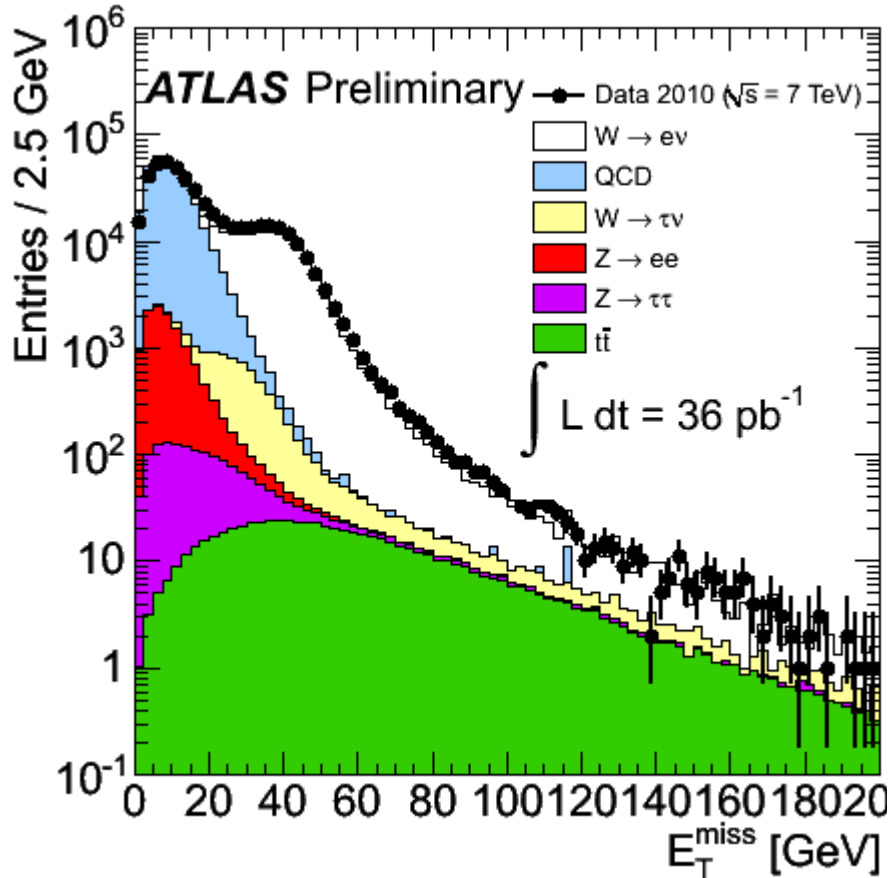
- Entweder durch Gluon-Quark oder Gluon-Gluon



- Aus den auslaufenden Quarks entstehen Jets

Charakteristik

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

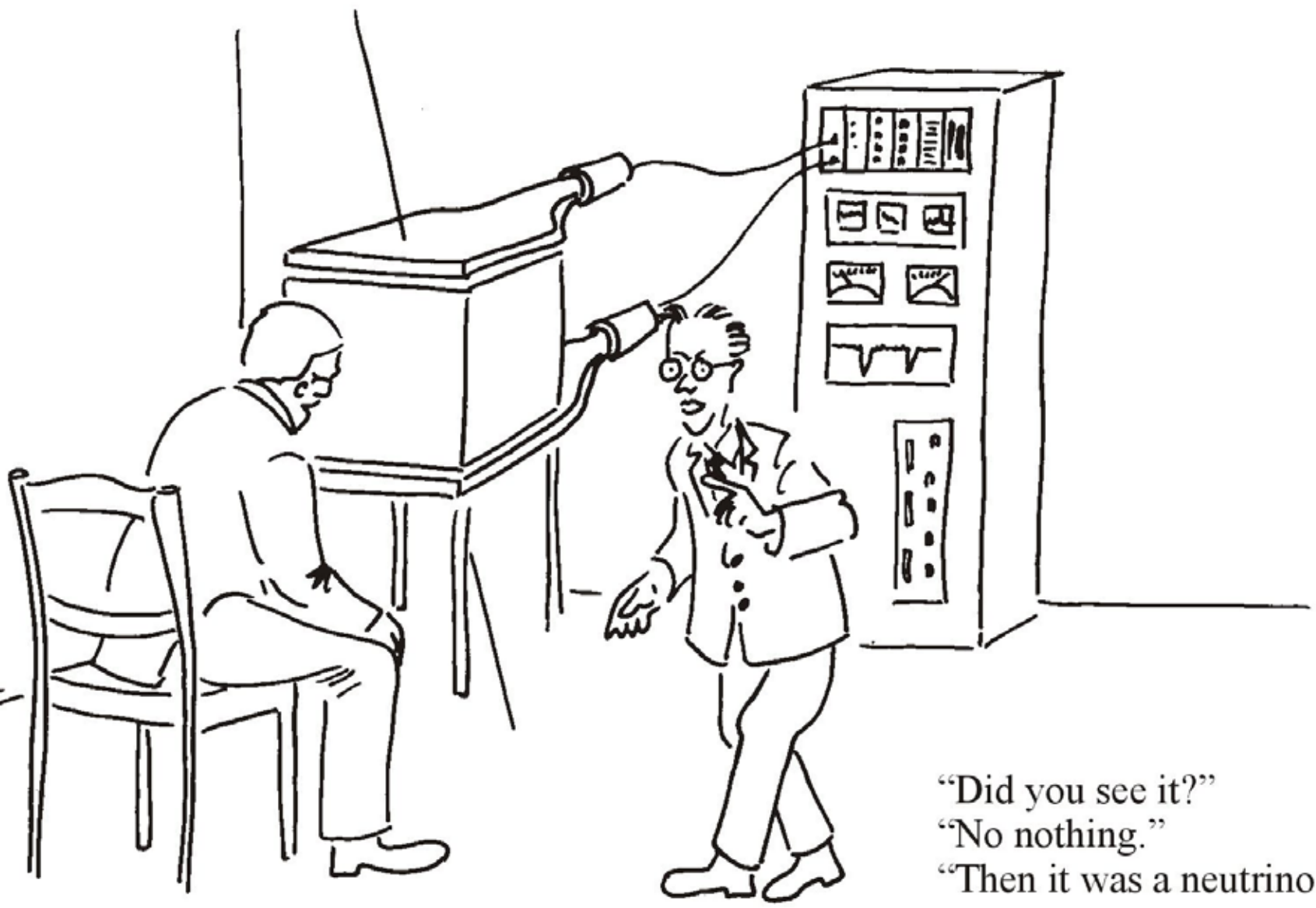


sichtbar: elektrisch geladenes Lepton

$W \rightarrow e\nu$

$W \rightarrow \mu\nu$

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

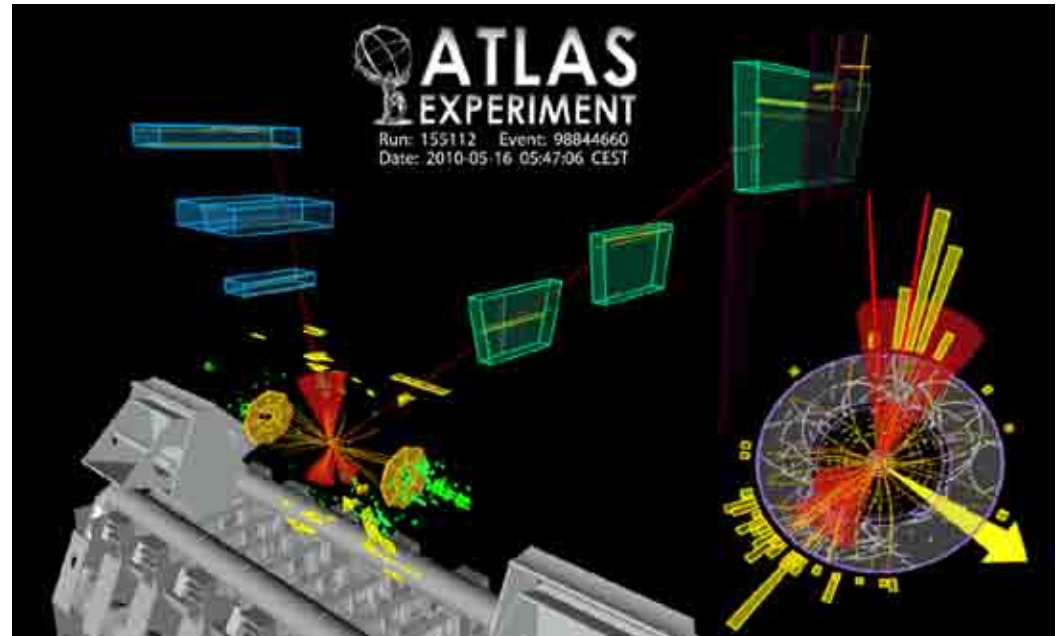
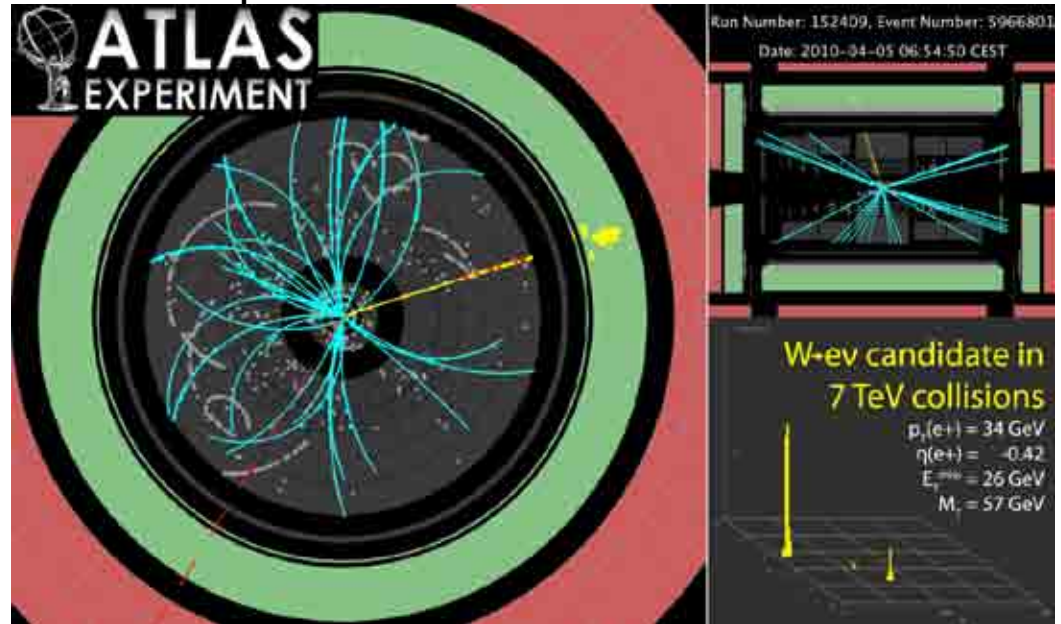
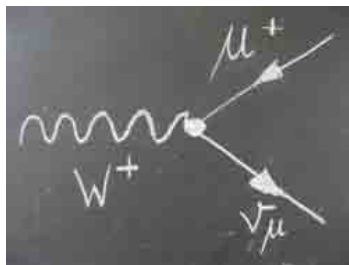
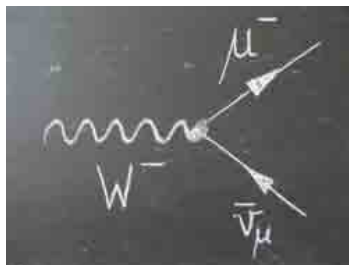
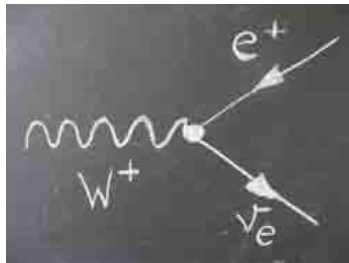
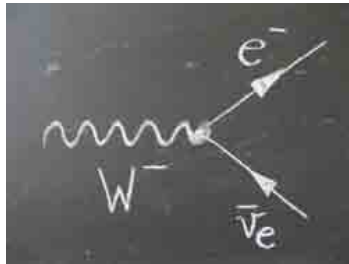


