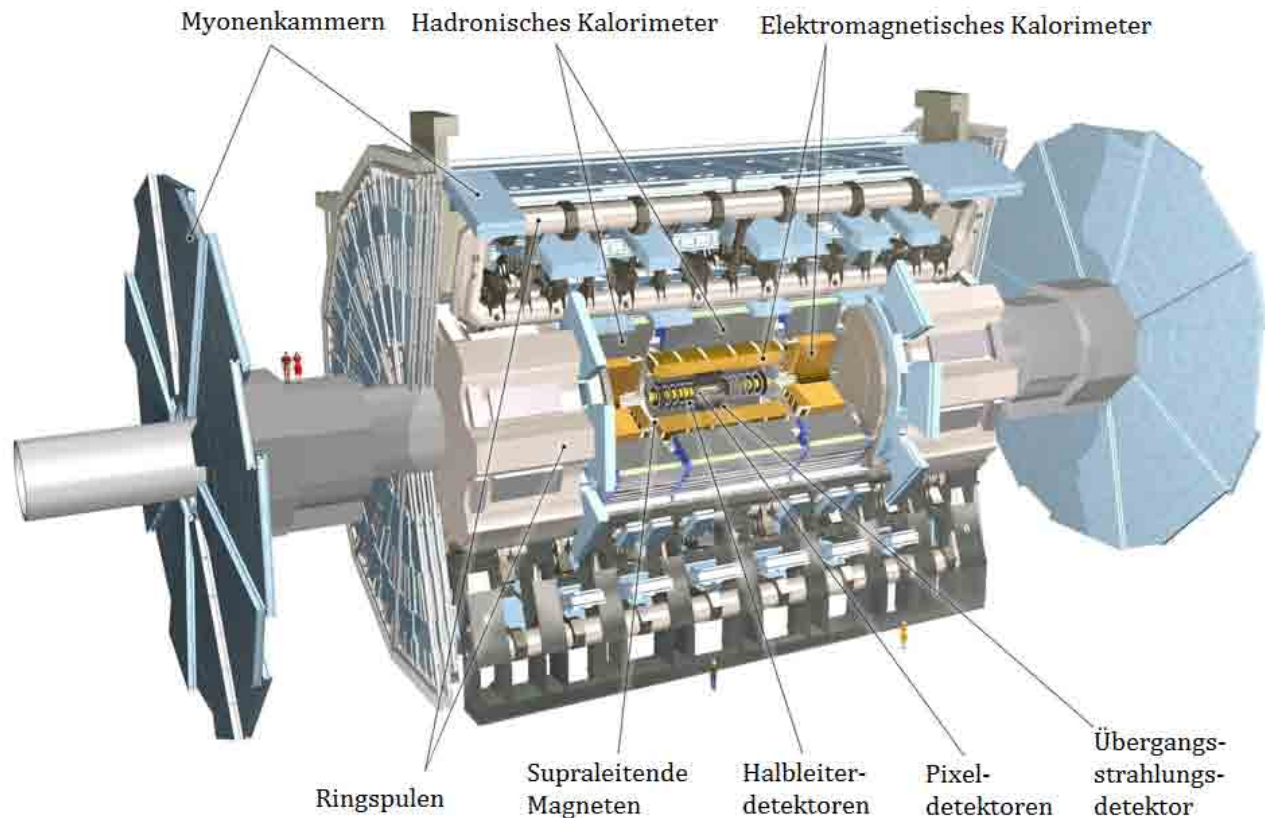


# Masterclasses mit LHC Daten: Auf Augenhöhe mit der aktuellen Forschung

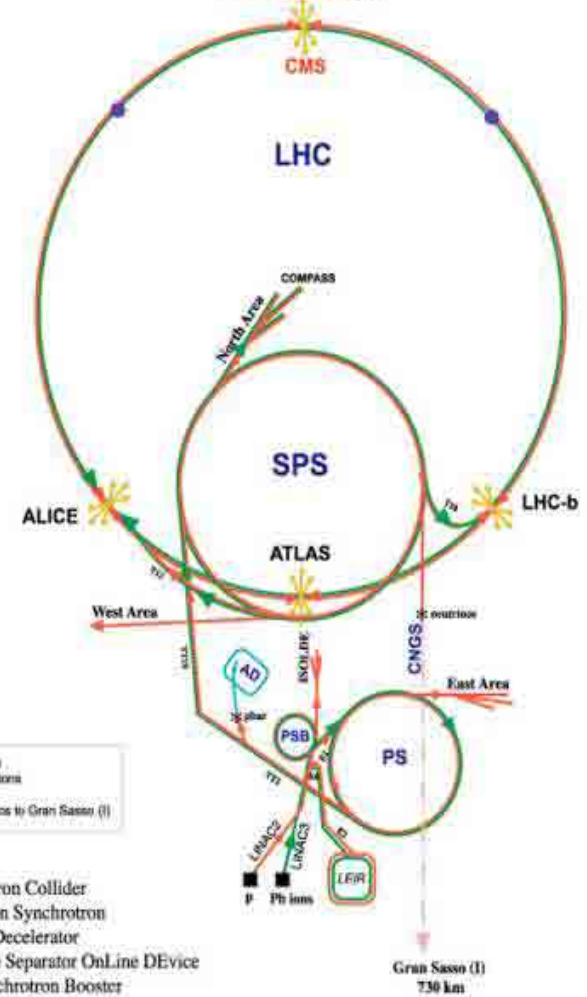
Michael Kobel (TU Dresden)

Lehrertag Internationale Masterclasses, Dresden  
16.03.2012





CERN Accelerators (not to scale)



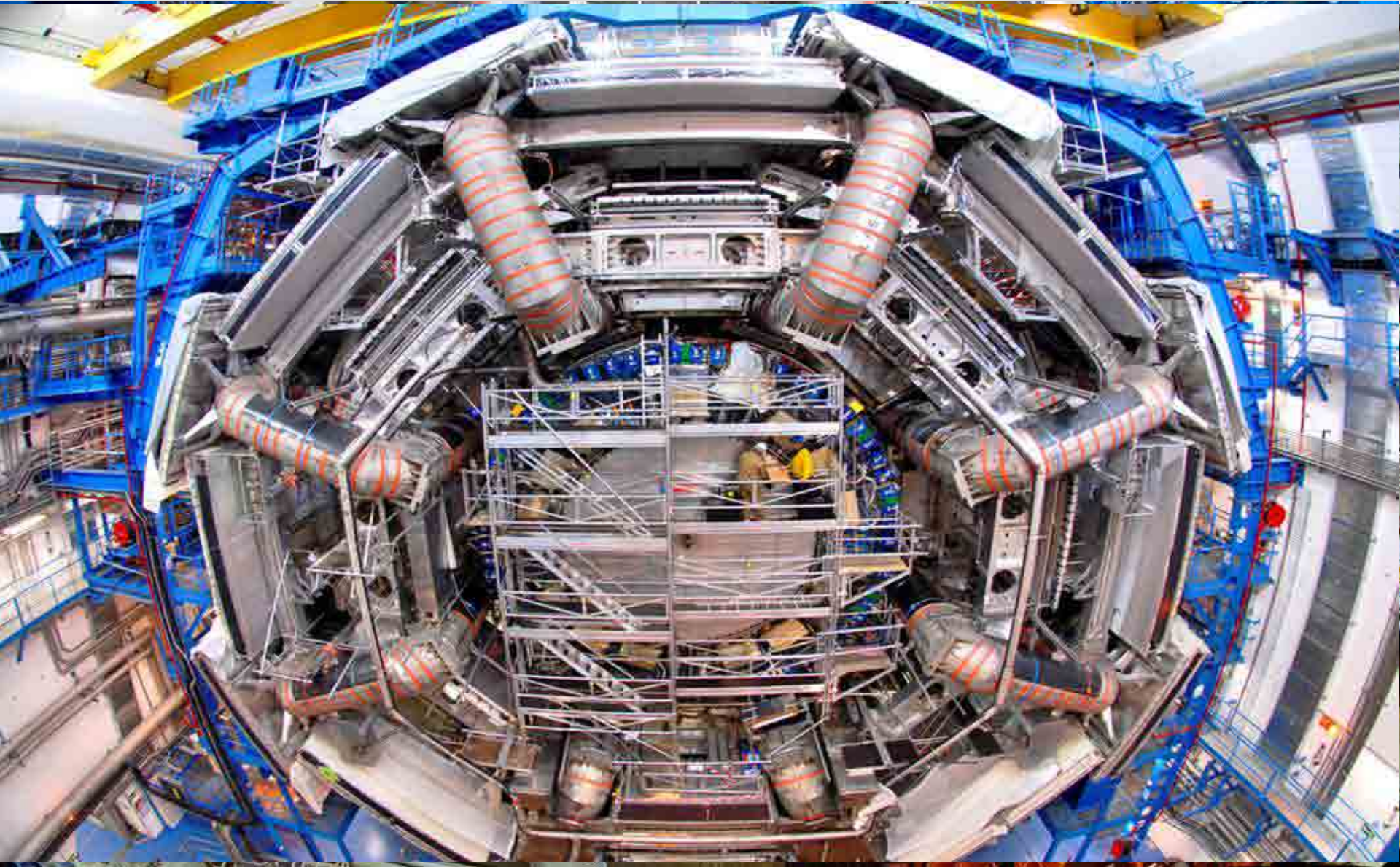
LHC: Large Hadron Collider  
 SPS: Super Proton Synchrotron  
 AD: Antiproton Decelerator  
 ISOLDE: Isotope Separator OnLine DEvice  
 PSB: Proton Synchrotron Booster  
 PS: Proton Synchrotron  
 LINAC: LINear ACcelerator  
 LEIR: Low Energy Ion Ring  
 CNGS: Cern Neutrinos to Gran Sasso

Rediff: LEP, PS Divison, CERN, 02.09.98  
 Revised and adapted by Antonella Del Rossio, IFT Div.,  
 in collaboration with B. Desregni, 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)	seit 2010	3500+3500 GeV
	> 2015	6500+6500 GeV?