C. G. G. G.

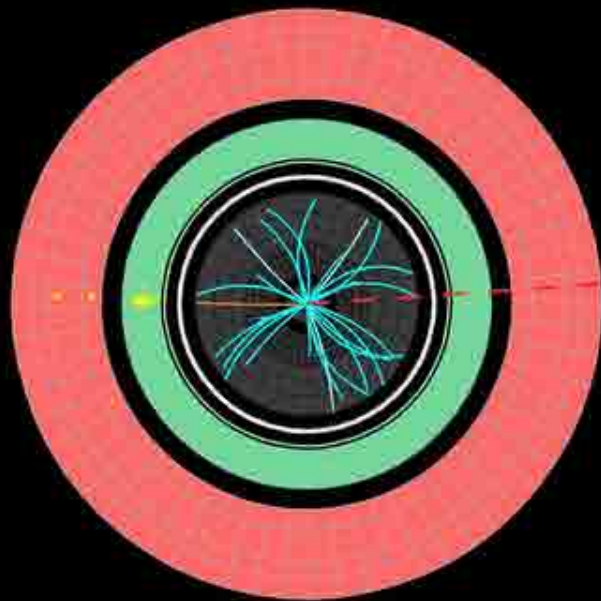
“Did you see it?”
“No nothing.”
“Then it was a neutrino!”

Signaturen des W-Teilchens

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



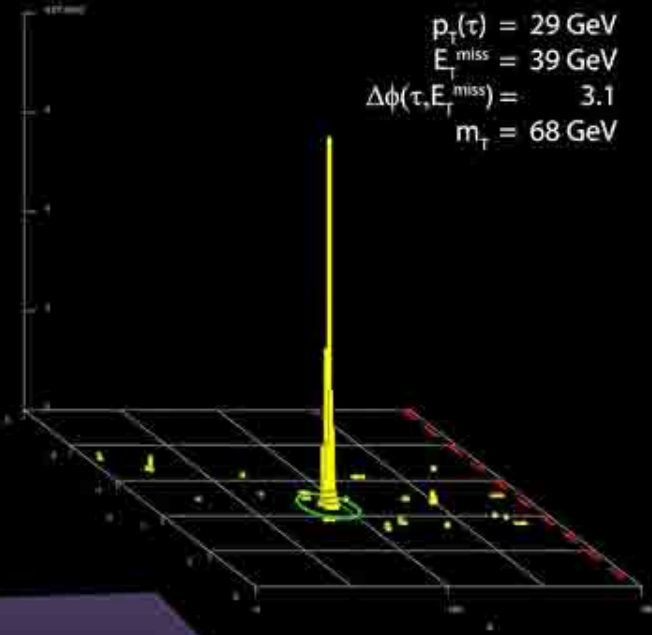
ATLAS Kandidat für $W \rightarrow \tau \nu$



 **ATLAS**
EXPERIMENT

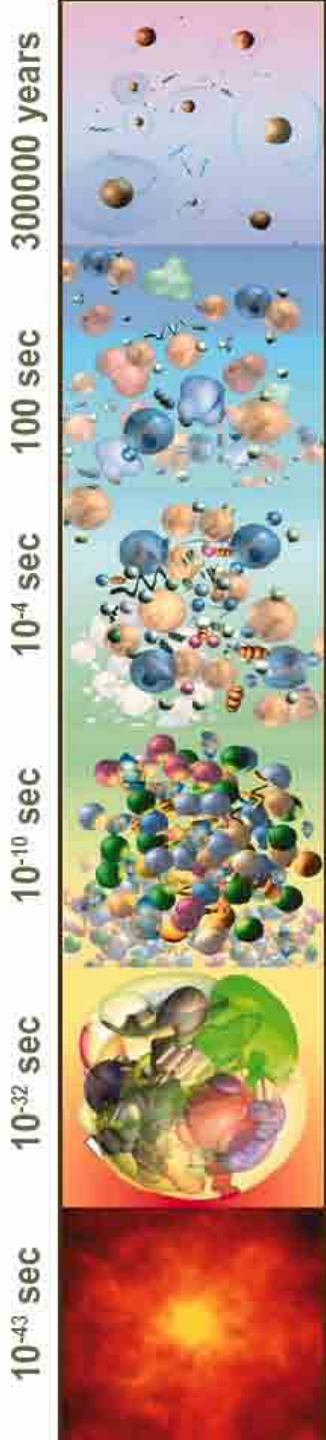
Run 155697, Event 6769403
Time 2010-05-24, 17:38 CEST

$W \rightarrow \tau \nu$ candidate in
7 TeV collisions

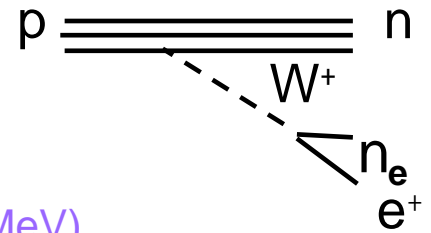


Visueller Nachweis fast unmöglich → heute nicht verwendet

Massen der Teilchen



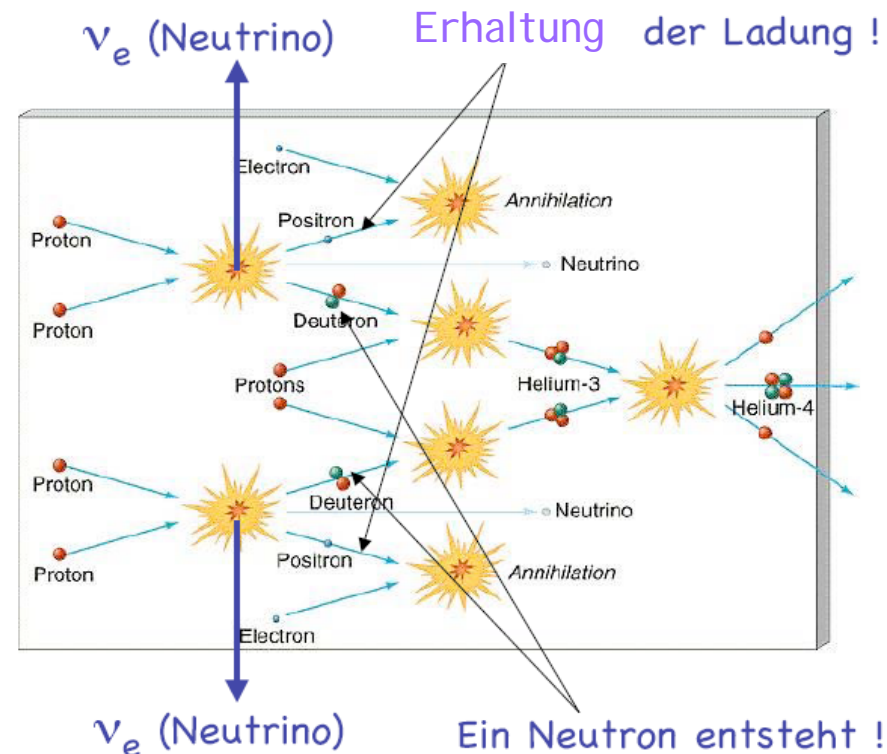
- Unter Benützung experimenteller Teilchenmassen beschreibt Theorie der schwachen Kraft alles, z.B.
- langsames Brennen der Sonne
 - $p + p \rightarrow D + e^+ + n$ (Energiegewinn: $\Delta E = 0,9 \text{ MeV}$)
 - Masse des Zwischenzustands $m_W = 80400 \text{ MeV}$
 - Rate unterdrückt um $\sim (\Delta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



Fundamentales Problem

(MeV)	Experim.	Theorie
m_W	80400	0
m_Z	91200	0
m_e	0,5	0
m_t	173000	0
...		

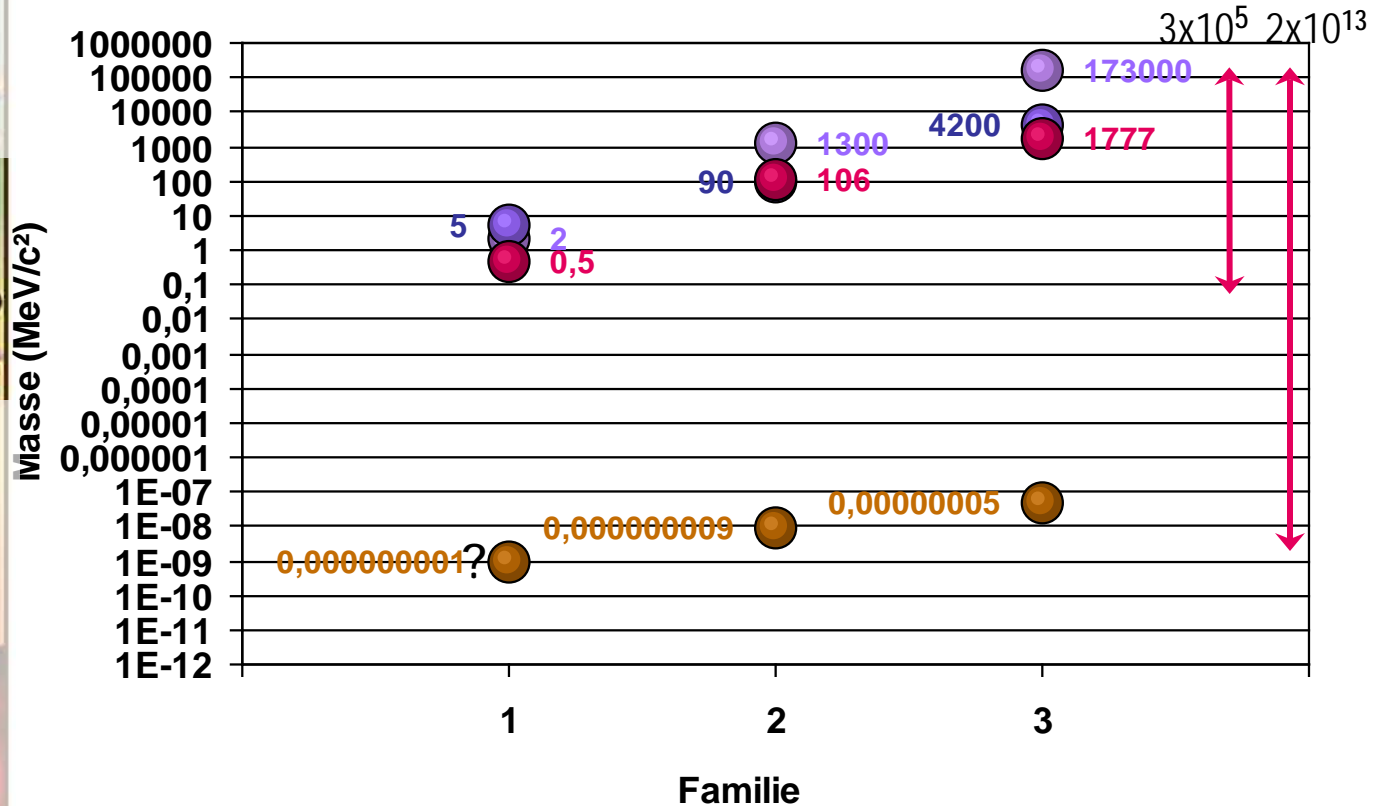
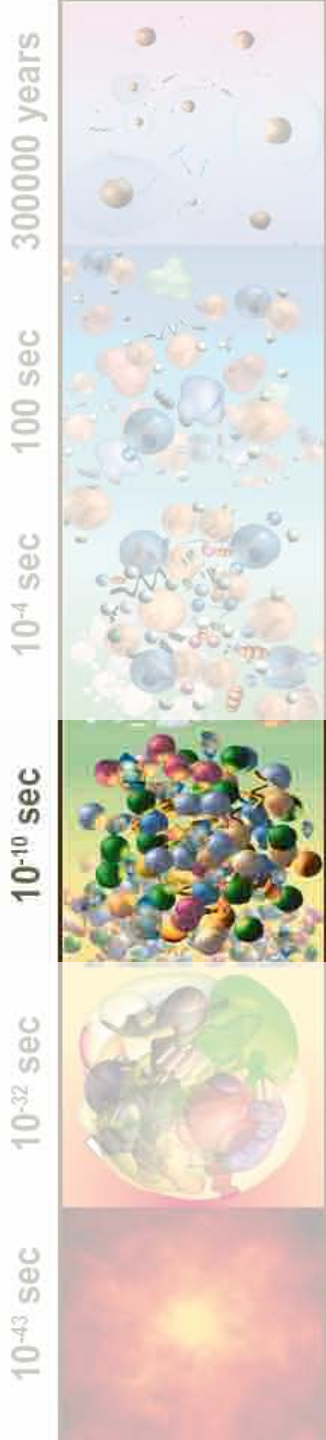
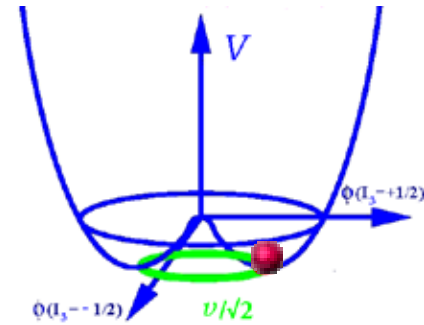
- Grund: schwache Eichsymmetrie



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

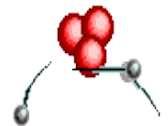
- Ⓡ **Beispiel: Elektron**
- Ⓡ Einfluss auf Größen- und Energieskala der Atome (Moleküle, Festkörper, Lebewesen, ...)

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

- Ⓡ Bindungsenergie steigt mit m_e

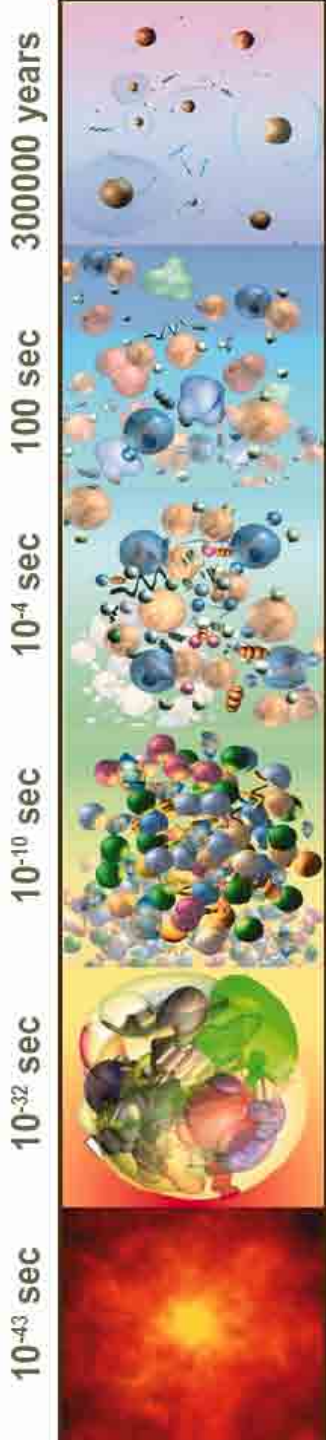
$$E_0(m_e) = -\frac{1}{2} Z^2 a_{em}^2 m_e$$