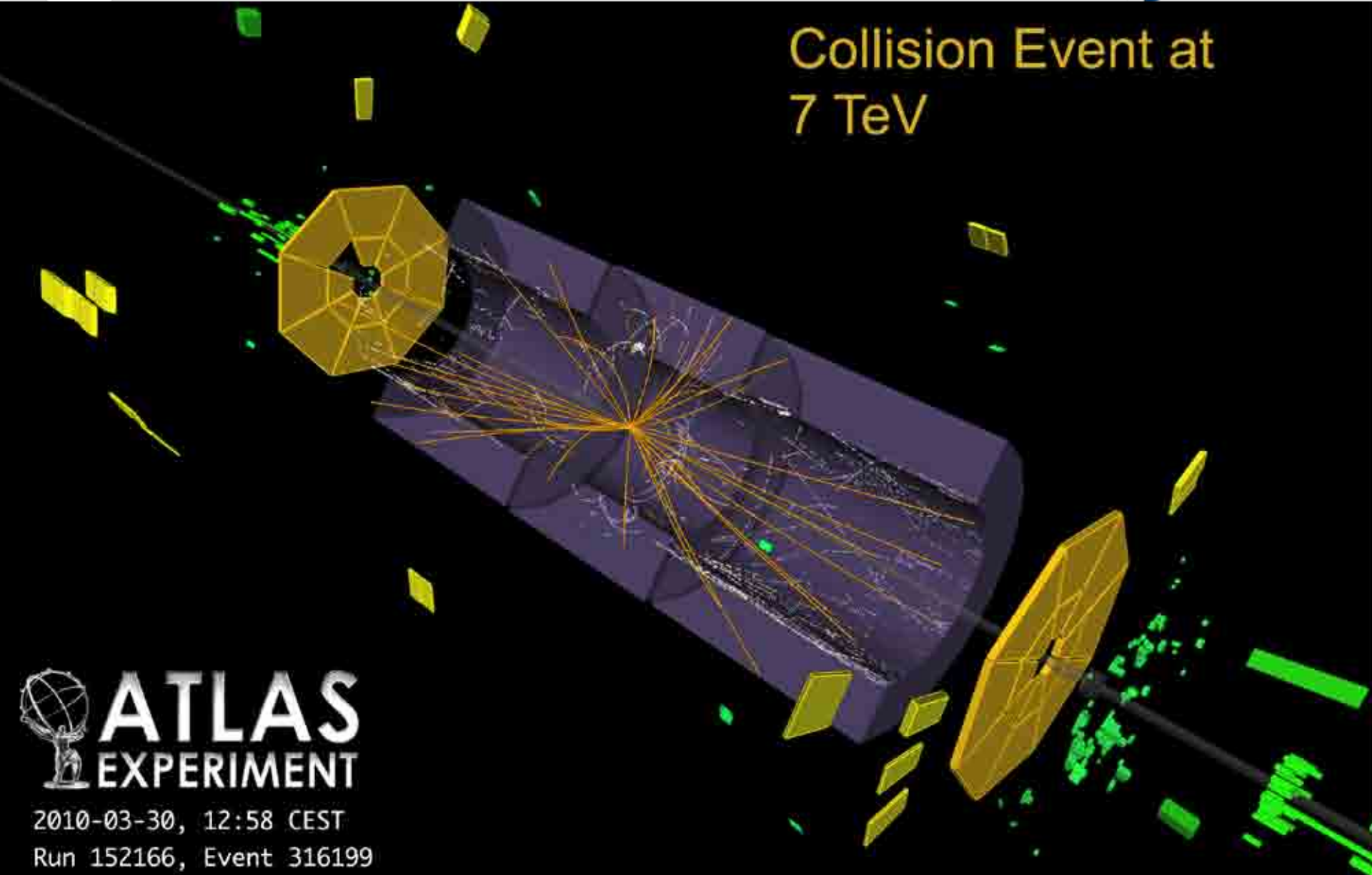


CERN visit - Introduction





## Collision Event at 7 TeV

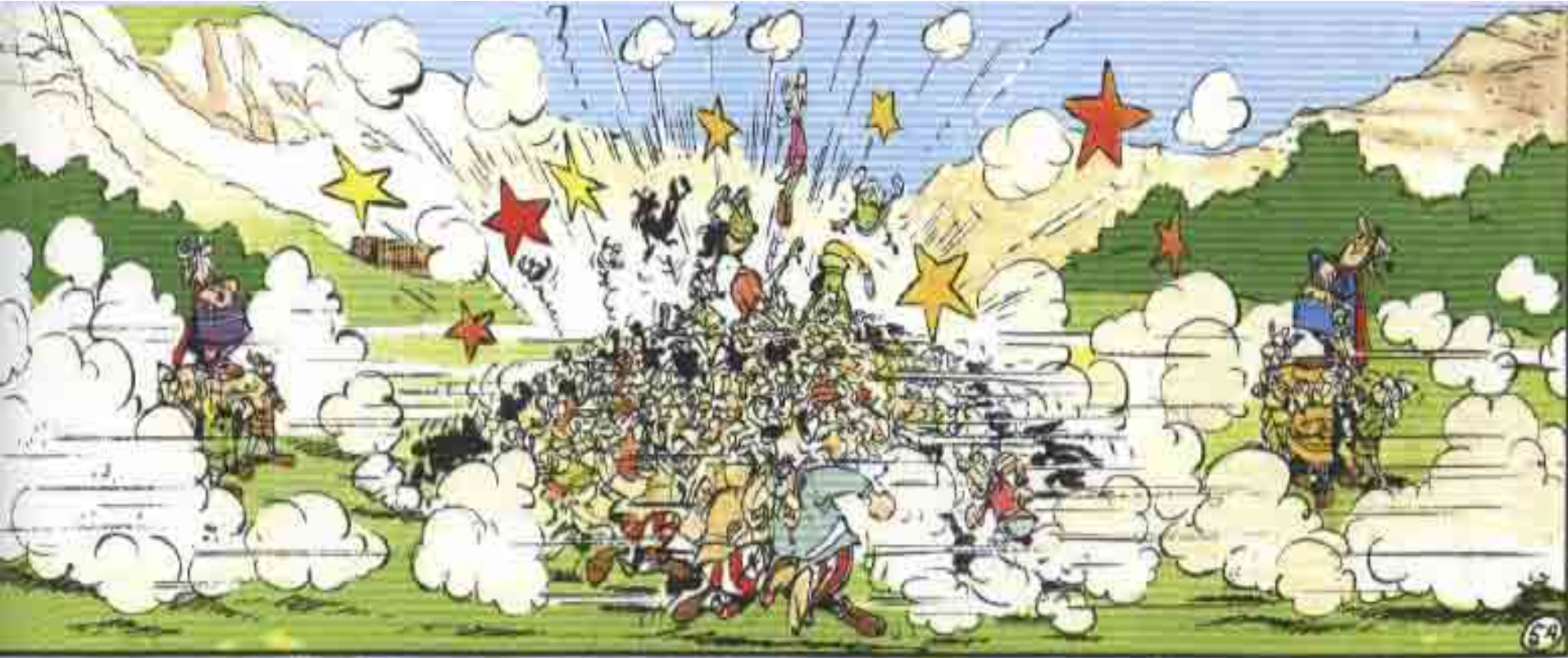


 **ATLAS**  
EXPERIMENT

2010-03-30, 12:58 CEST

Run 152166, Event 316199

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



# *Warum?*



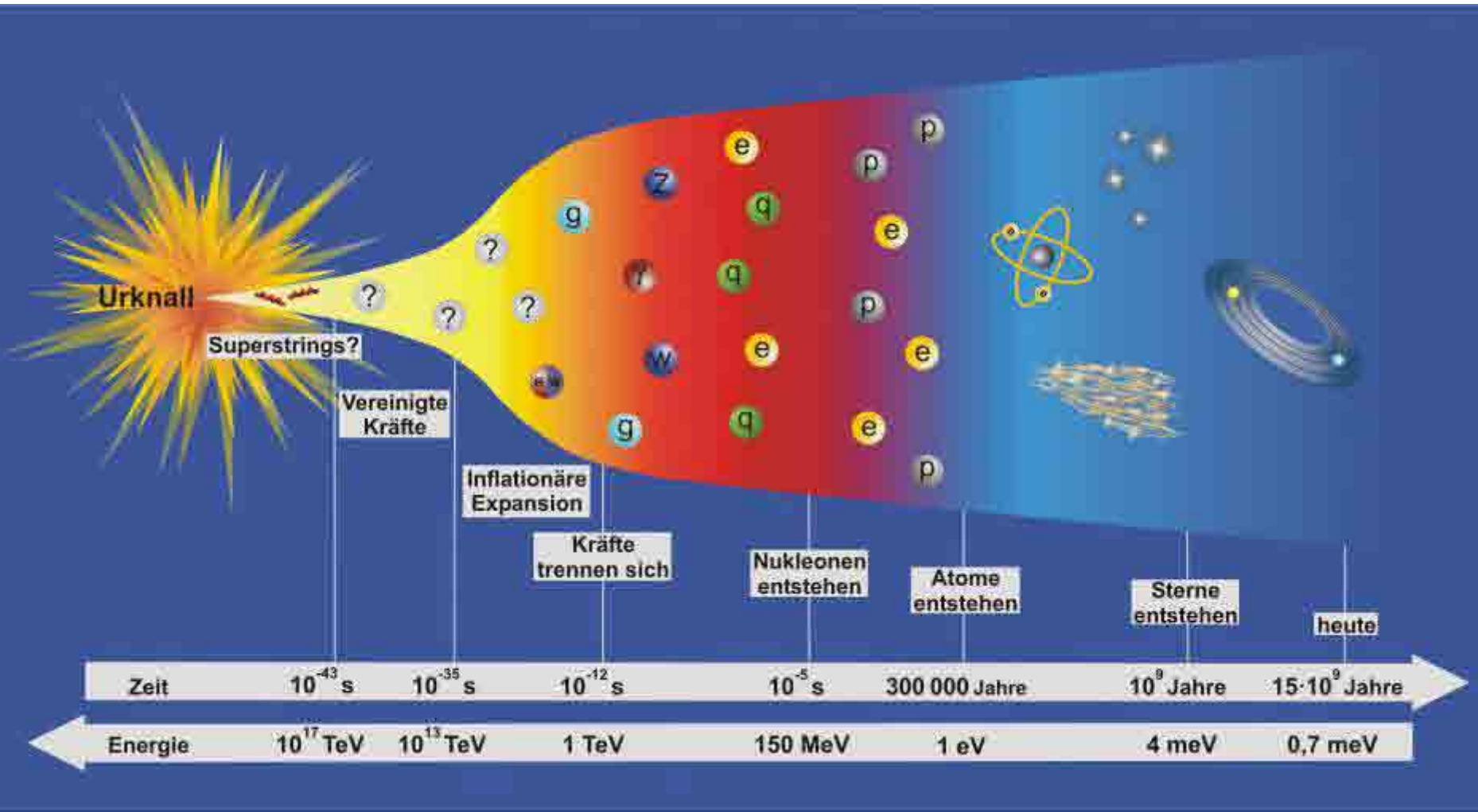
Raum



Zeit



Materie

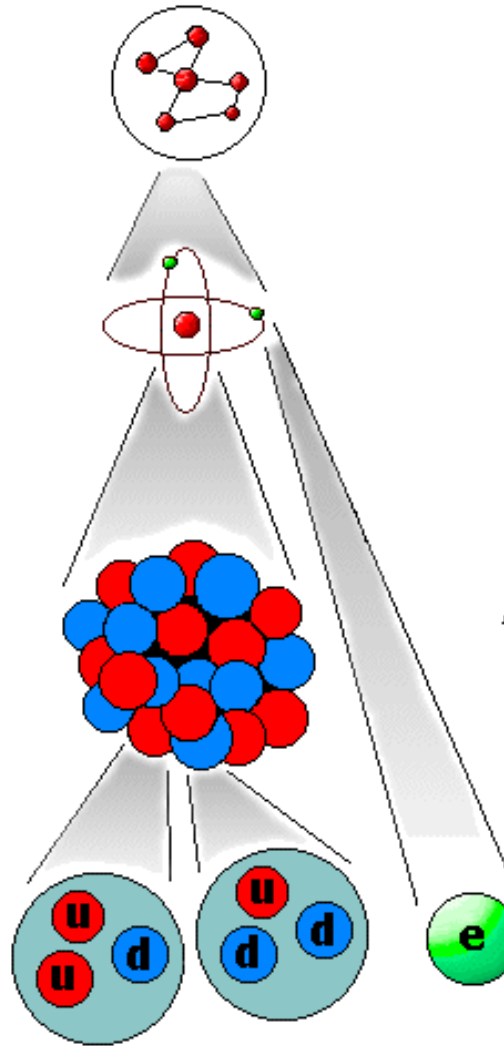




Makrokosmos



Mikrokosmos



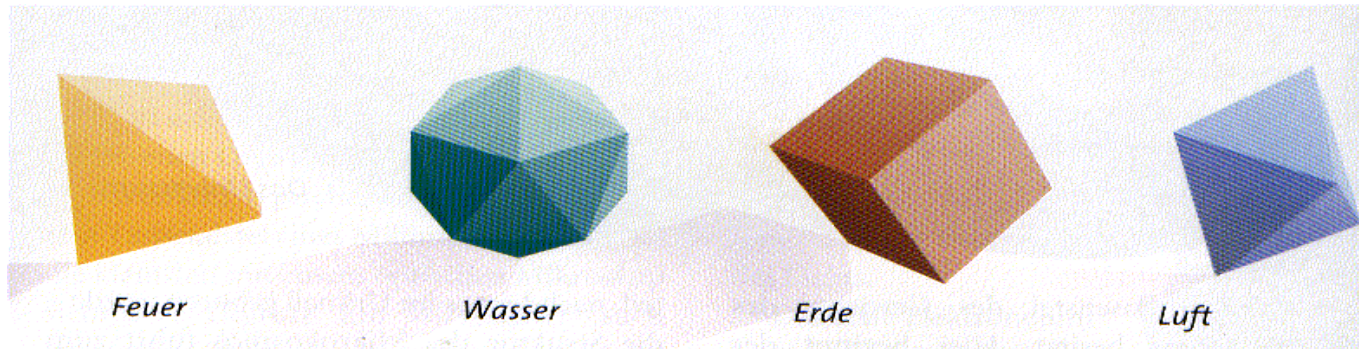
Molekül (aus Atomen)

Atom (aus Atomkern  
und Atomhülle)

Atomkern (aus Protonen  
und Neutronen)

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

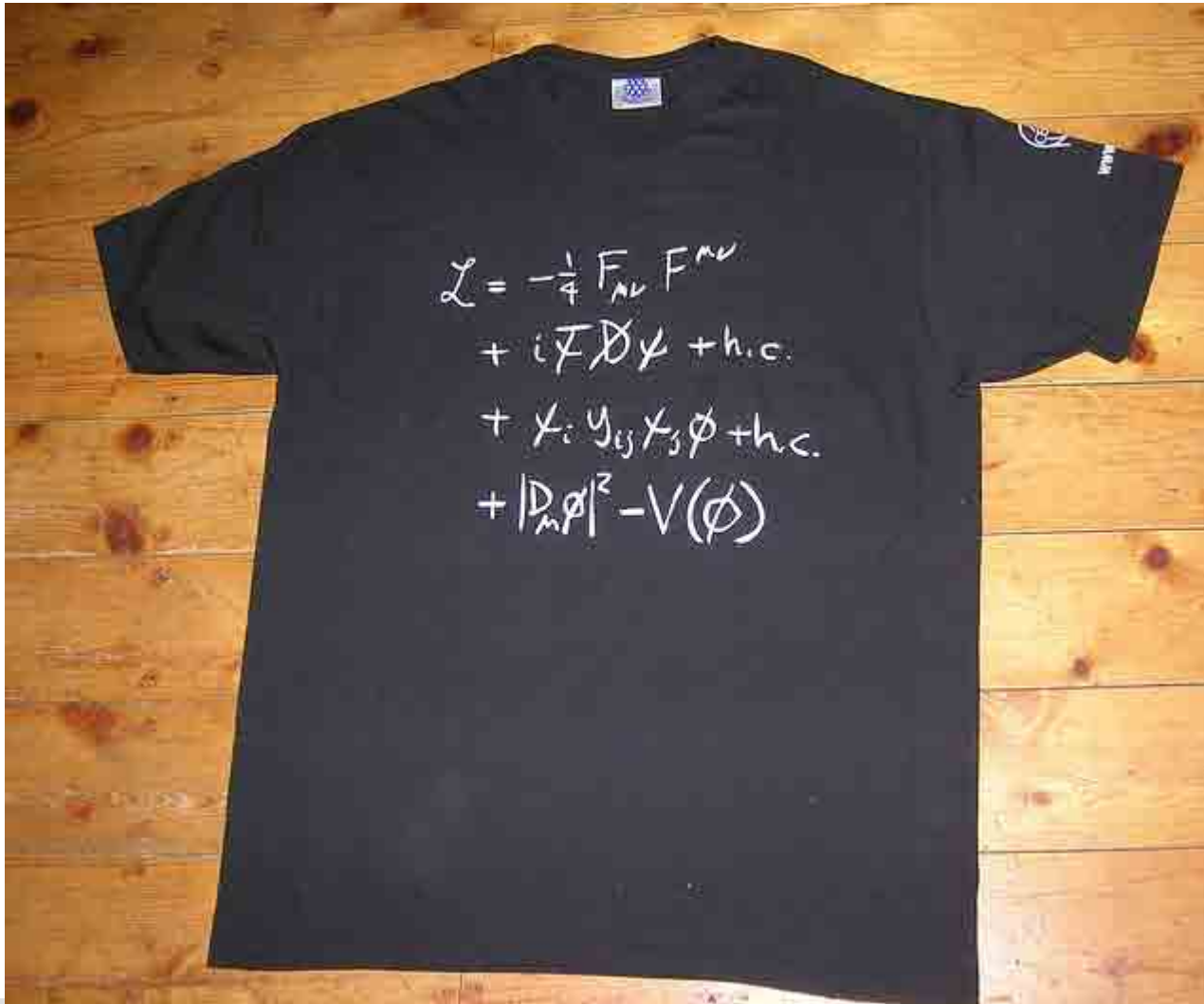
- ▶ **Elemente und Kräfte:** 500-430 v.Chr. Empedokles
  - ▶ **Vier Elemente:** Feuer, Wasser, Erde, Luft
  - ▶ **Zwei Urkräfte:** Liebe , Haß  $\hat{=}$  Mischung , Trennung
- ▶ **Symmetrien:** 427-347 v.Chr. Platon
  - ▶ **Symmetrische Körper:** Schönheit der Gesetze



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



- **Fundamentale Wechselwirkungen zwischen Teilchen**
  - erfordern Botenteilchen (Austauschteilchen)
  - werden aus Symmetrien vorhergesagt!
- **Bausteine der Welt**
  - Träger von Ladungen
  - „Spielfeld“ der entsprechenden Wechselwirkungen
- **Massenmechanismus**
  - Herkunft der Teilchenmassen noch unbekannt
  - Hypothese: “Higgsmechanismus“, Nachweis: Higgs-Teilchen
- **Errungenschaft des Standardmodells**
  - beschreibt \*alle\* bekannten Prozesse
  - Ist (derzeit) DIE grundlegende Theorie der Physik



- auf CERN  
T-shirt und  
Mouse Pad





Emmi Noether  
(1882-1935)

1918: Noether Theorem:

Symmetrie  $\leadsto$  Erhaltungsgröße

Physikalische Gesetze unabhängig von...

Verschiebung der Zeitachse

$\leadsto$

Erhaltung der Energie

Verschiebung der Raumachsen

$\leadsto$

Erhaltung des Impulses

Drehung der Raumachsen

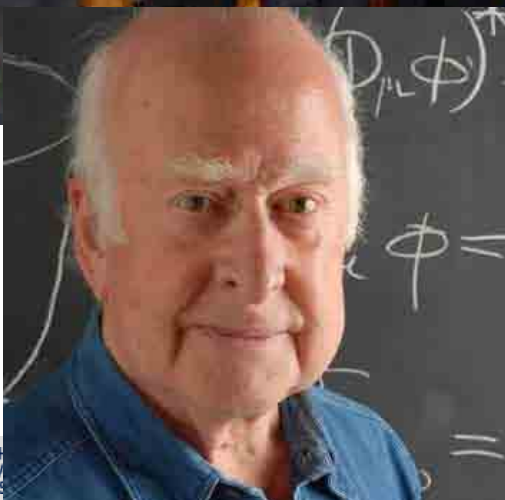
$\leadsto$

Erhaltung des Drehimpulses



- **Aufstellung der Terme der „Weltformel“:**
  - Natur verlangt offensichtlich ihre Invarianz unter 3 Symmetrien („lokalen Umeichungen“)
- **Bedeutung der Formel:**
  - Jedem Term entspricht in dieser Reihenfolge
    - à kinetische Energie freier Teilchen
    - à Wechselwirkung zwischen Teilchen
    - à Massen und Mischungen der Teilchen (durch Higgsfeld)
    - à Potenzielle Higgsenergie und Anregungen (Higgs-Teilchen)
  - Terme, die die Symmetrie nicht erfüllen, sind verboten
  - **Symmetrie lässt sich nur mit Hilfe von Wechselwirkungen erfüllen  
-> lokale Eichsymmetrie ist Ursache der Wechselwirkungen !**
  - **Alle Prozesse lassen sich mit Hilfe dieser Formel vorhersagen  
(z.B. Licht, Magnetismus, Elektromotor, Radiowellen, Kernzerfälle, Brennen von Sternen...)**



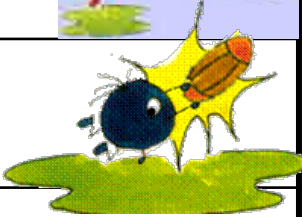
- 1961: GLASHOW (\*1932) (NP: 1979) Lokale Eichsymmetrie  $SU(2)_L \times U(1)_Y$
- 1964: GELL-MANN (\*1929), ZWEIG(\*1937) Quarks
- 1965: HAN, NAMBU (\*1921), GREENBERG starke Farbladung
- 1964: KIBBLE, GURALNIK, HAGEN, ENGLERT, BROUT, HIGGS (Bilder) Spontane Symmetriebrechung zur Massenerzeugung (“Higgs Boson”)
- 1967: SALAM (1926-96), WEINBERG (\*1933) Elektroschwache Wechselwirkung: Weinberg: “A model of Leptons”