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

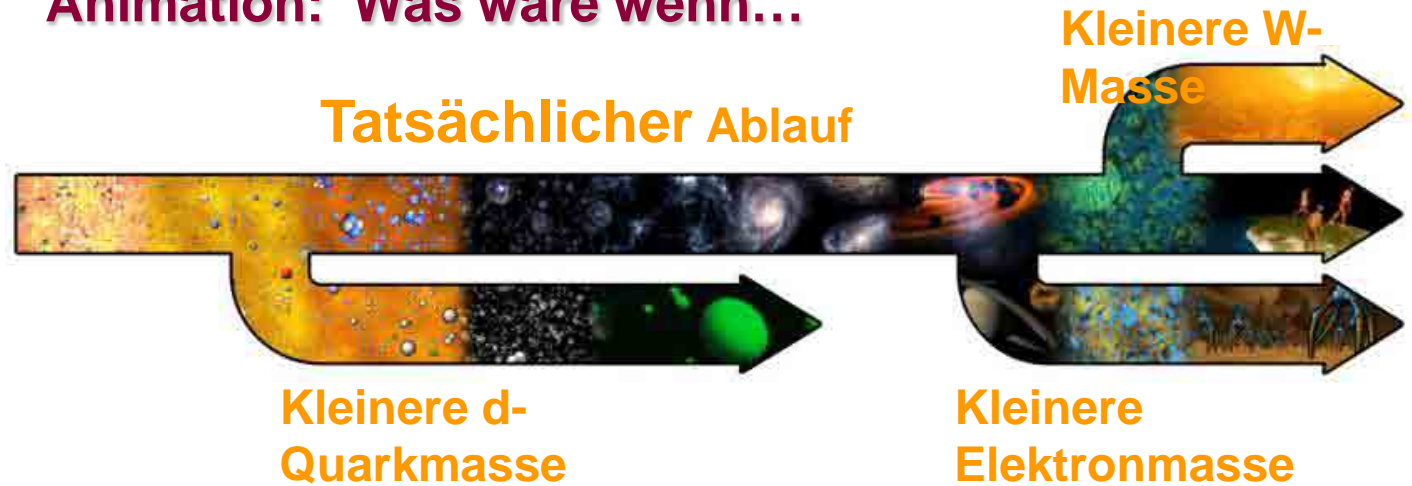
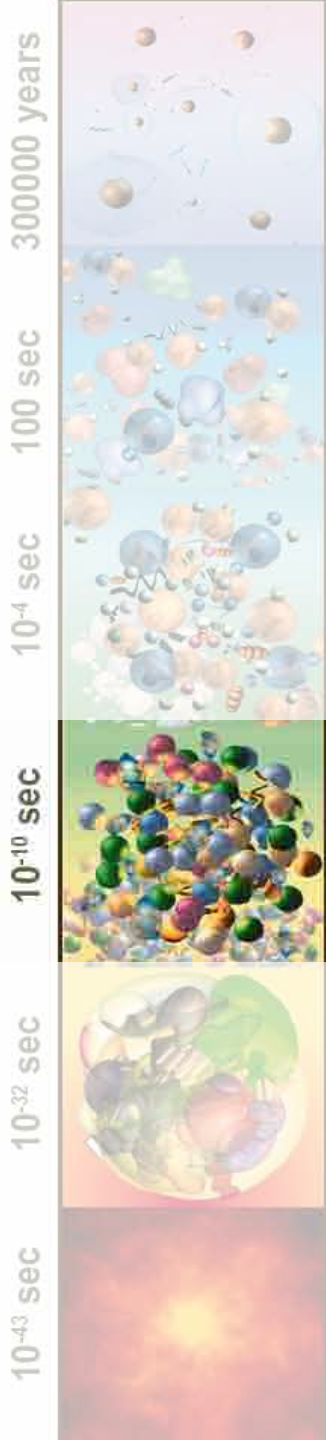


- Ⓡ Größe der Atomhülle (Bohr—Radius) fällt mit $1 / m_e$

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



Animation: Was wäre wenn...



View Online: www.youtube.com/watch?v=p5cPg62z8xs

Download: : 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
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?

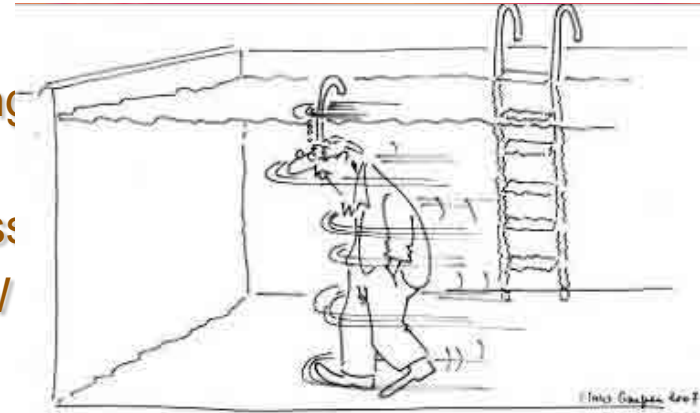
“Leeres” Vakuum

- Alle Teilchen sind masselos
- bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit



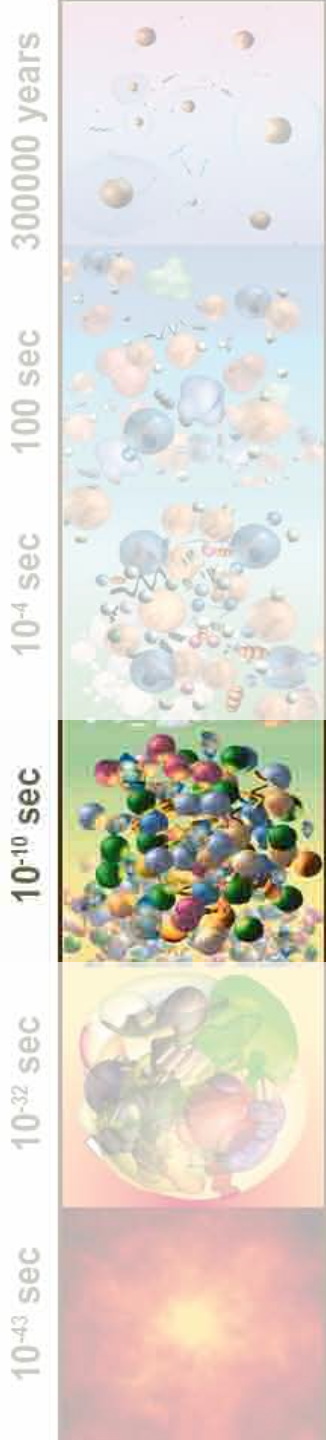
Vakuum mit Hintergrundfeld

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



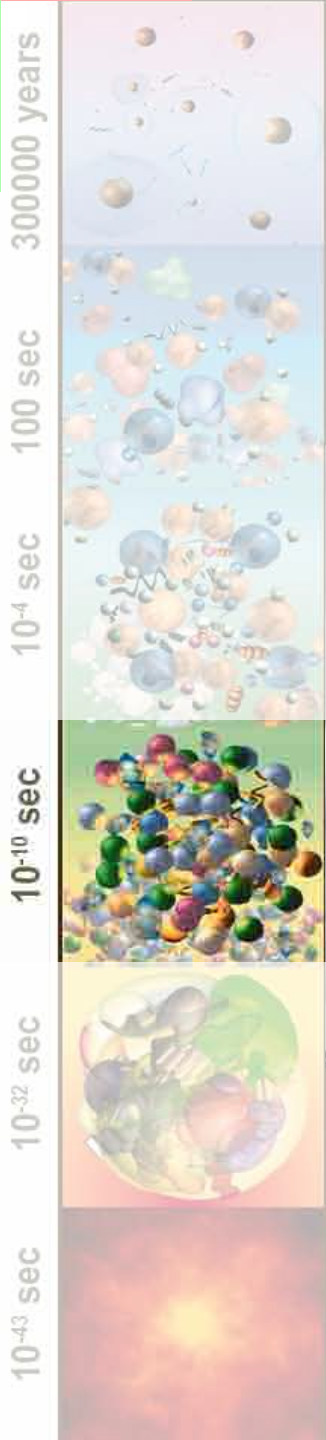
Higgs-Teilchen

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



Mechanische Analogie zur Higgs Produktion

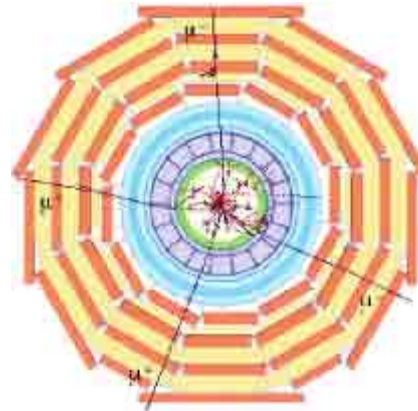
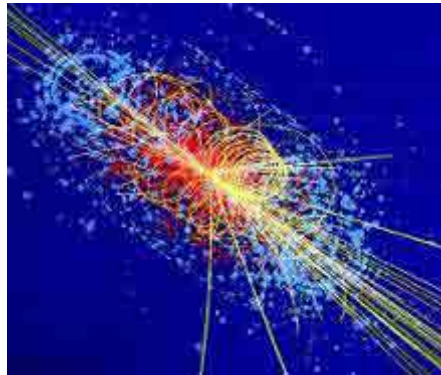
- n Luft (~ Hintergrundfeld) normalerweise kaum zu spüren
am Besten erfahrbar, wenn in Bewegung
- n Objekte hoher Energie erzeugen Anregungen der Luft
- n Objekte hoher Masse erzeugen Anregung im Hintergrundfeld
= Higgs-Teilchen



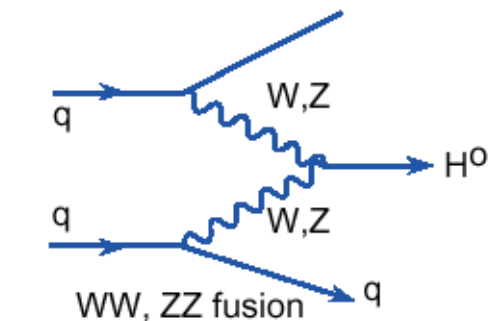
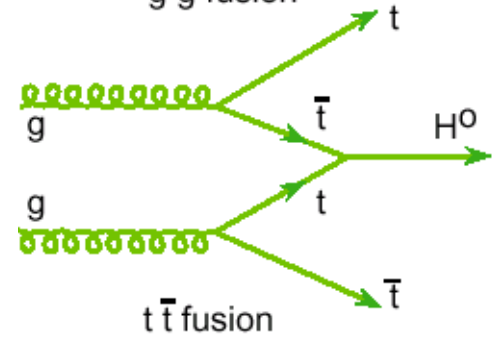
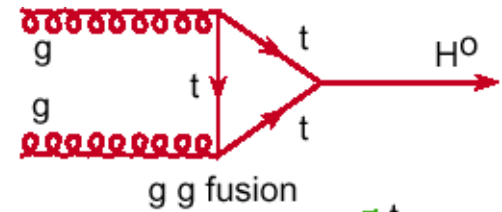
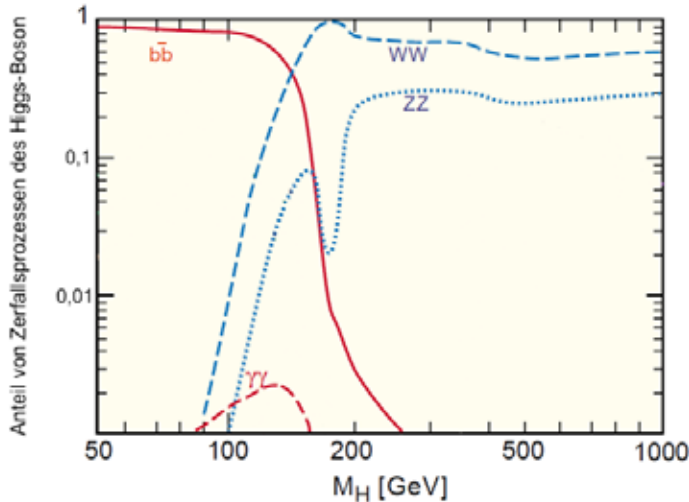
Higgs Suche am LHC

n Higgs Masse unbekannt:

- Viele Produktionsmechanismen
- Viele mögliche Zerfälle



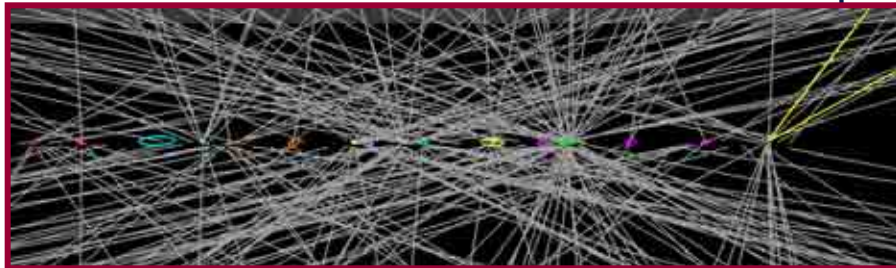
• Als Funktion der Masse vorhersagbar



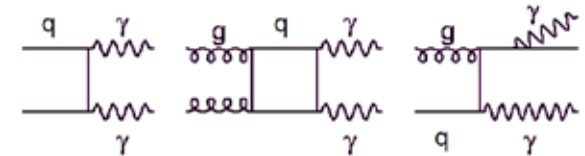
300000 years
100 sec
10⁻⁴ sec
10⁻¹⁰ sec
10⁻³² sec
10⁻⁴³ sec



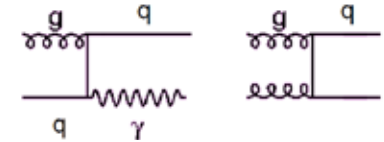
- ✓ Empfindlichster Kanal bei $m_H < 120$ GeV
- ✓ Zweitempfindlichster Kanal bei $120 < m_H < 130$ GeV
- ✓ Erwartung kleines Signal bei sehr großem Untergrund
- ✓ Zusätzliches Problem:
Überlagerung vieler pp-Kollisionen
Photonen besitzen keine Teilchenspur !



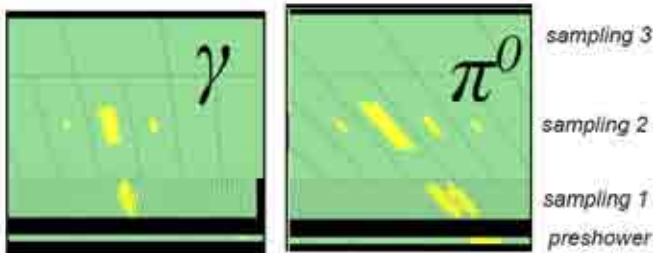
- Irreducible



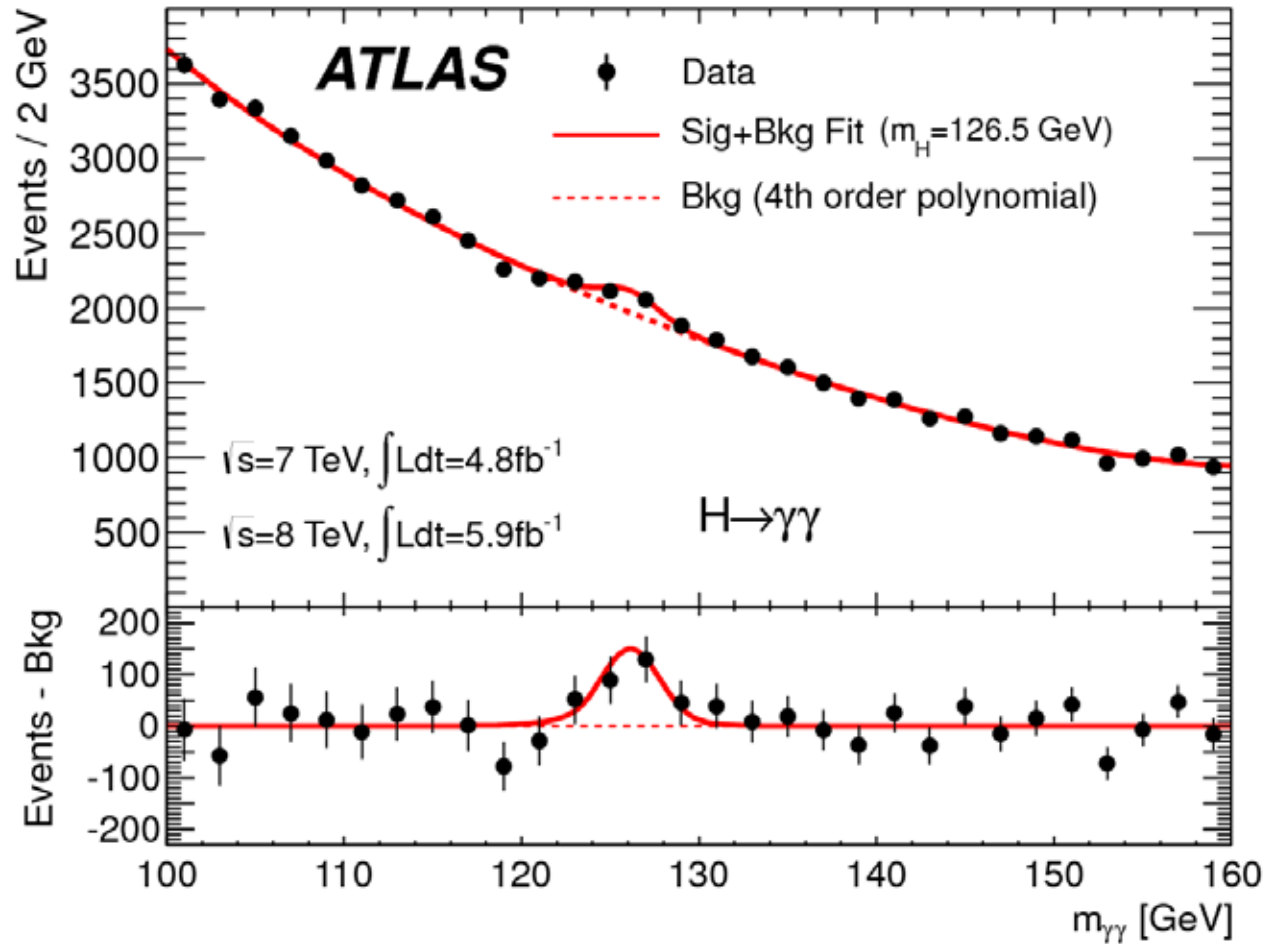
- Reducible : one or more jets misidentified as photons



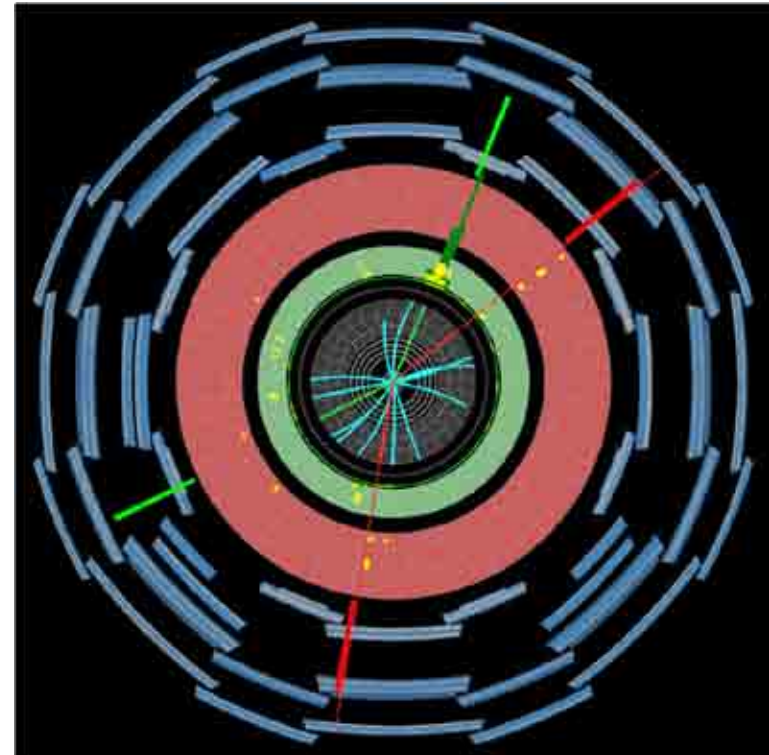
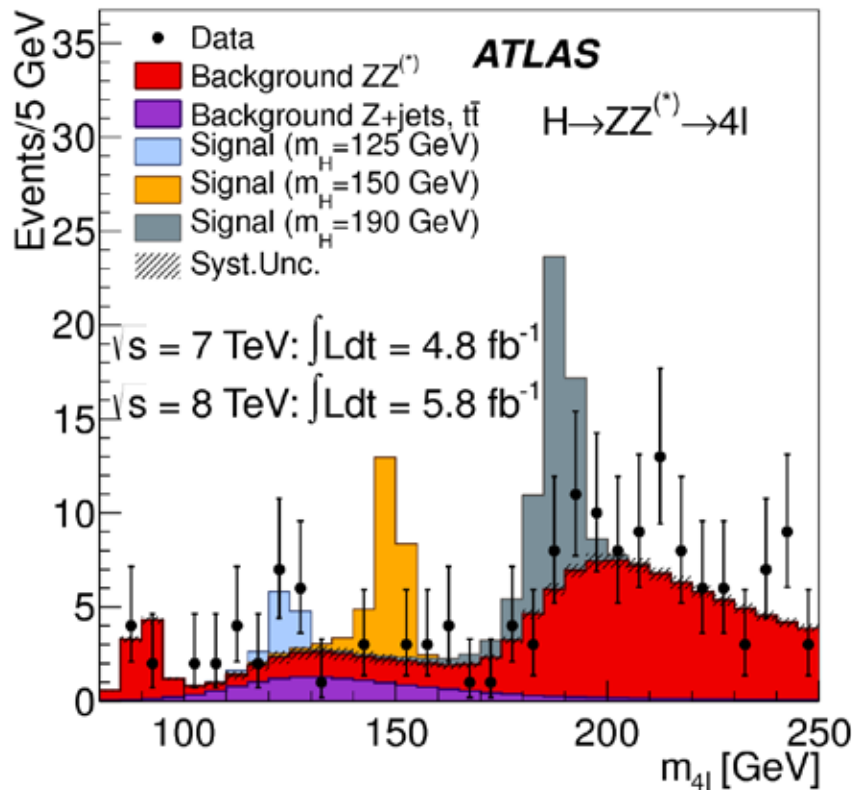
- ✓ Kalorimeter-Segmentierung hilft gegen p^0 Untergrund und falsche Kombinationen von Vertex-„Aufhäufungen“
 - Extrapolation ergibt Vertex-Zuordnung mit Präzision von wenigen mm