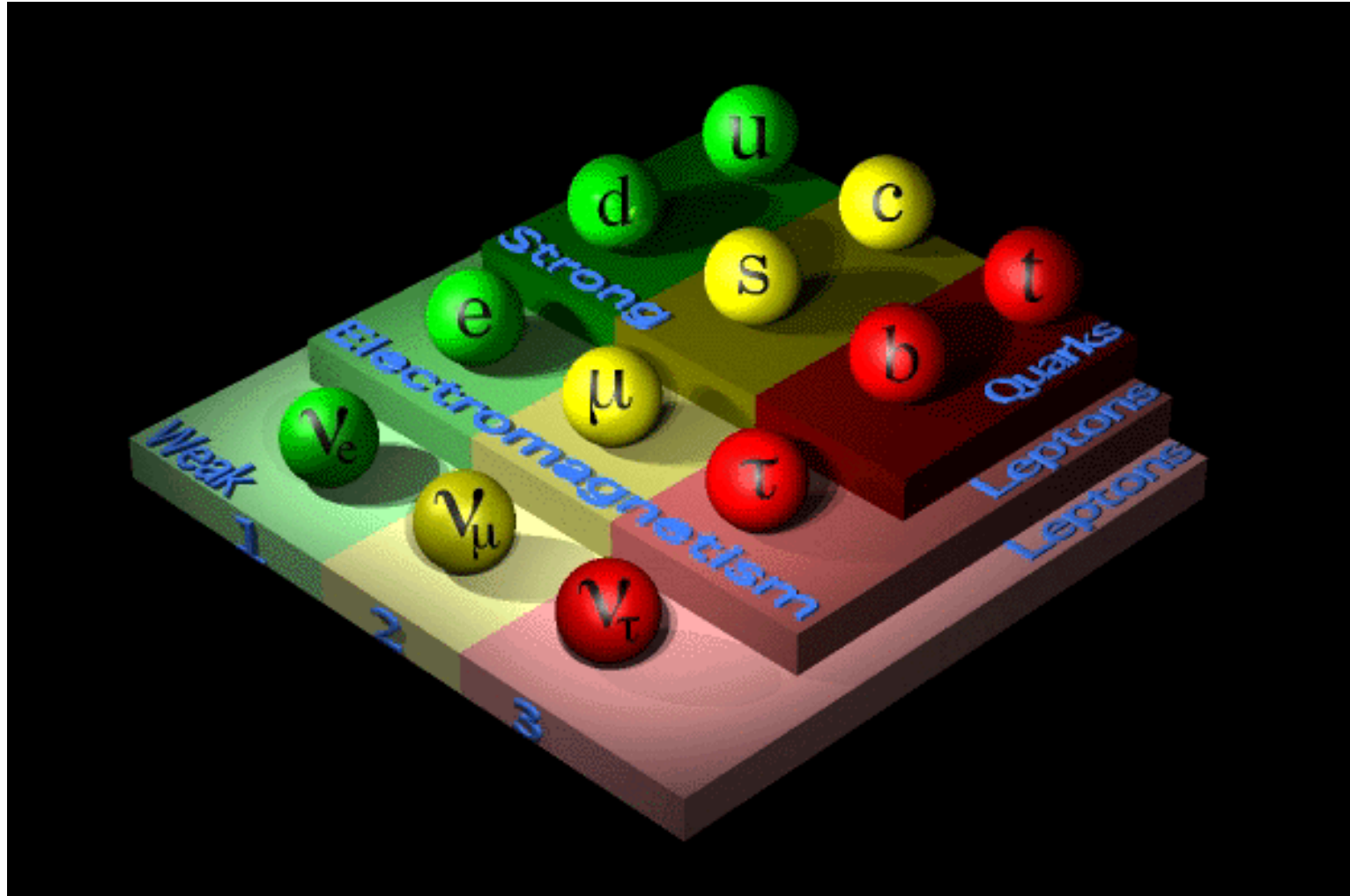
$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}(\partial_\mu \vec{A}_\nu - \partial_\nu \vec{A}_\mu + g\vec{A}_\mu \times \vec{A}_\nu)^2 - \frac{1}{4}(\partial_\mu B_\nu - \partial_\nu B_\mu)^2 - \bar{R}\gamma^\mu (\partial_\mu - ig'B_\mu)R - L\gamma^\mu (\partial_\mu + ig\vec{t} \cdot \vec{A}_\mu - i\frac{1}{2}g'B_\mu)L$$

$$-\frac{1}{2}|\partial_\mu \varphi - ig\vec{A}_\mu \cdot \vec{t}\varphi + i\frac{1}{2}g'B_\mu \varphi|^2 - G_e(\bar{L}\varphi R + \bar{R}\varphi^\dagger L) - M_1^2 \varphi^\dagger \varphi + h(\varphi^\dagger \varphi)^2. \quad (4)$$

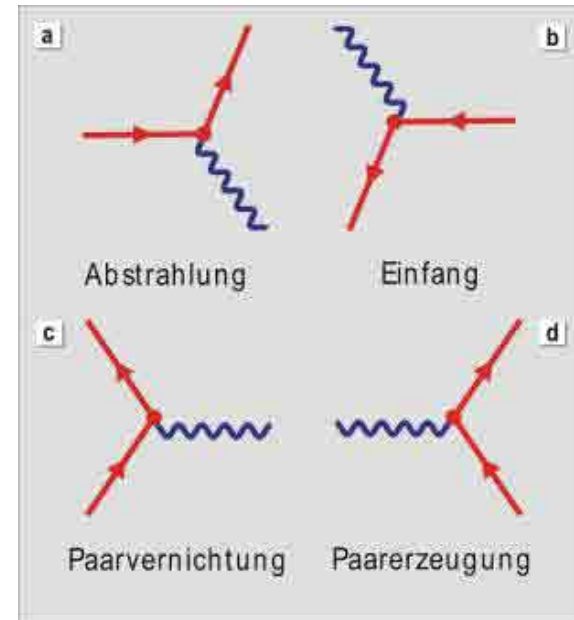
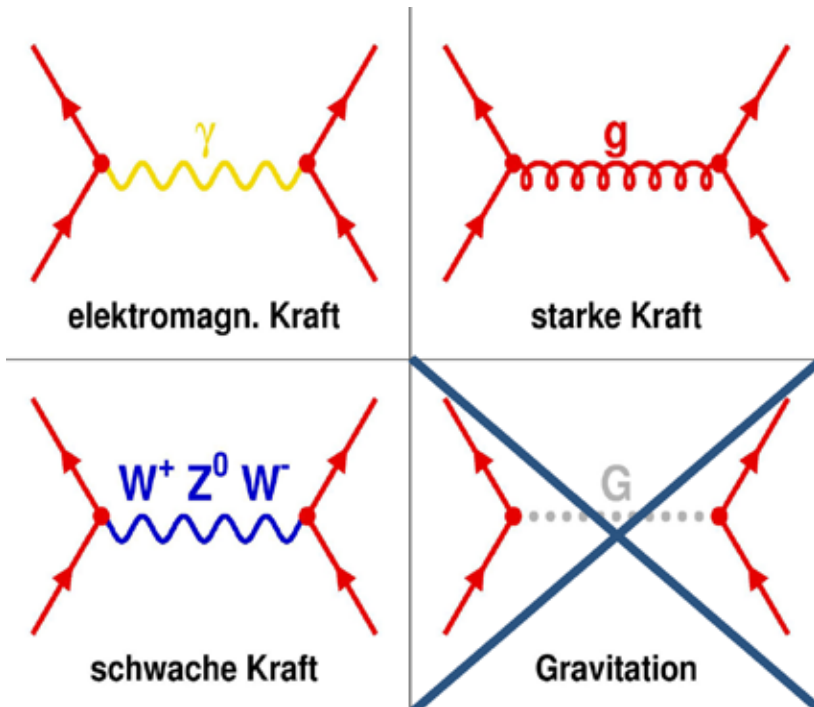
- Jede Kraft hat eigene Botenteilchen

Kraft (Wechselwirkung)	Botenteilchen	
Starke Kernkraft	Gluonen $g$	
Schwache Kraft	„Weakonen“ (W und Z)	
Elektromagnetismus	Photonen $\gamma$	
Schwerkraft	Gravitonen ?	

- Wechselwirkung nur dann, wenn entsprechende Ladung vorhanden

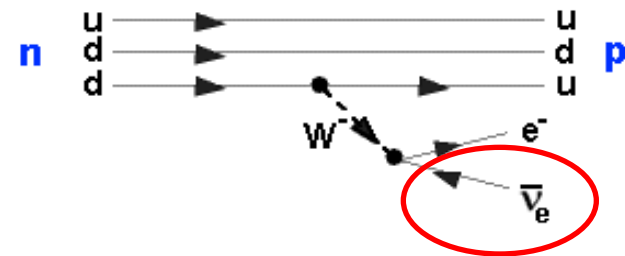


- Ursache jeder Wechselwirkung ist: **Erhaltung von Symmetrien**
- Ergibt **eindeutiges Set** von fundamentalen "Vertices"
- Alle Prozesse sind Kombination solch fundamentaler Vertices



Zeit  $\rightarrow$

► z.B. Beta"zerfall" des Neutrons



► Anm:

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



- 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 Kaliumatom der ca. 100-150g Kalium in unserem Körper ist Kalium-40.



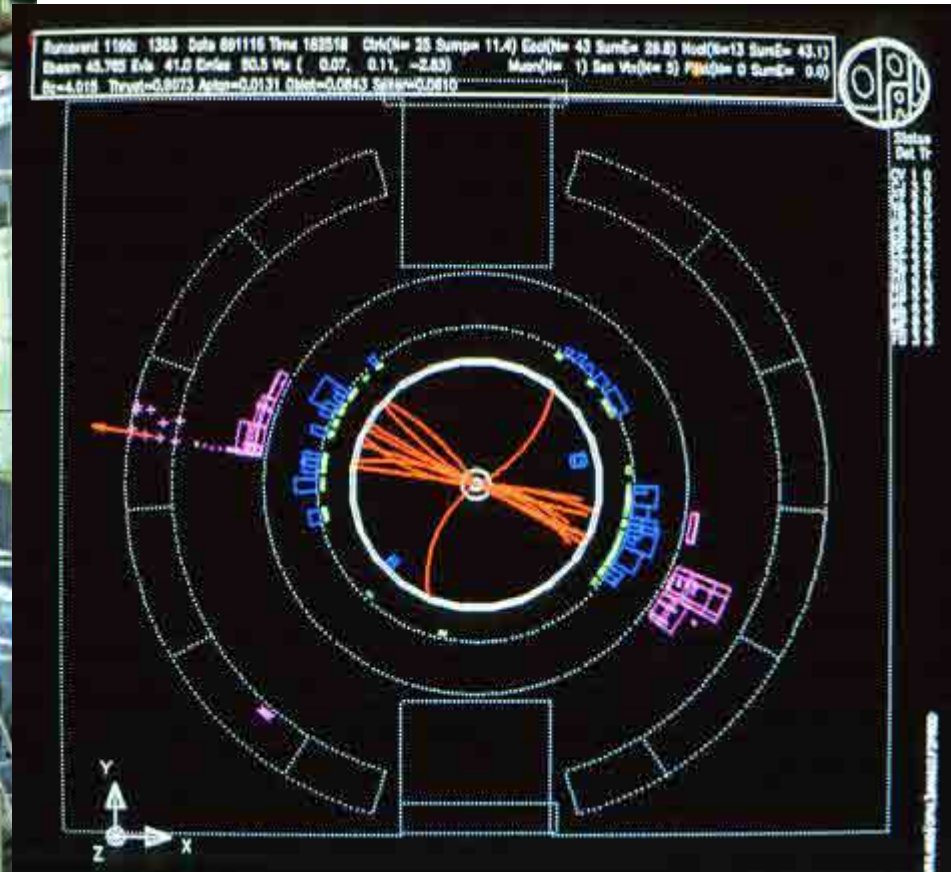
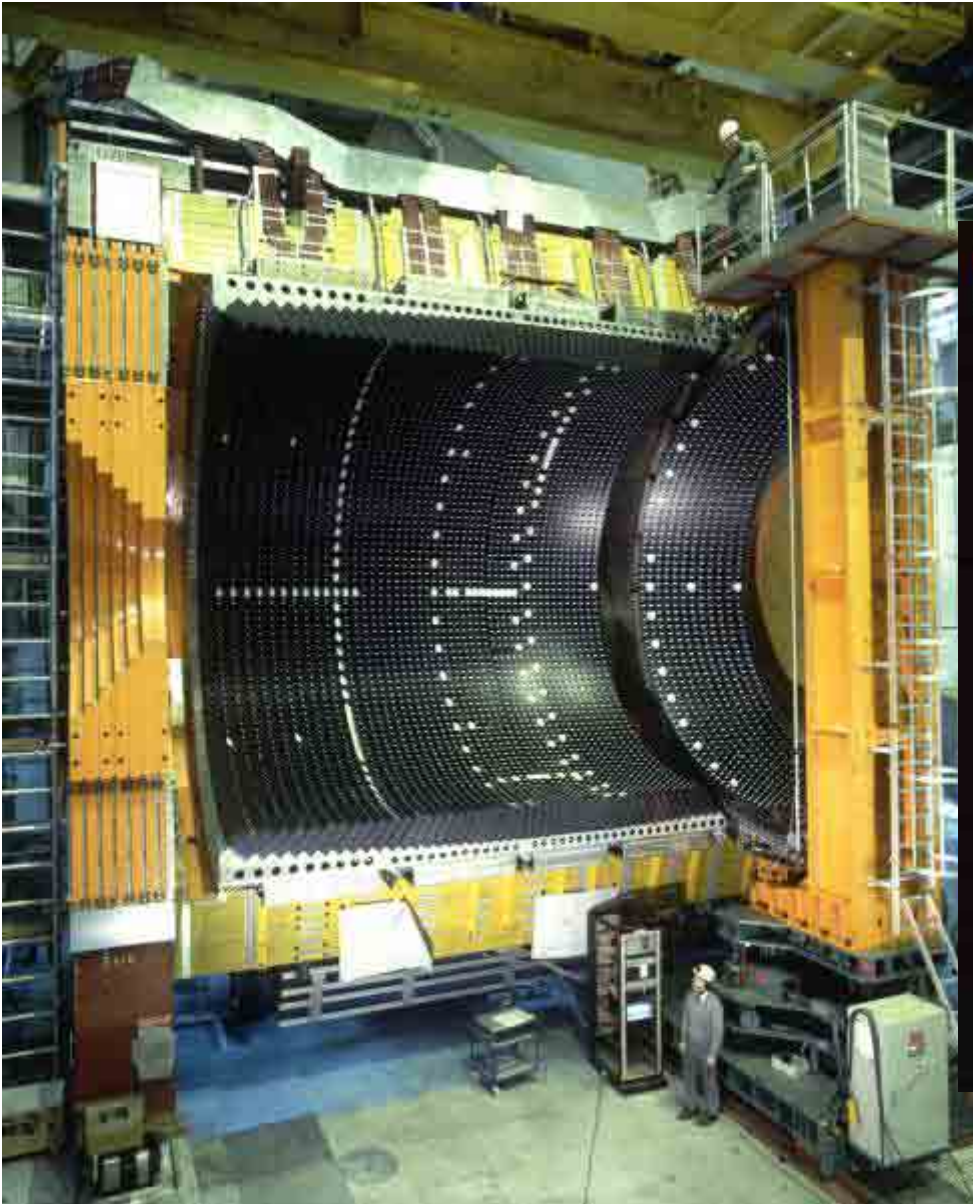
potassium.swf

<https://kjende.web.cern.ch/kjende/de/wpath.htm>

# Die Augen der Teilchenphysik: Detektoren



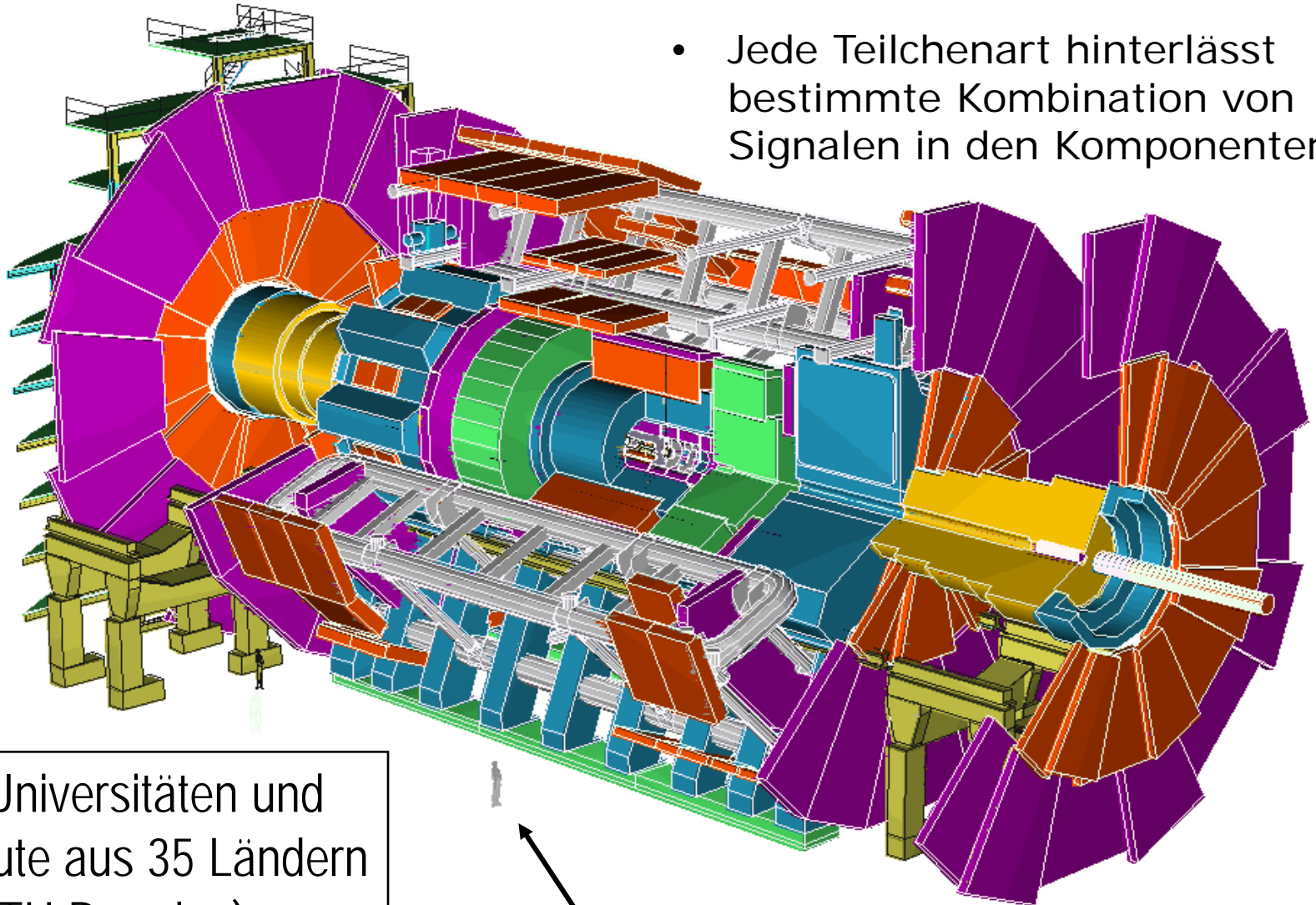
CERN, Genf,  
bis 2000



Elektronische Bilder

# Aktivität heute : ATLAS Experiment, LHC

- Jede Teilchenart hinterlässt bestimmte Kombination von Signalen in den Komponenten



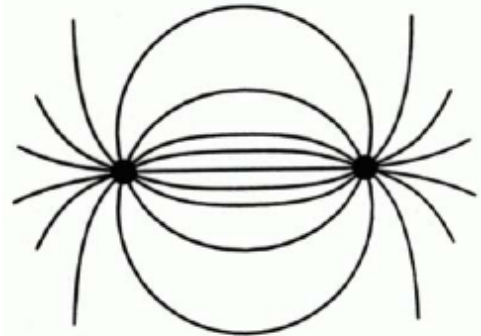
170 Universitäten und Institute aus 35 Ländern (u.a. TU Dresden)

Größenvergleich

- Zwiebelschalenartiger Aufbau verschiedener Komponenten

# Confinement

QED



Feldlinien eines elektrischen Dipols reichen ins Unendliche

QCD

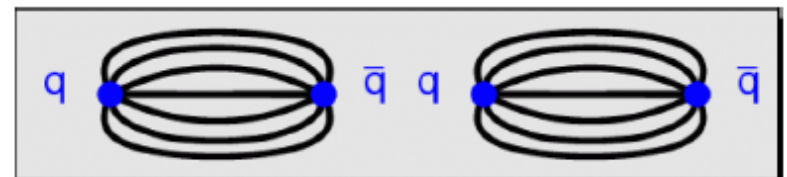


Feldlinien eines Farbdipols bilden einen engen Flusschlauch  
Grund: Selbstkopplung der Gluonen

Die Feldenergie des Farbdipols wächst proportional zur Länge:

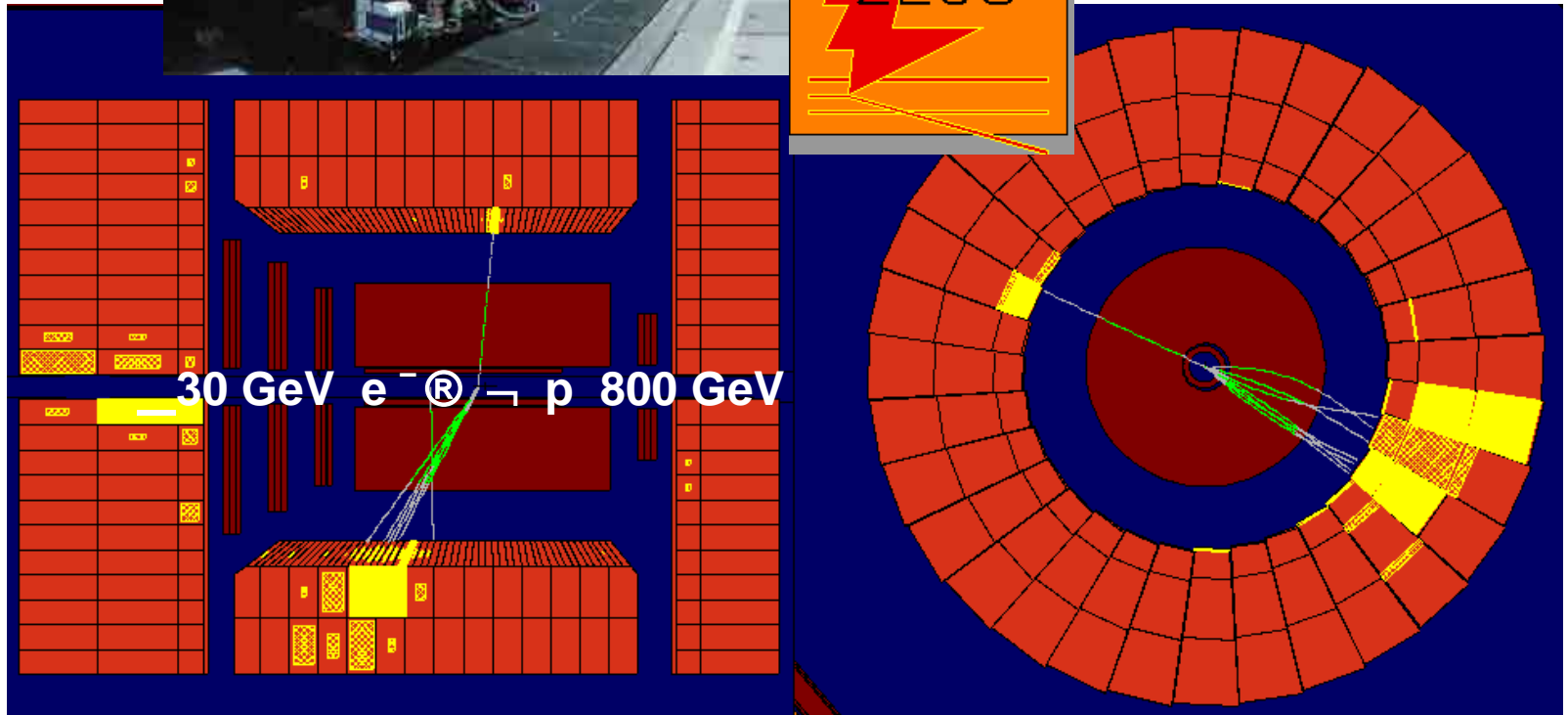
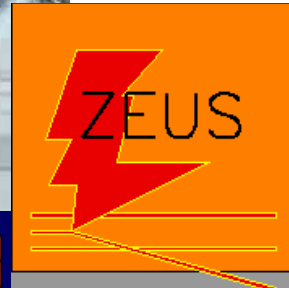
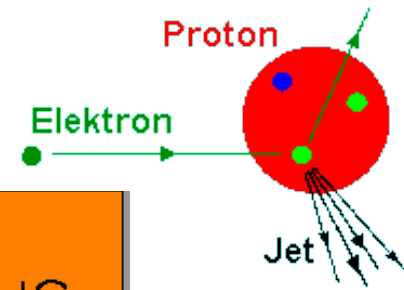
$$V(x) = k \cdot x \quad \text{mit} \quad k \approx 1 \text{ GeV} / \text{fm}$$

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.

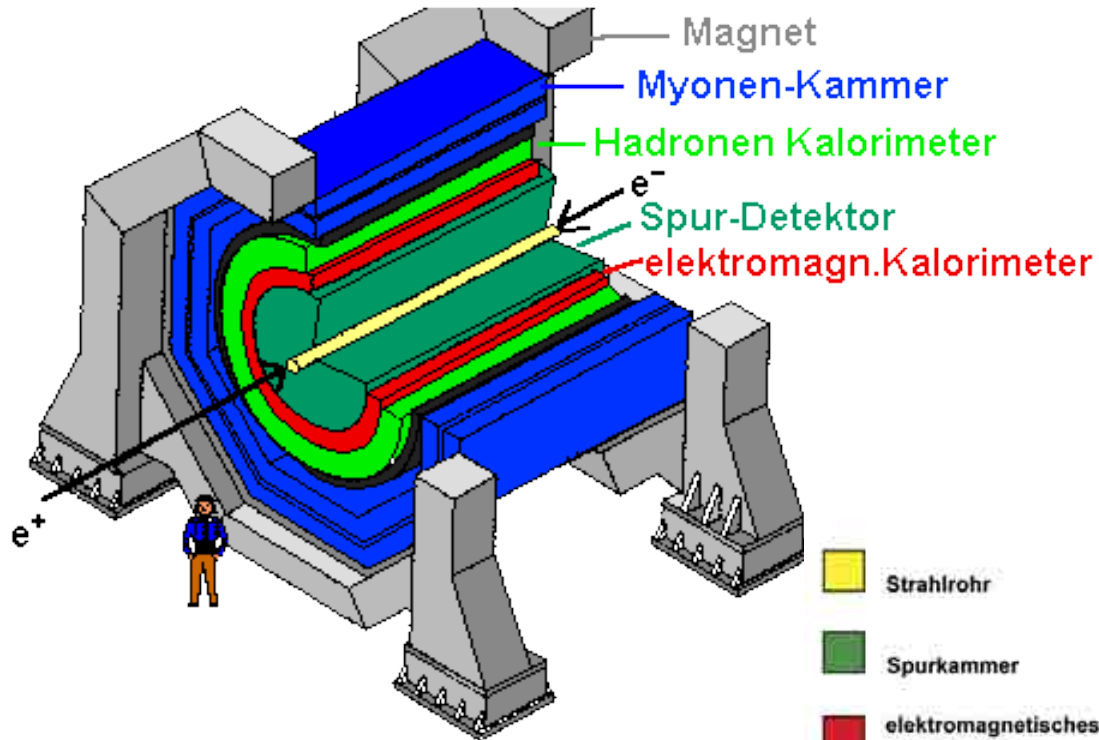


# Einzelne Quarks ergeben „Hadronen“ Jets

- e-p Kollisionen bei HERA am DESY



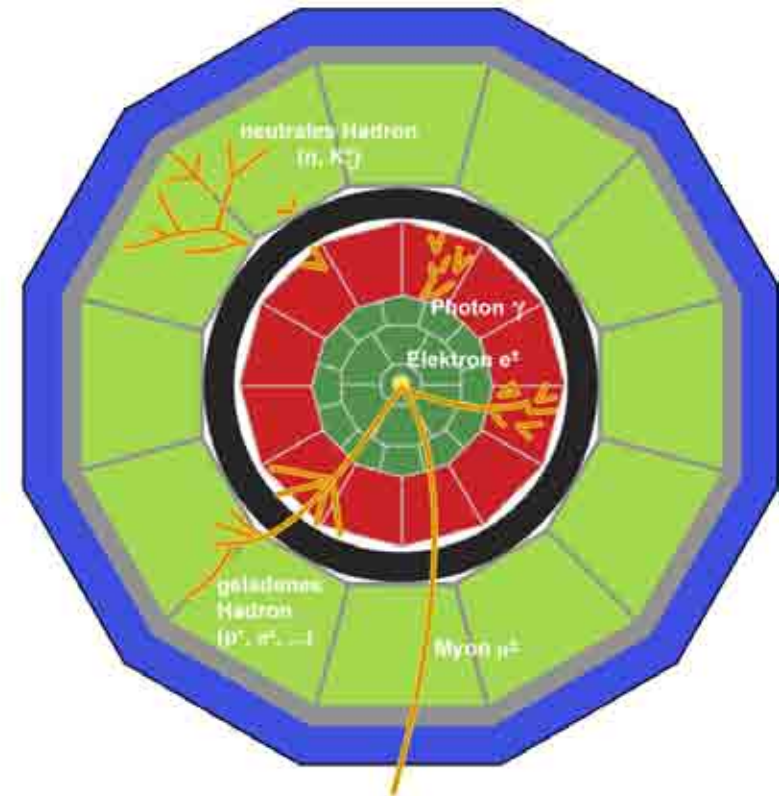
# Teilchenidentifikation



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

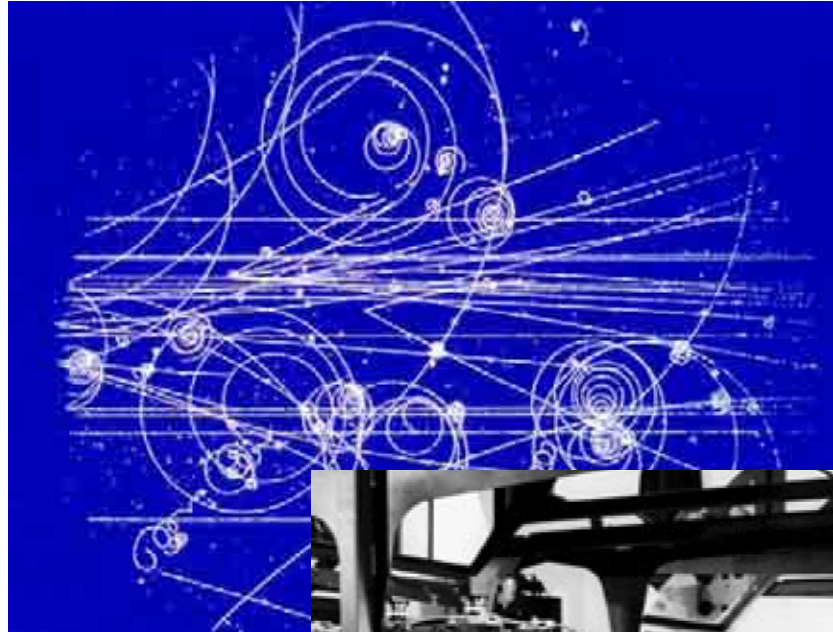
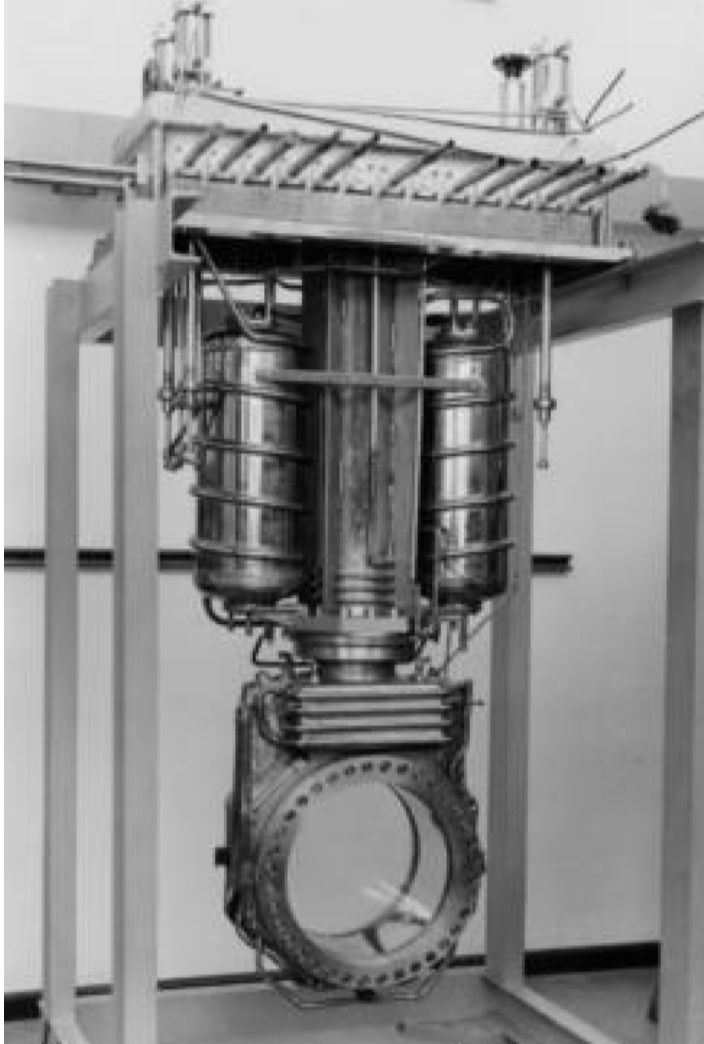
- feststellbare Teilcheneigenschaften:
  - aus Quarks („Hadronen“)
  - elektr. geladen / ungeladen
  - leicht / schwer