Wenn Photonen aus Higgs-Zerfall,
dann ist dessen Masse berechenbar:
 $m_{gg}^2 = 2E_1E_2(1-\cos\theta)$



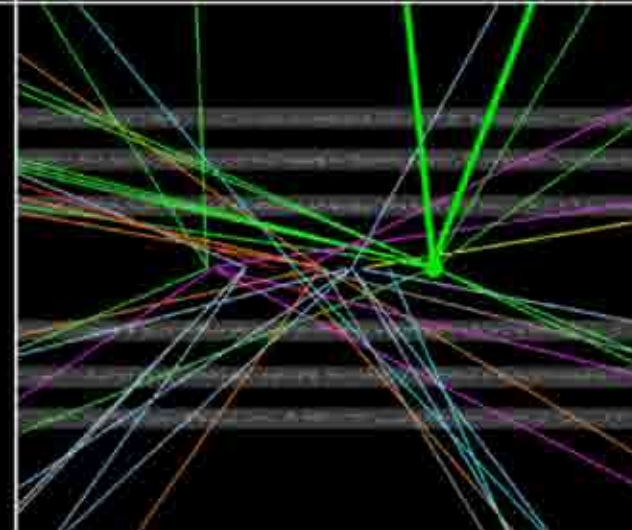
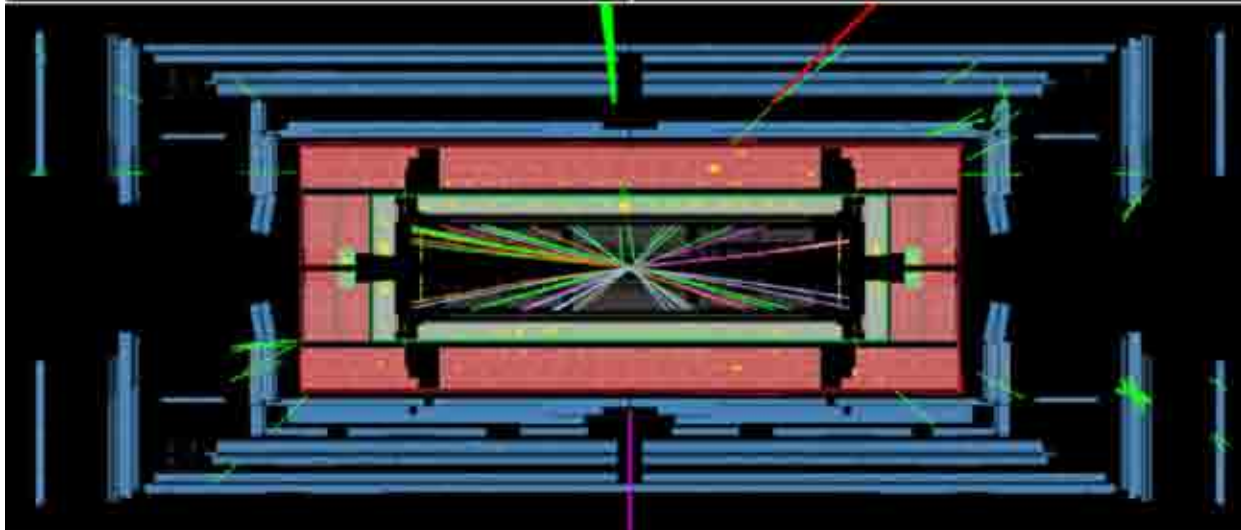
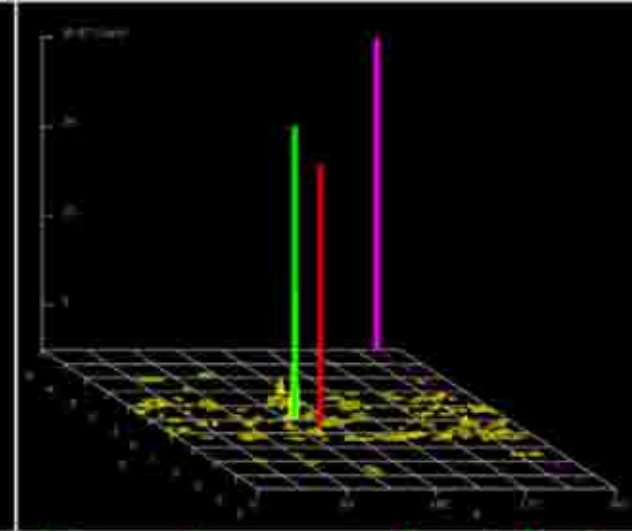
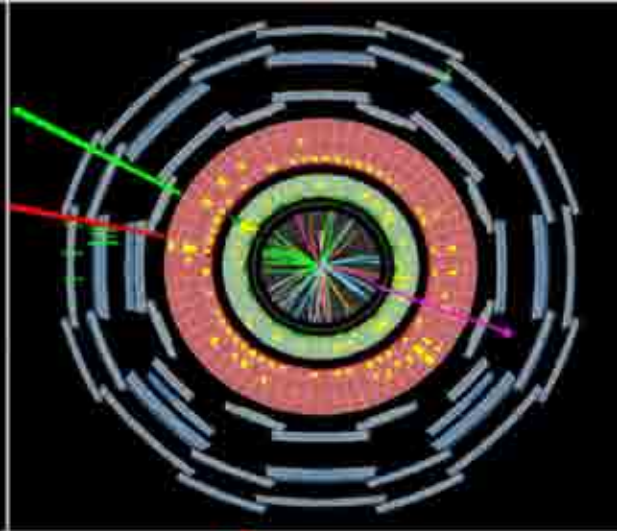
- ✓ „Goldener Kanal“ (praktisch kein Untergrund außer ZZ ohne Higgs)
- ✓ **Sensitivster Endzustand für $200 \text{ GeV} < m_H < 275 \text{ GeV}$**
- ✓ zweitensensitivster (nach WW) für $130 \text{ GeV} < m_H < 200 \text{ GeV}$
- ✓ **Sehr gute Massenrekonstruktion möglich**