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



# Innerste Lage: Spurdetektoren

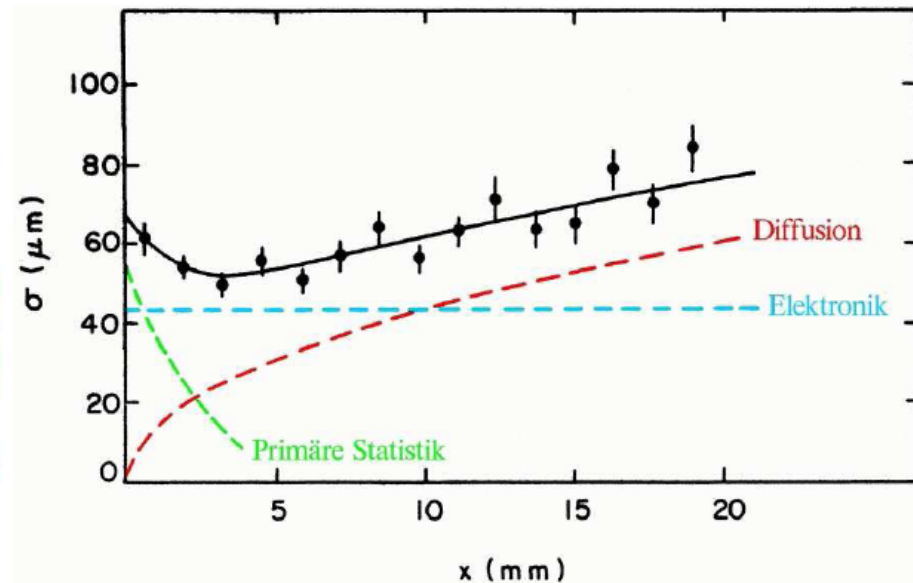
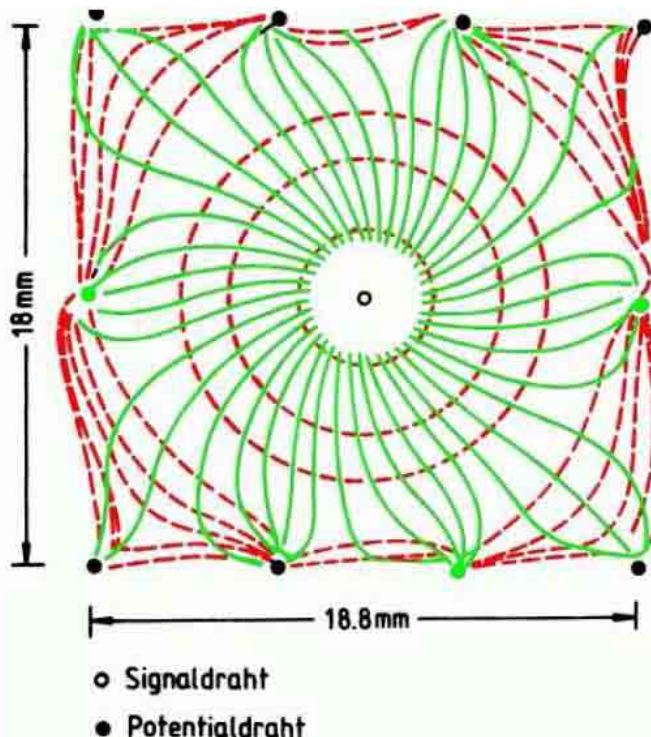
- Früher z.B: Blasenkammern, Nebelkammern  
manuelle und visuelle Rekonstruktion



- Heute z.B. Driftkammer: elektronisch auslesbar  
Signaldraht misst
  - Signal-höhe ( $dE/dx$ )  $\rightarrow$  unterstützt Teilchenidentifikation
  - Signal-zeit (Abstand)  $\rightarrow$  Spurrekonstruktion auf  $\sim 40 \mu\text{m}$
- Oder z.B.: Halbleiterdetektoren, dünn, fein segmentiert

Elektrodenanordnung der ARGUS-Driftkammer: Eingezeichnet sind die

Driftwege (—) und die Linien konstanter Driftzeit (---):

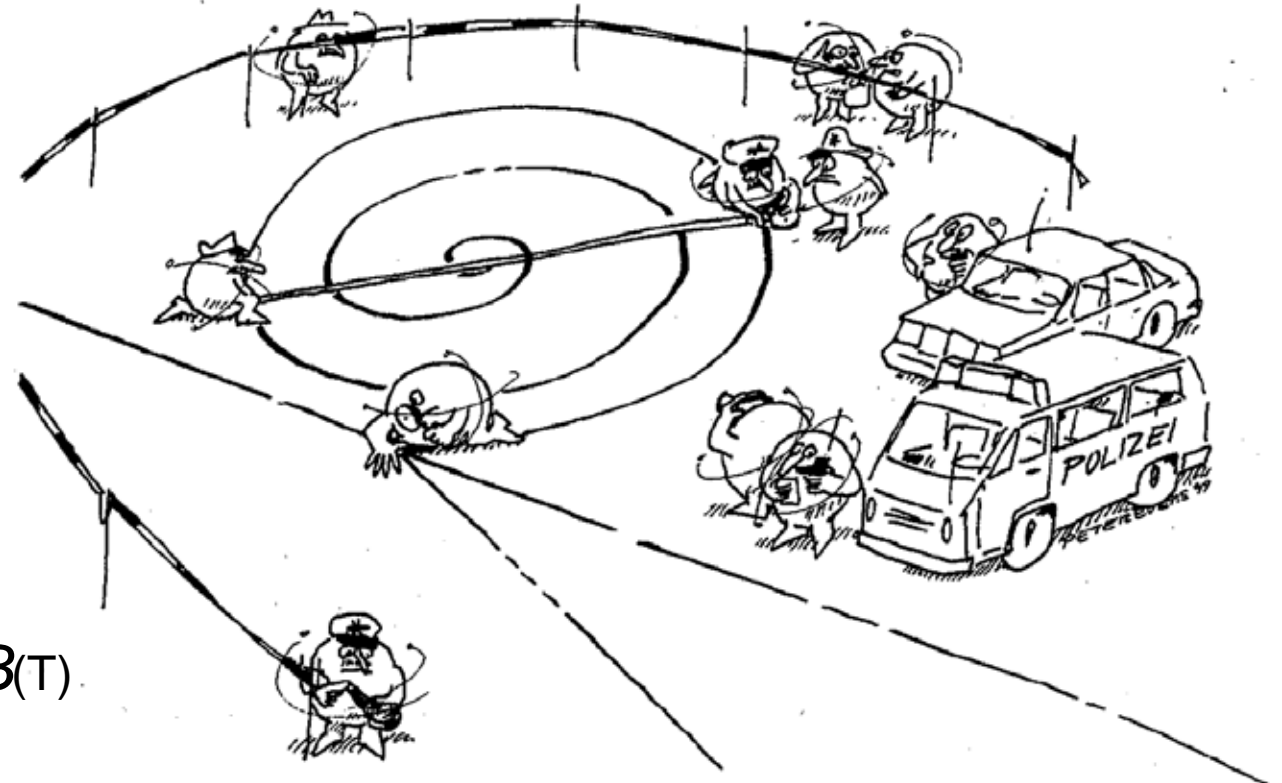


# Impulsrekonstruktion

- Messung des Impulses über Spurkrümmung  $r$  im B-Feld

$$p = Q e r B$$

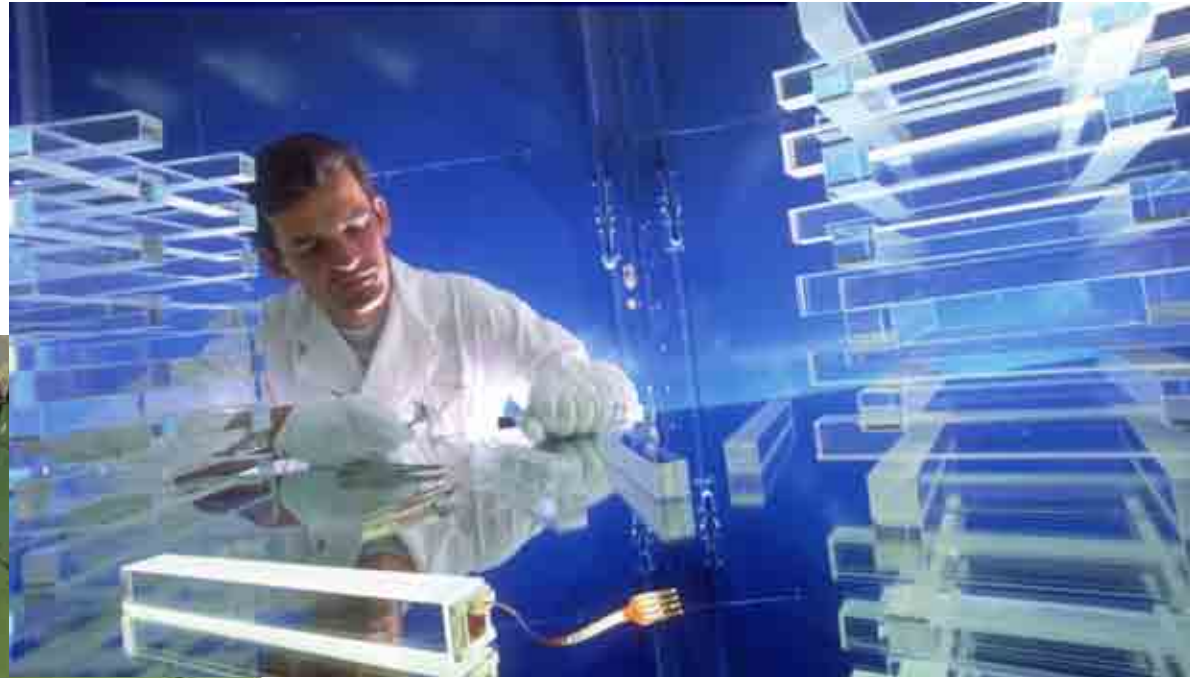
$$p(\text{GeV}) = 0.3 Q r(\text{m}) B(\text{T})$$



AUS DEN SPUREN MUSS MÜHSAM REKONSTRUIERT WERDEN,  
WAS TATSÄCHLICH PASSIERT IST.

# Nächste Lage: Elektromagnetisches Kalorimeter (CMS)

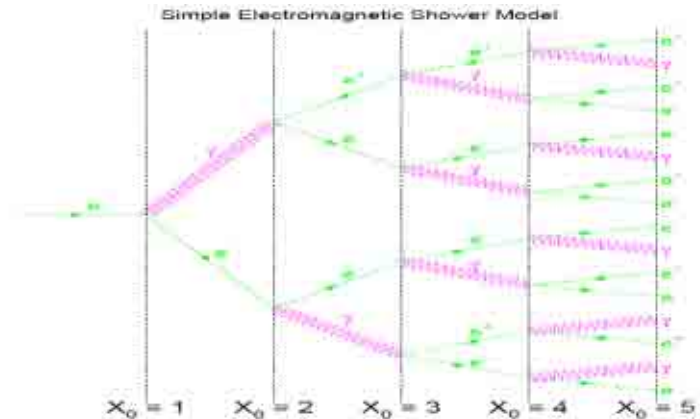
- Ein Kristall:
  - 2cm x 2cm x 23cm
  - $26 X_0$



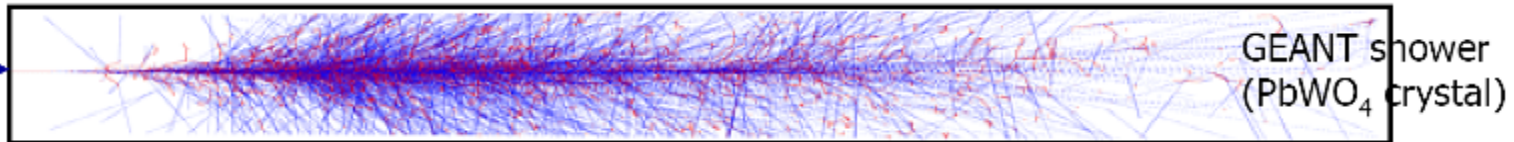
107

Wolfgang Funk - CERN CMS

8



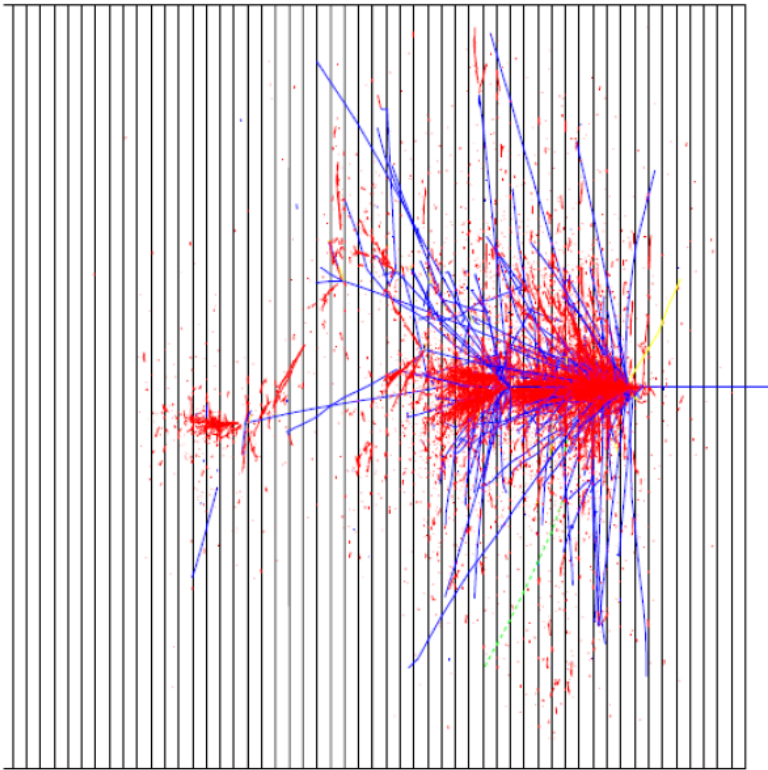
e



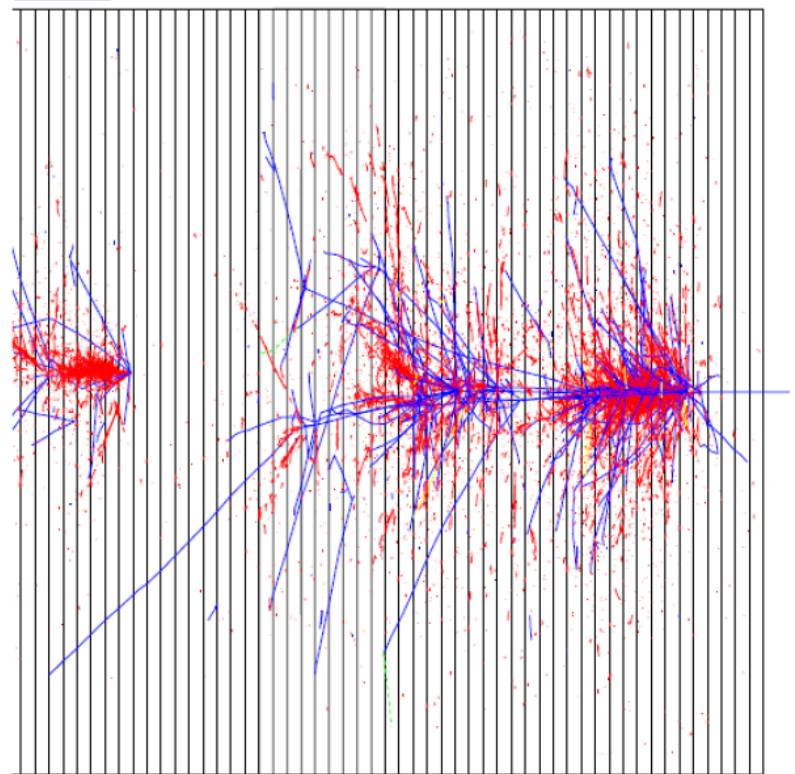
# Nächste Lage: Hadronische Kalorimeter

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

1.

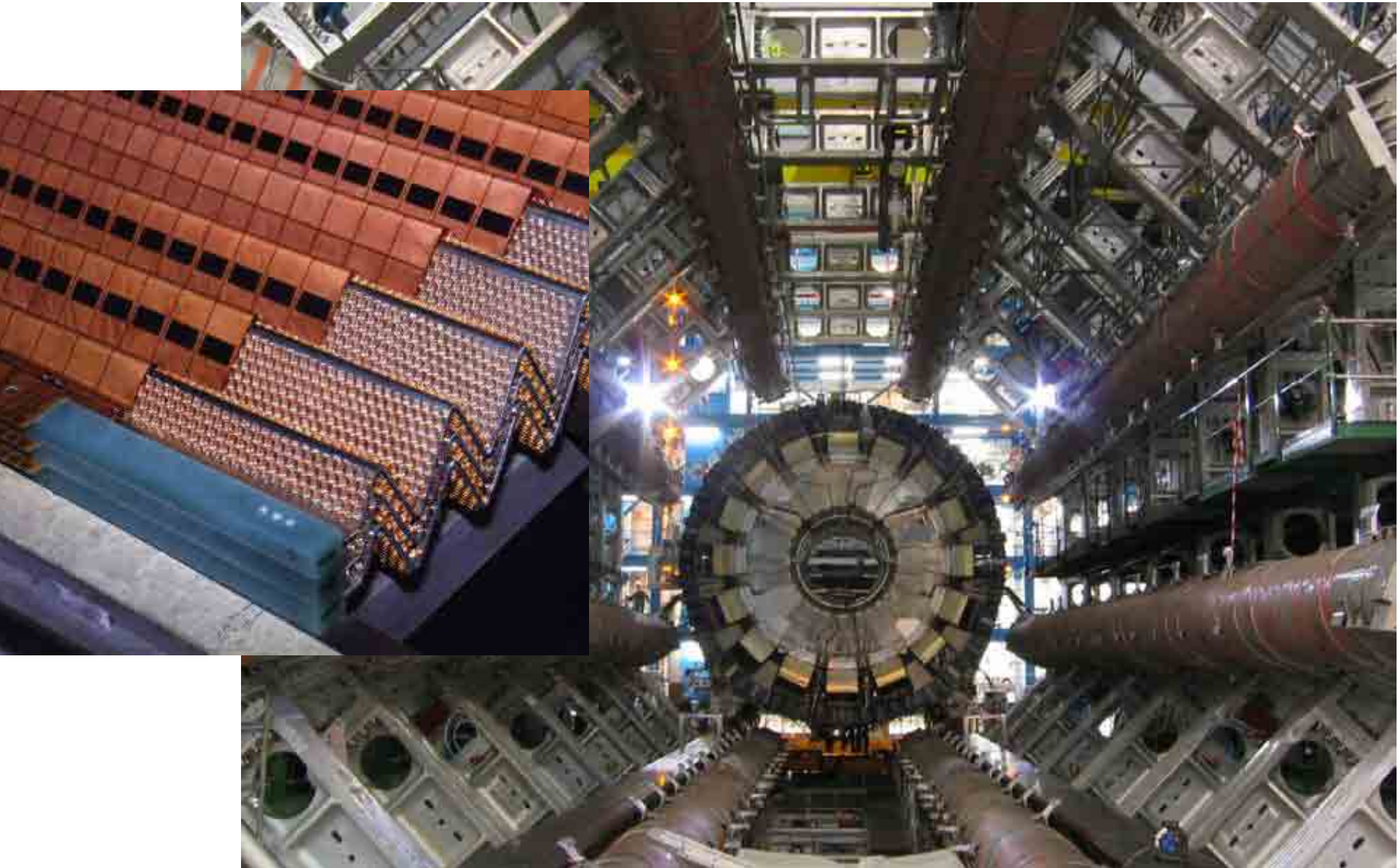


2.

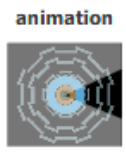


red - e.m. component  
blue - charged hadrons

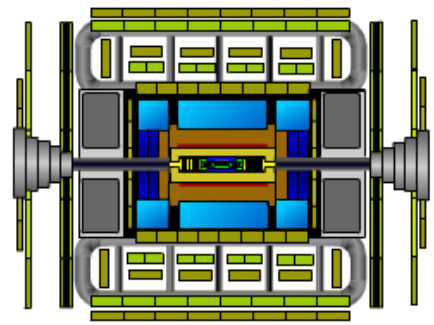
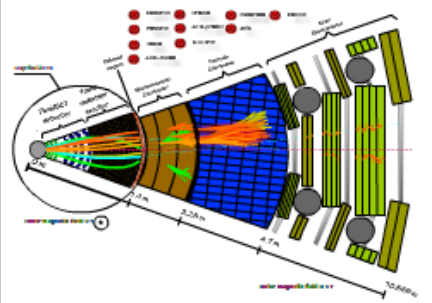
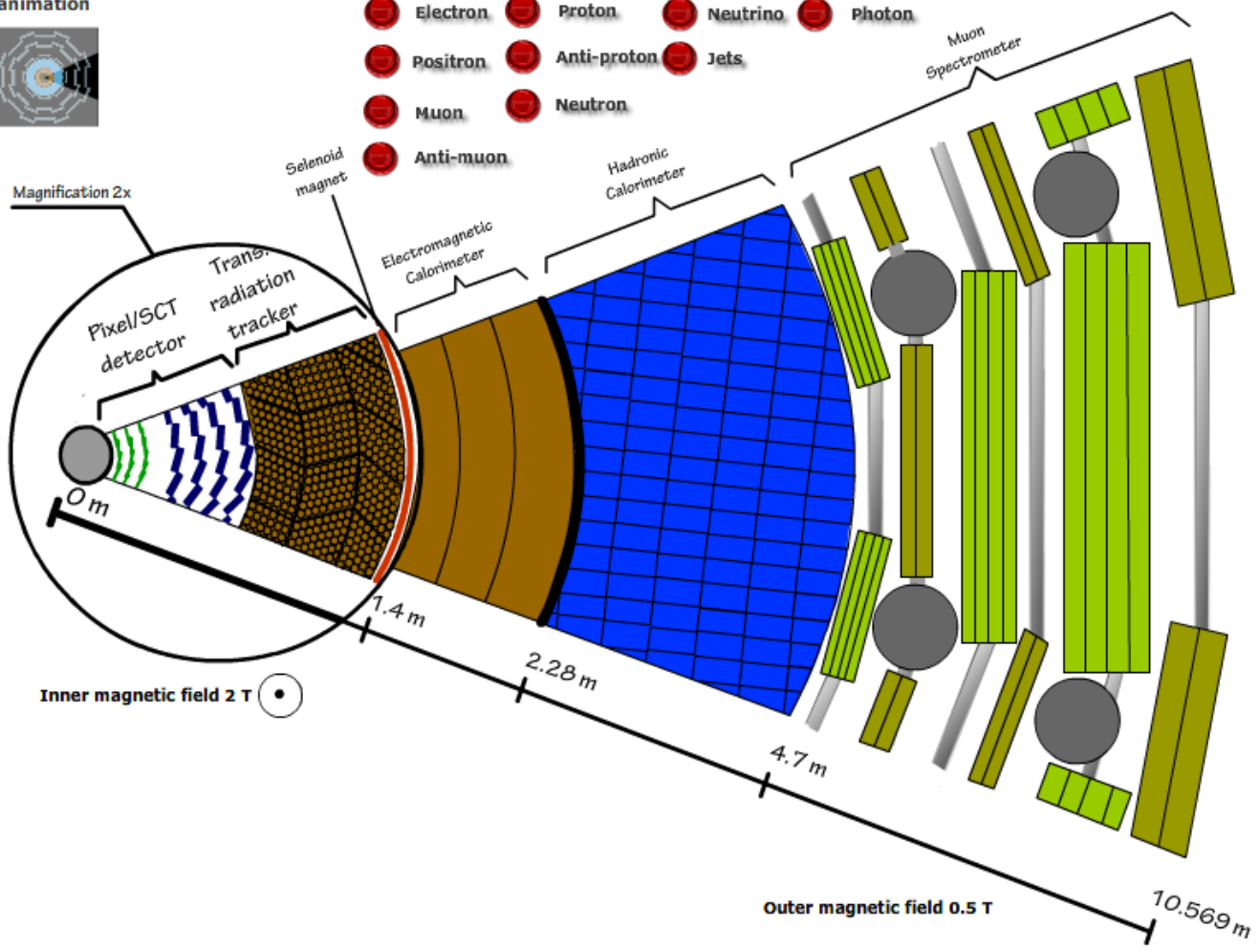
- Das ATLAS Flüssig-Argon Calorimeter: "Akkordeon"



# ATLAS



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



Created by Jeřábek, Jende 2010



Atlas\_9.swf

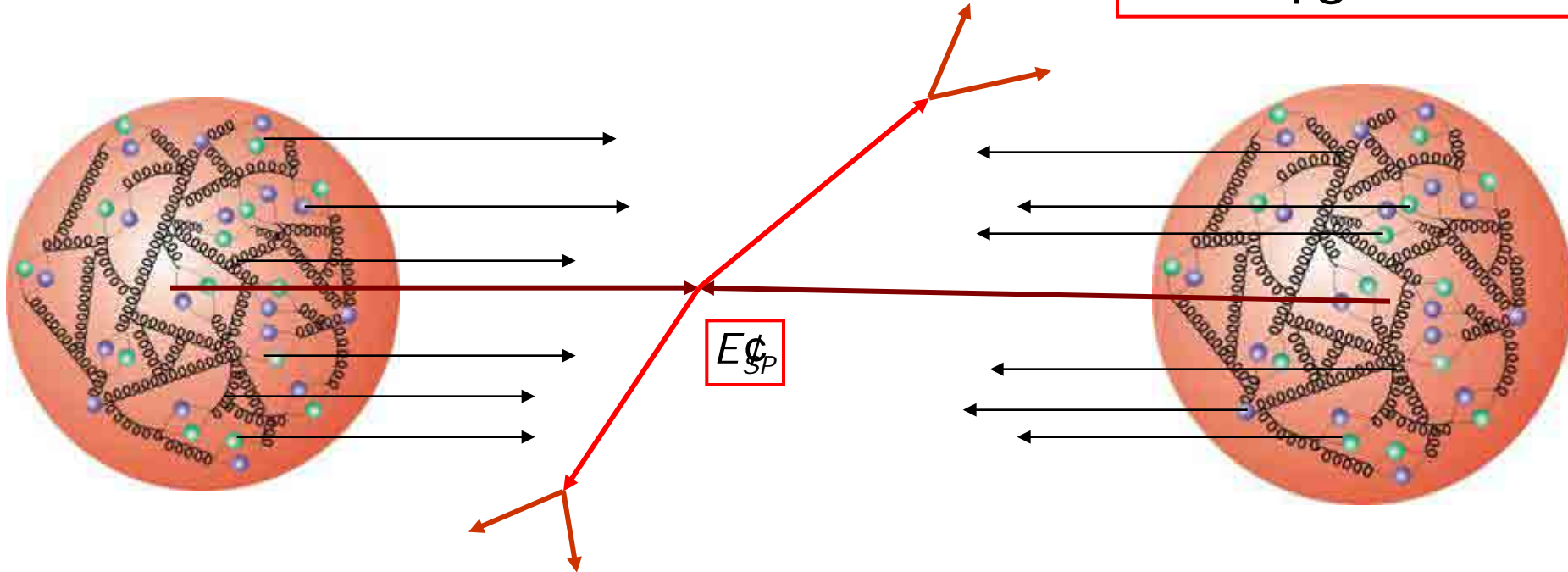
[https://kjende.web.cern.ch/kjende/de/wpath\\_teilchenid1.htm](https://kjende.web.cern.ch/kjende/de/wpath_teilchenid1.htm)

# 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

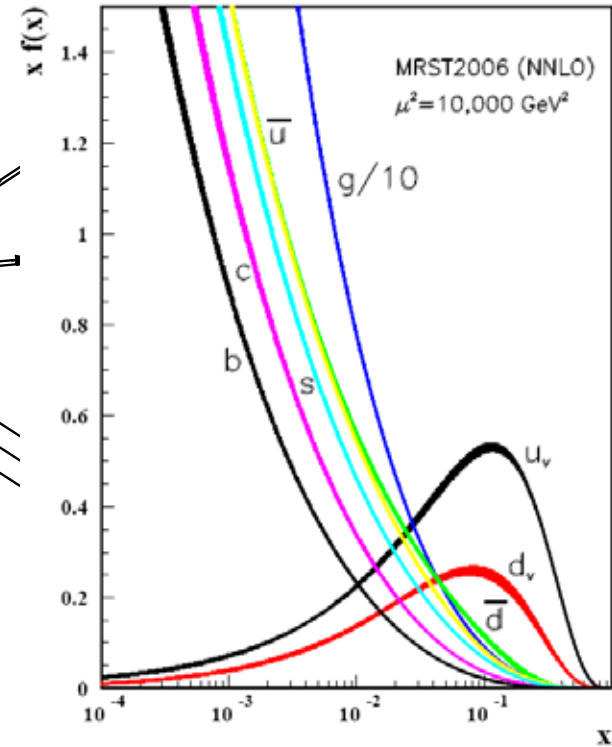
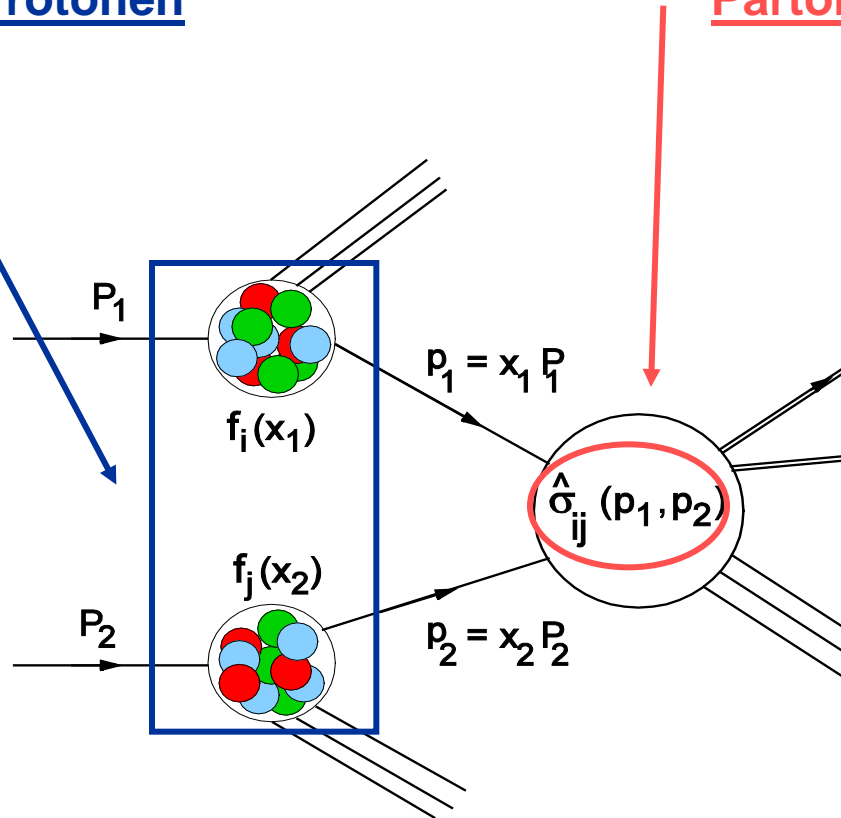
# Mathematisch