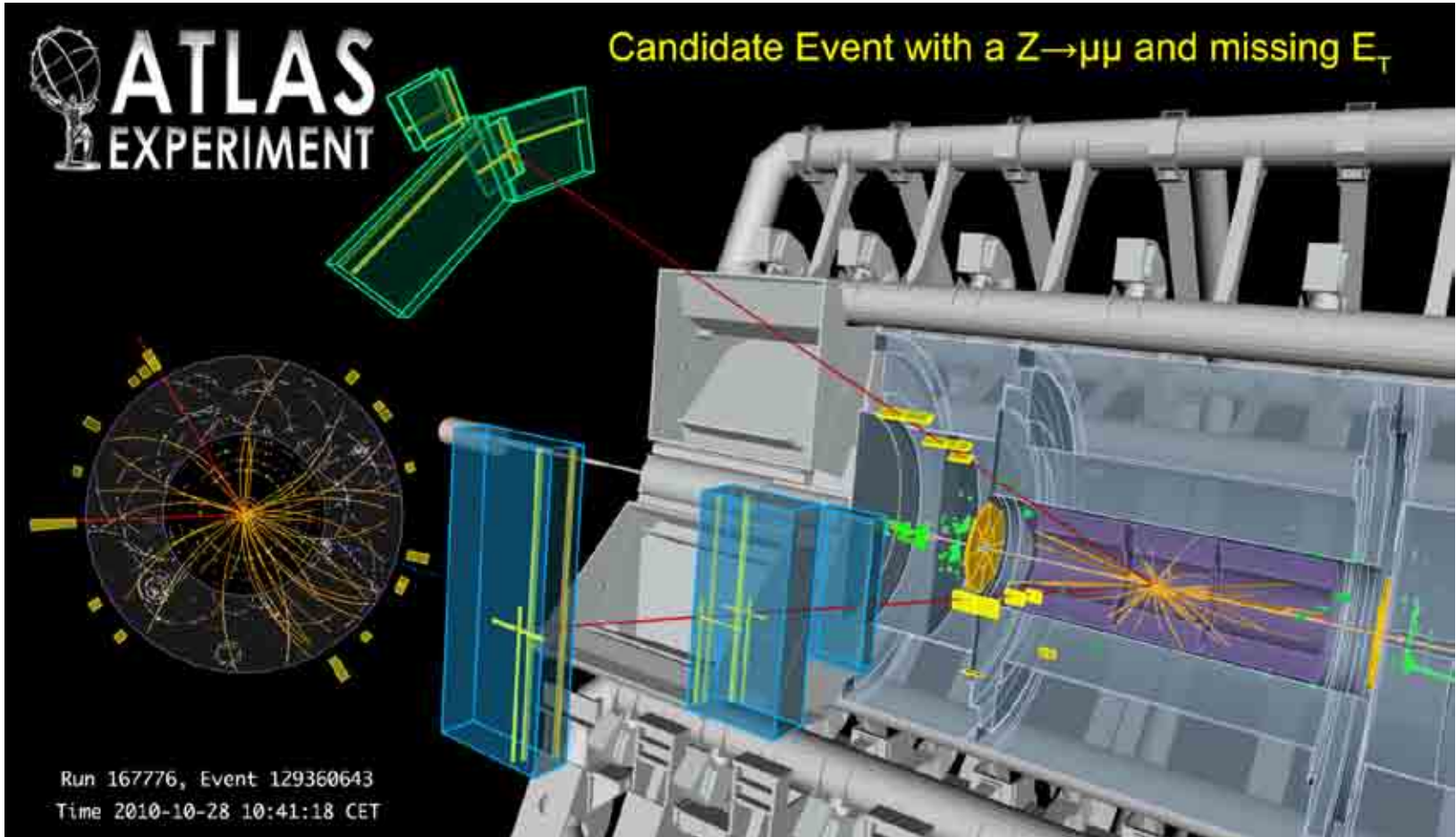


ATLAS
EXPERIMENT

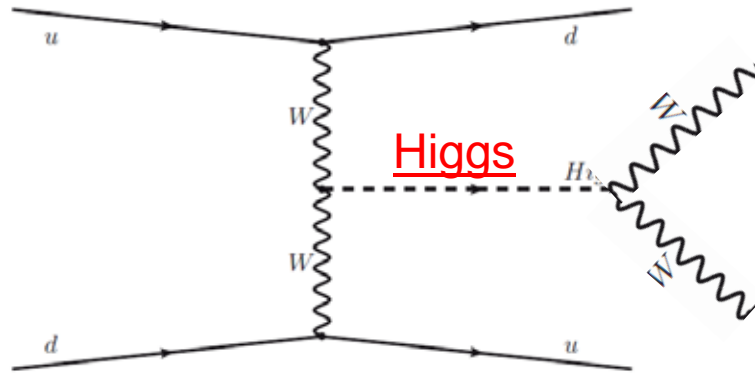
Run Number: 204026, Event Number: 33133446
Date: 2012-05-28 07:23:47 CEST



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

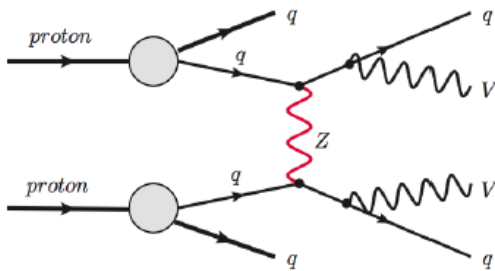


n Gesuchtes Signal $H \rightarrow W^+ W^-$

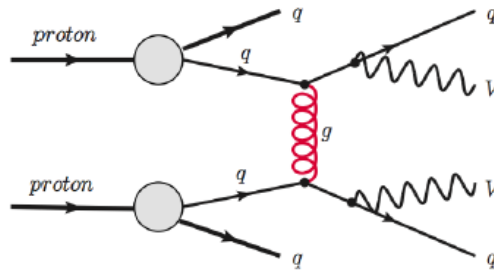


n Untergrund aus anderer $W^+ W^-$ Erzeugung oder scheinbare WW

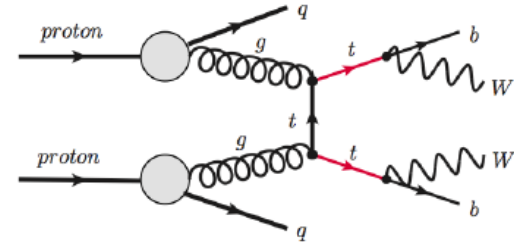
A) EW



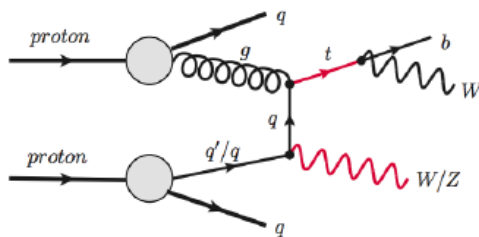
B) QCD



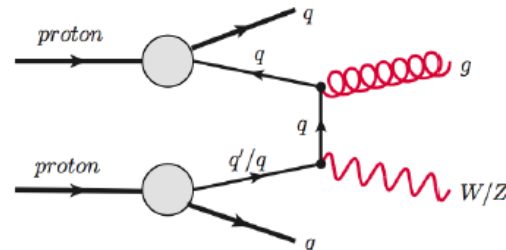
C) Top pairs



D) Single top

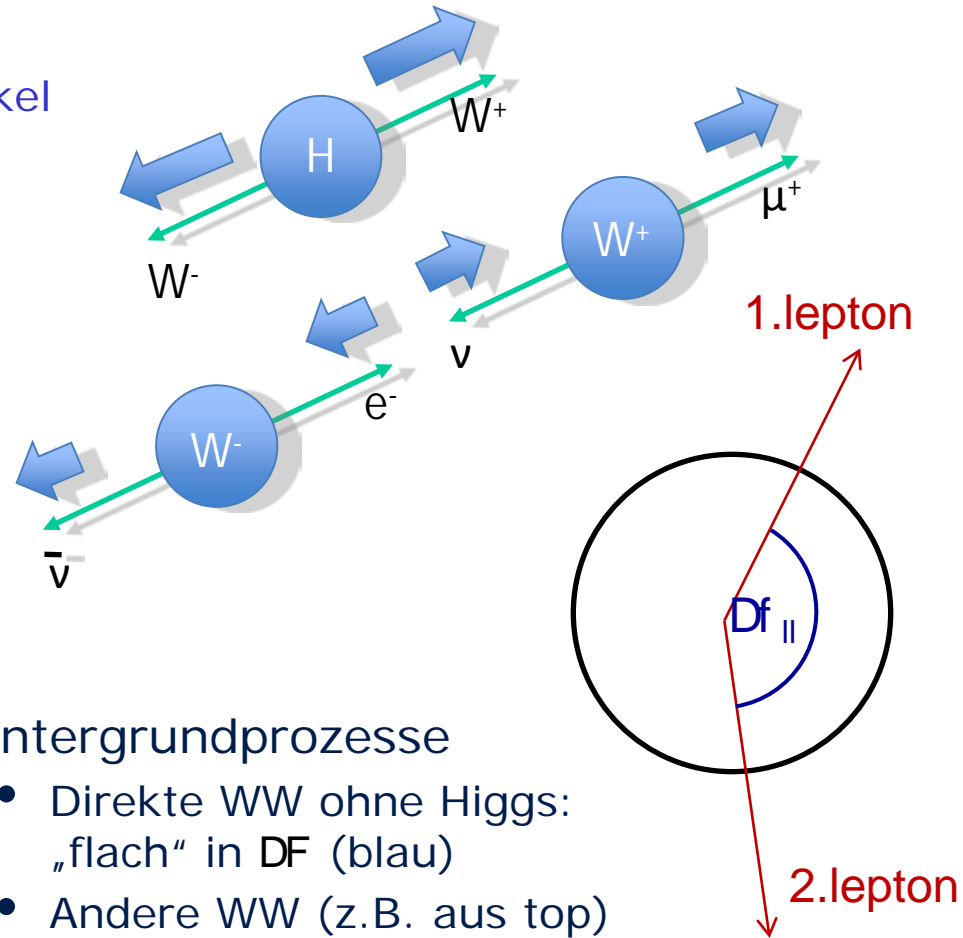
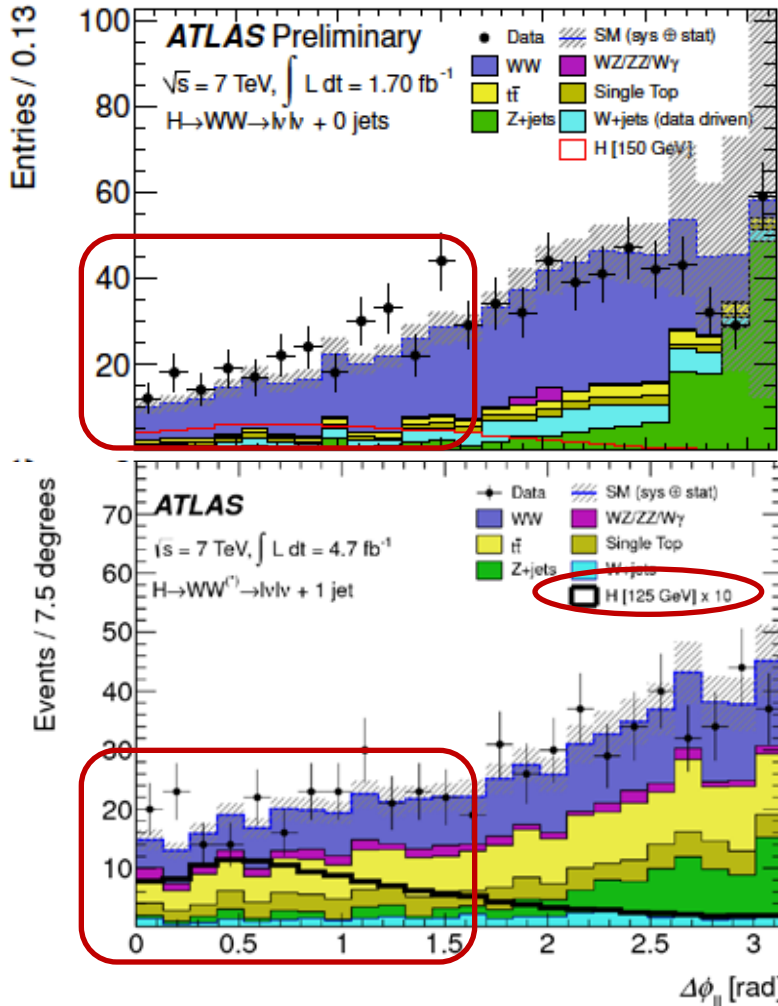