$$s = \sum_{ij} \int f_i(x_1) f_j(x_2) \hat{\sigma}_{ij}(p_1, p_2) dx_1 dx_2$$

Innere Struktur  
der Protonen

Wechselwirkung der  
Partonen

**Parton:**  
Bruchteil des  
Protons  
Quark oder  
Gluon

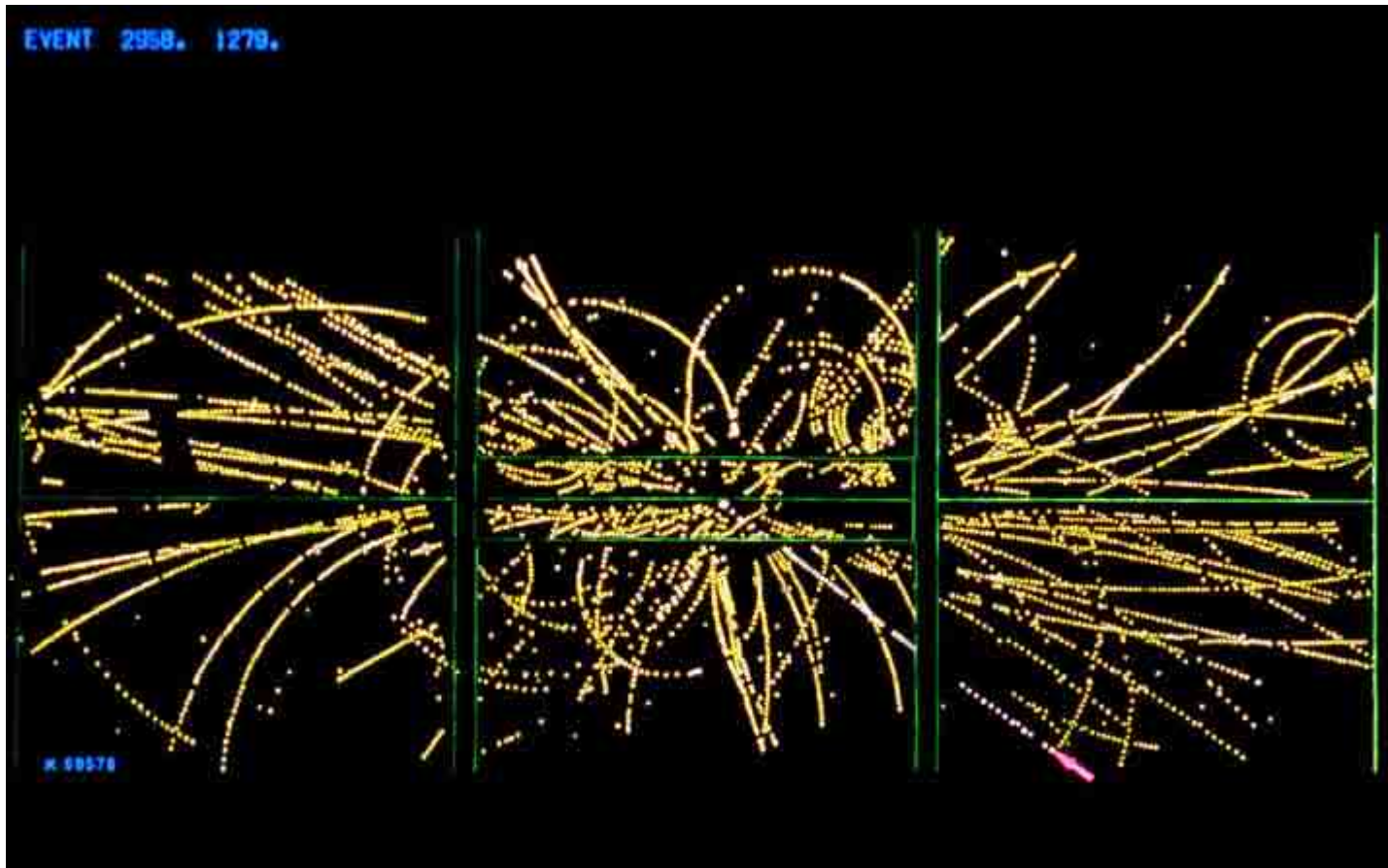


PROTON BESTEHT I.W. AUS  $2u + 1d$  QUARK U. GLUONEN

# Die Entdeckung des W

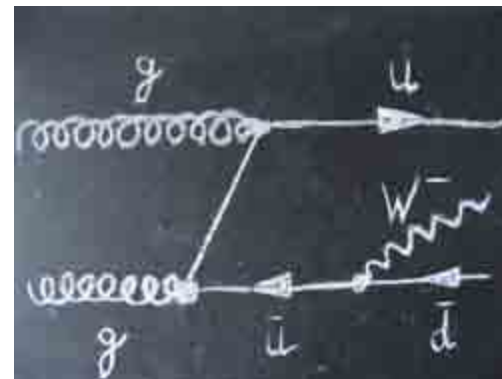
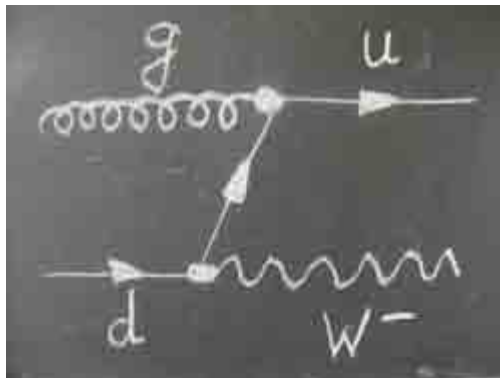
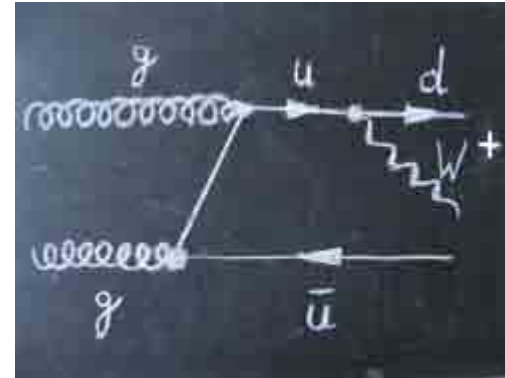
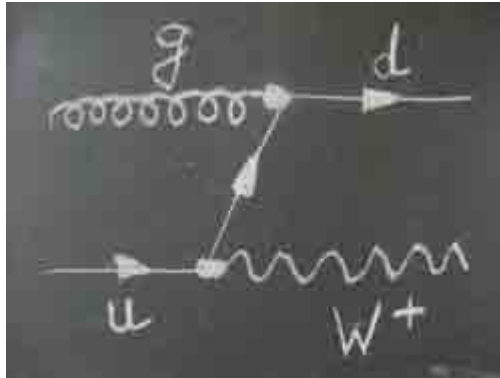
1983 am Super-Antiproton-Proton Synchrotron (S<sup>-</sup> ppS) am CERN

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



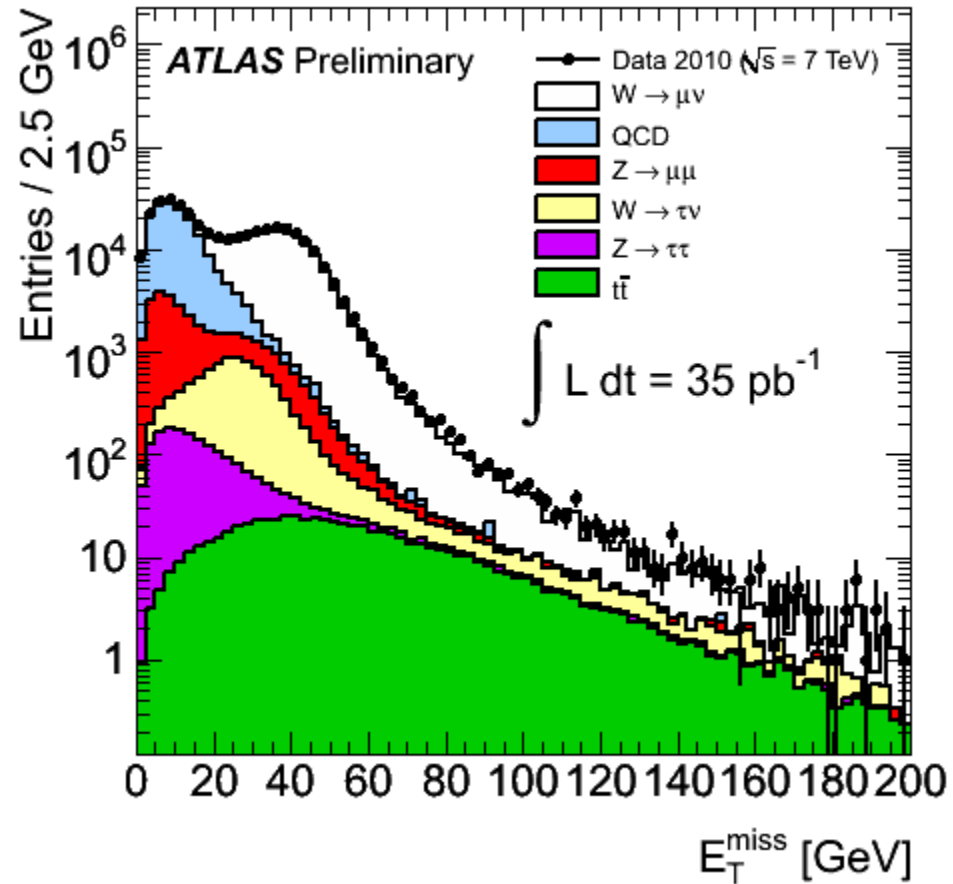
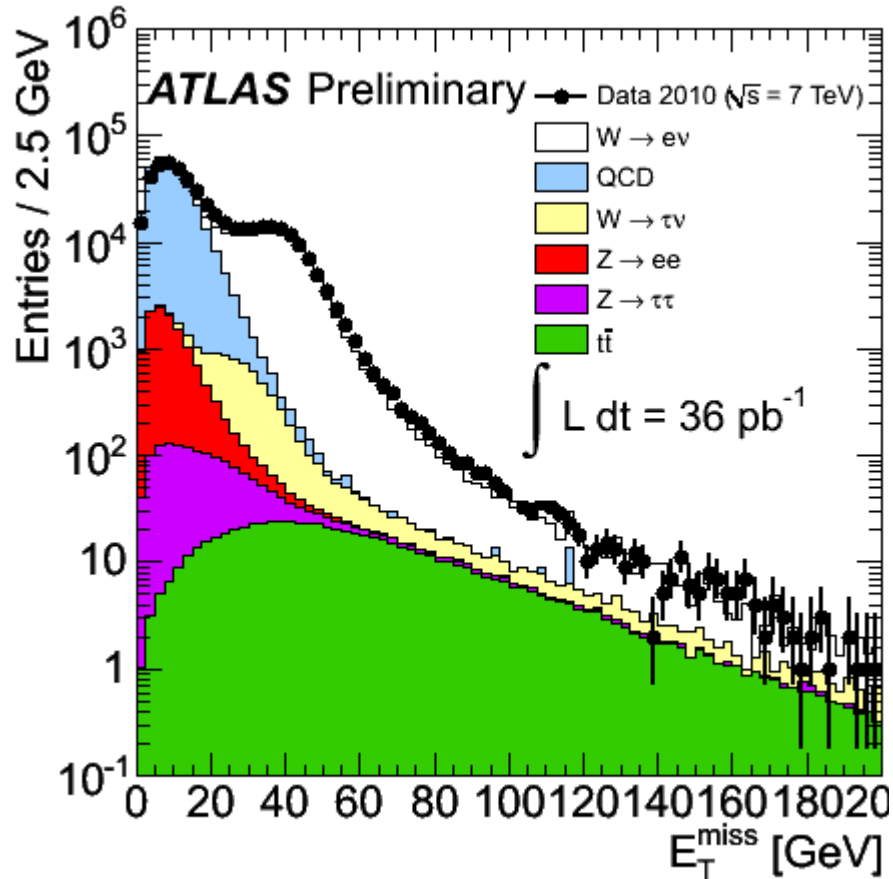
# Mögliche Herstellung am LHC

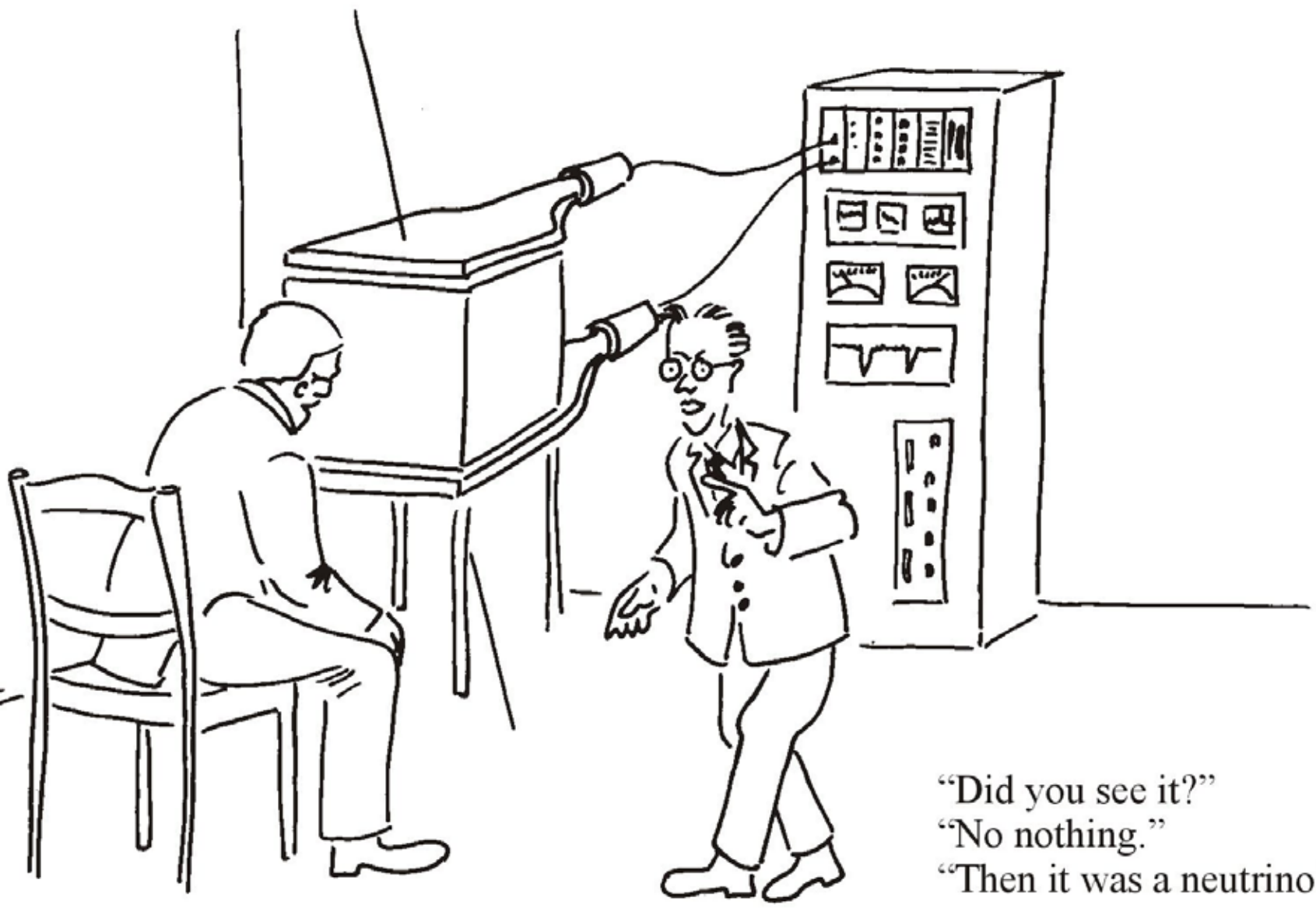
- Entweder durch Gluon-Quark oder Gluon-Gluon