E) W/Z +jets



Spin-Korrelation:

- Leptonen aus H \rightarrow 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)

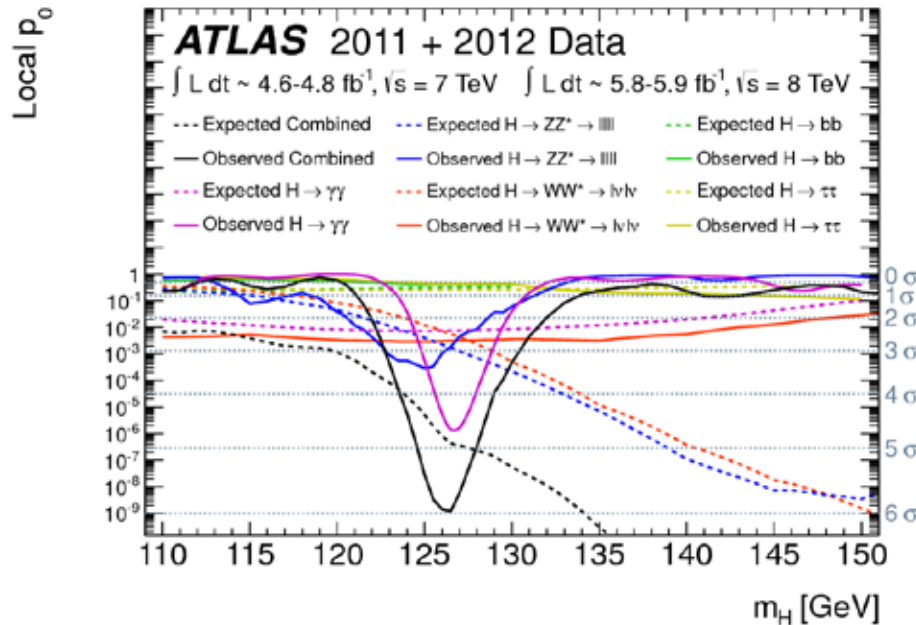
Suche Überschuss bei kleinen DF

✓ Erwartete und beobachtete Signifikanz eines 125-126 GeV Higgs

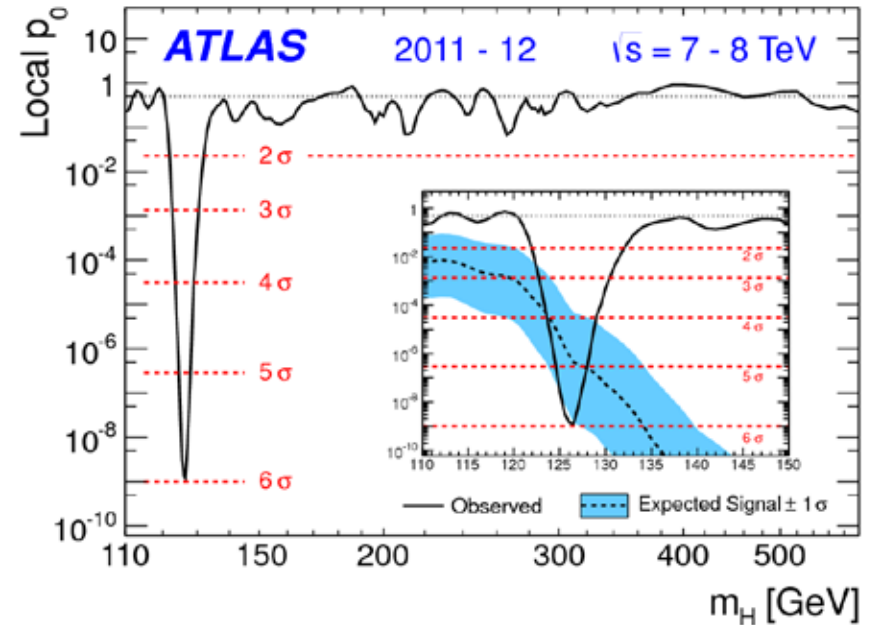
Kanal	$WW \rightarrow \ell^+ n \ell^- n$	gg	$ZZ \rightarrow \ell^+ \ell^- \ell^+ \ell^-$	gesamt
Erwartung	2.3 s	2.5 s	2.7 s	4.9 s
Beobachtung	2.8 s	4.5 s	3.6 s	6.0 s

✓ p_0 : lokale Wahrscheinlichkeit der Beobachtung unter „nur-Untergrund“ Hypothese:

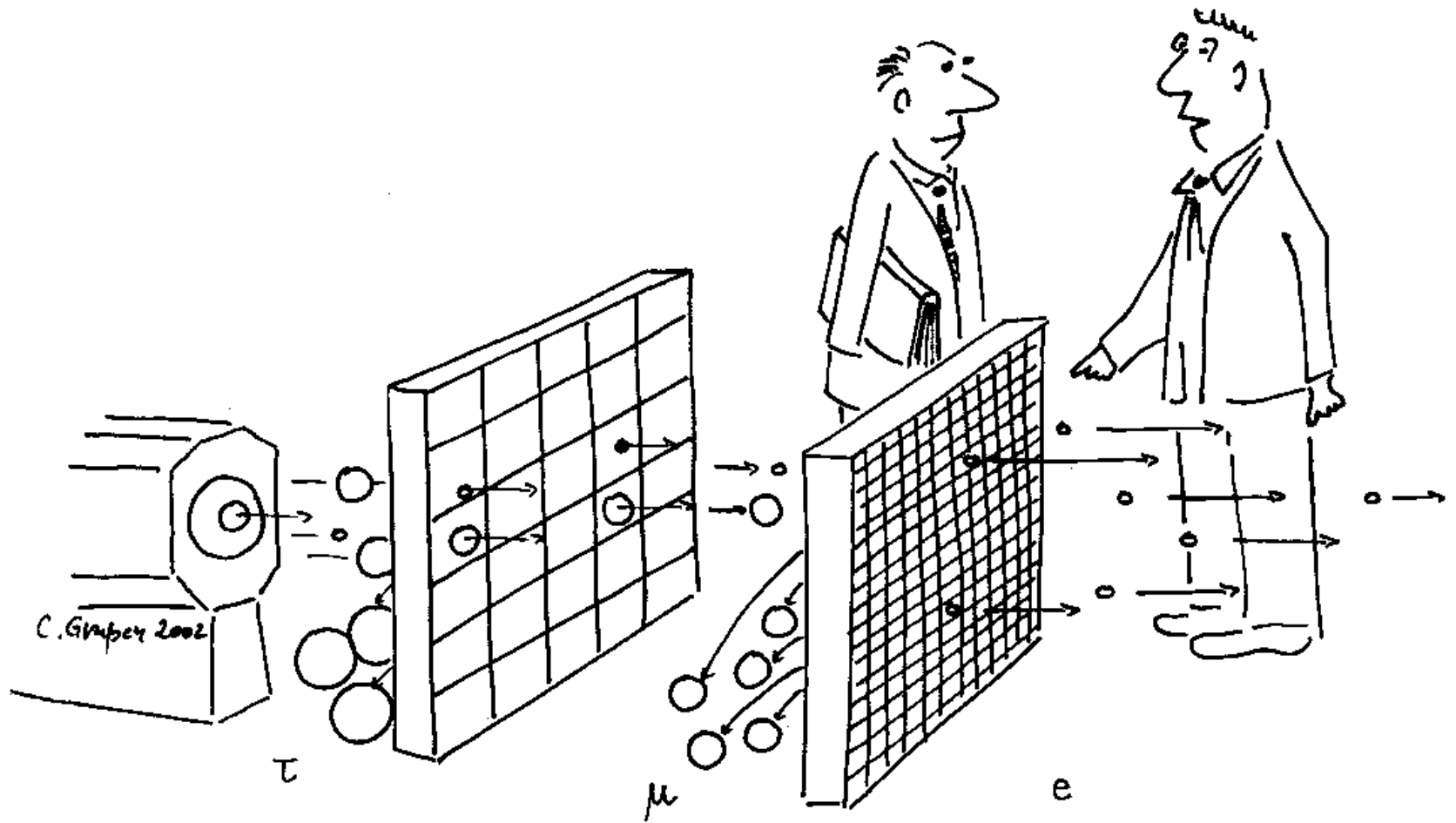
- einzeln:



kombiniert $p_0 = 1,7 \times 10^{-9}$



VIEL SPAß BEIM MESSEN!



"Our new lepton identifier!"