- Aus den auslaufenden Quarks entstehen Jets

# Charakteristik: fehlende Energie



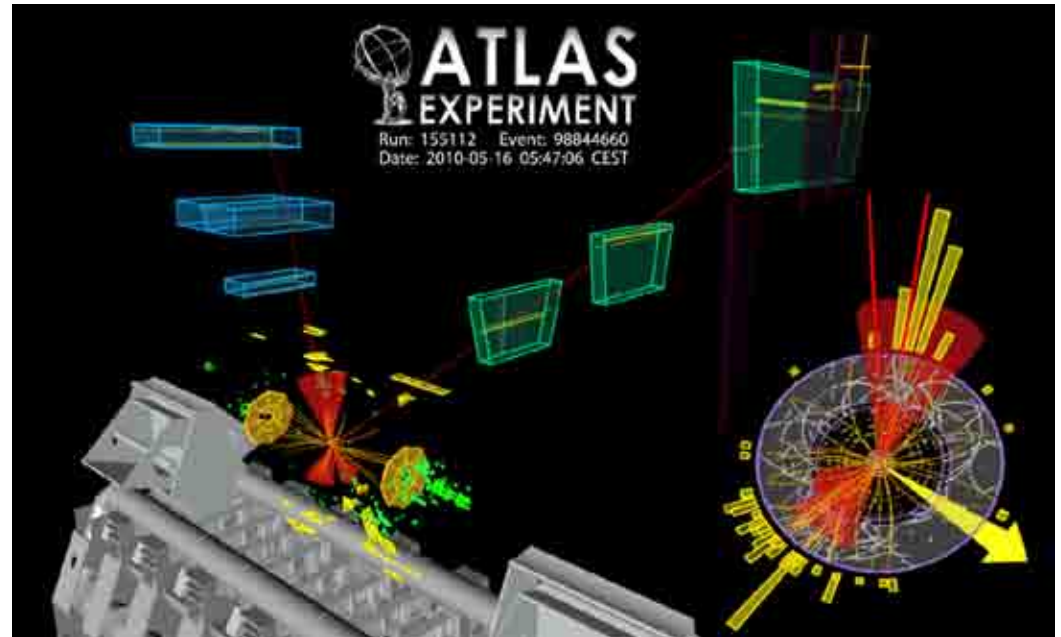
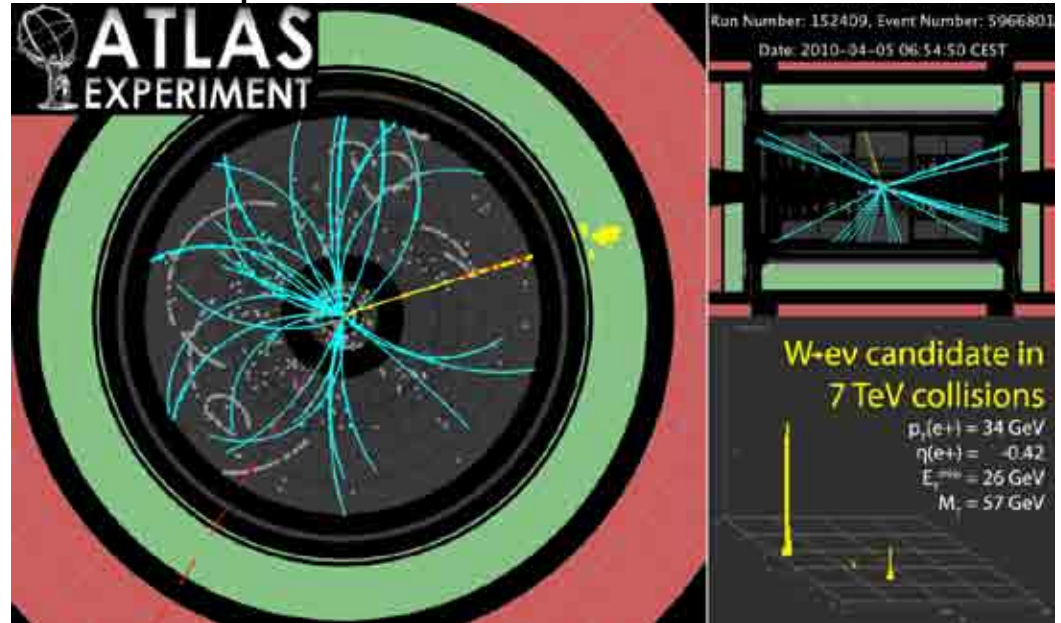
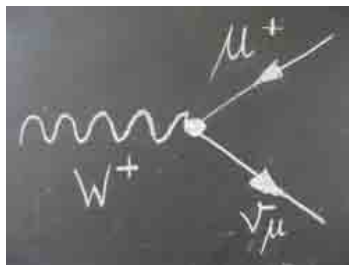
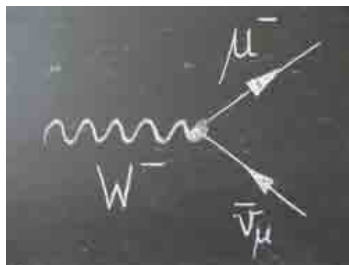
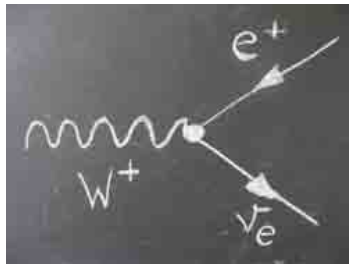
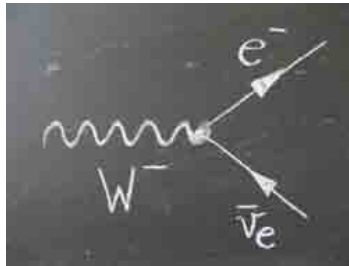


C. Guepou

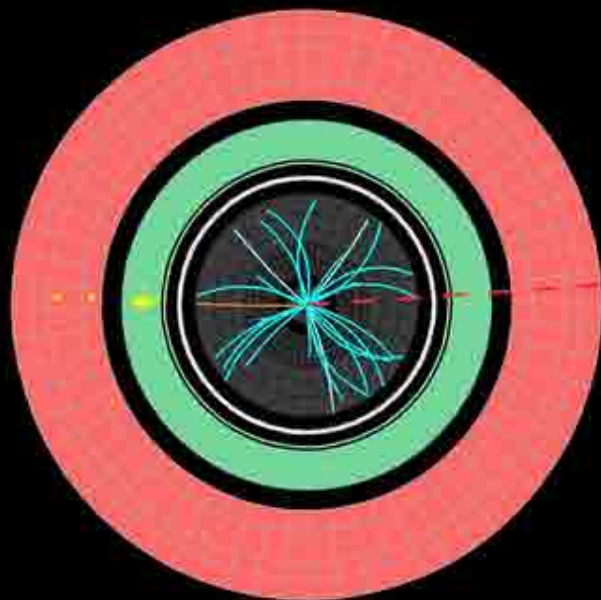
“Did you see it?”  
“No nothing.”  
“Then it was a neutrino!”

# Signaturen des W-Teilchens

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



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

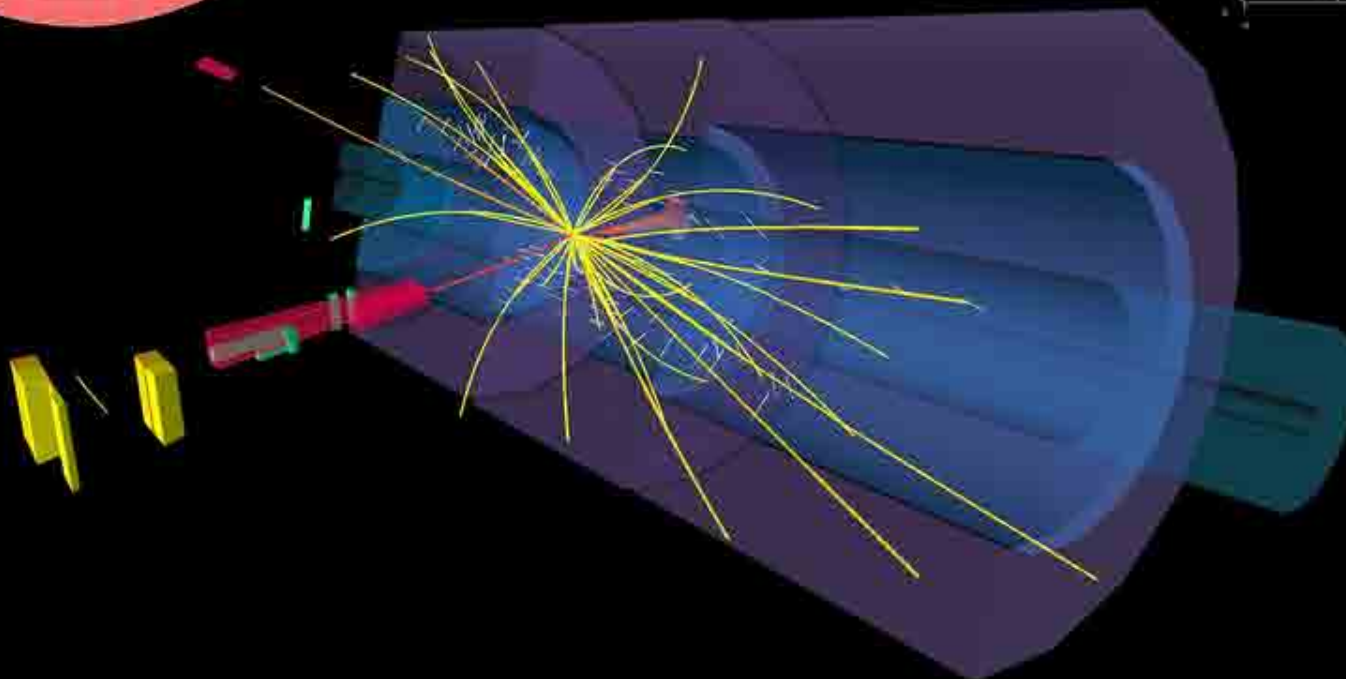
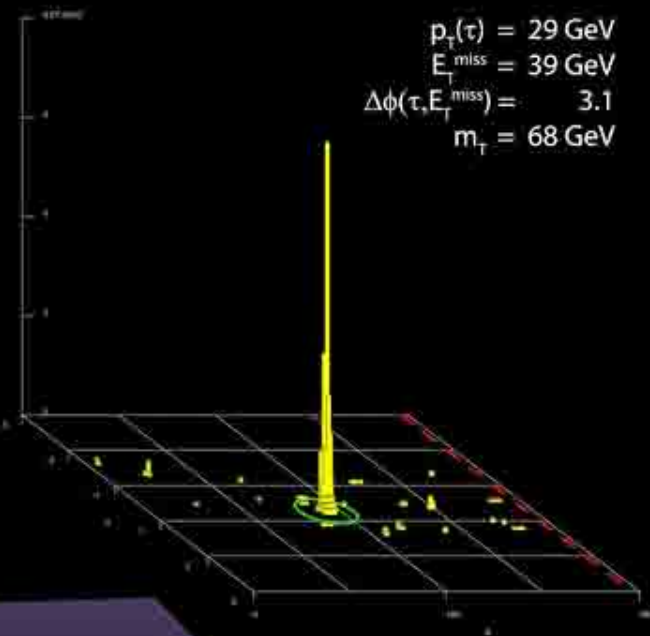


 **ATLAS**  
EXPERIMENT

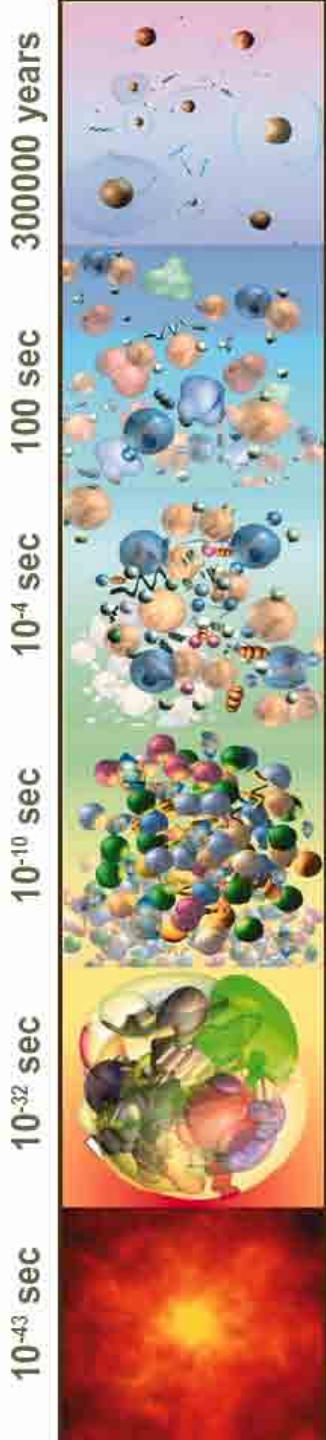
Run 155697, Event 6769403

Time 2010-05-24, 17:38 CEST

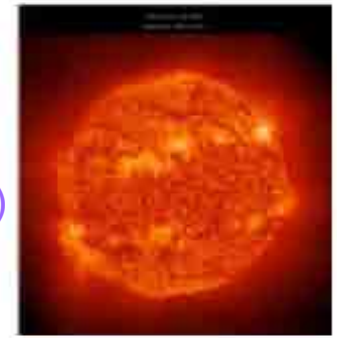
$W \rightarrow \tau \nu$  candidate in  
7 TeV collisions



# Massen der Teilchen



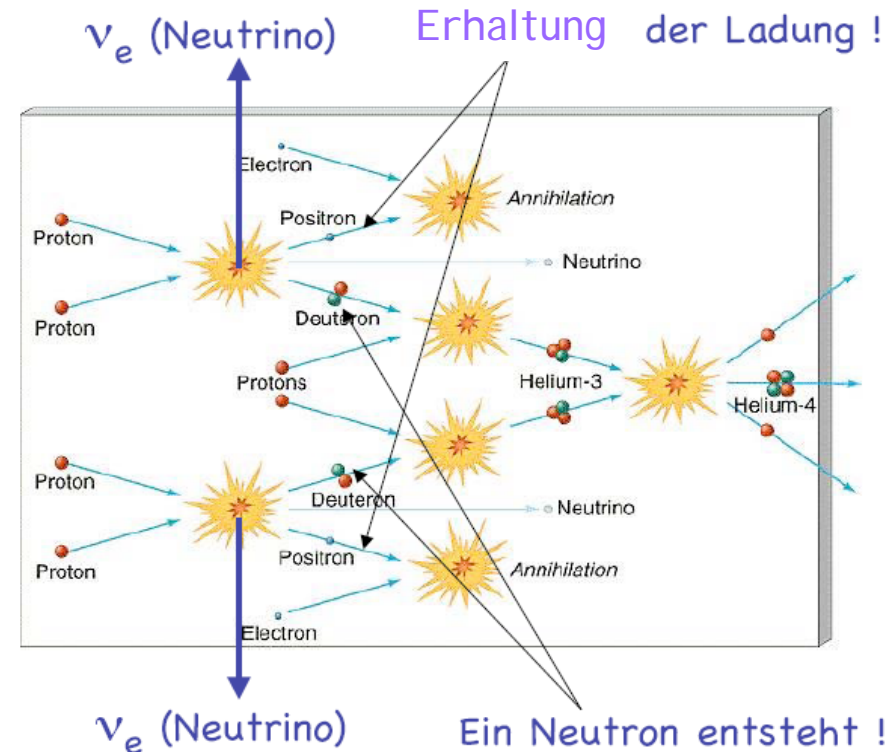
- Unter Benützung experimenteller Teilchenmassen beschreibt Theorie der schwachen Kraft alles, z.B.
- langsames Brennen der Sonne
  - $p + p \rightarrow D + e^+ + n$  (Energiegewinn:  $\Delta E = 0,5 \text{ MeV}$ )
  - Masse des Zwischenzustands  $m_W = 80400 \text{ MeV}$
  - Rate unterdrückt um  $\sim (\Delta E / m_W)^4 > 10^{20}$



## 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>172000</b>	<b>0</b>
...		

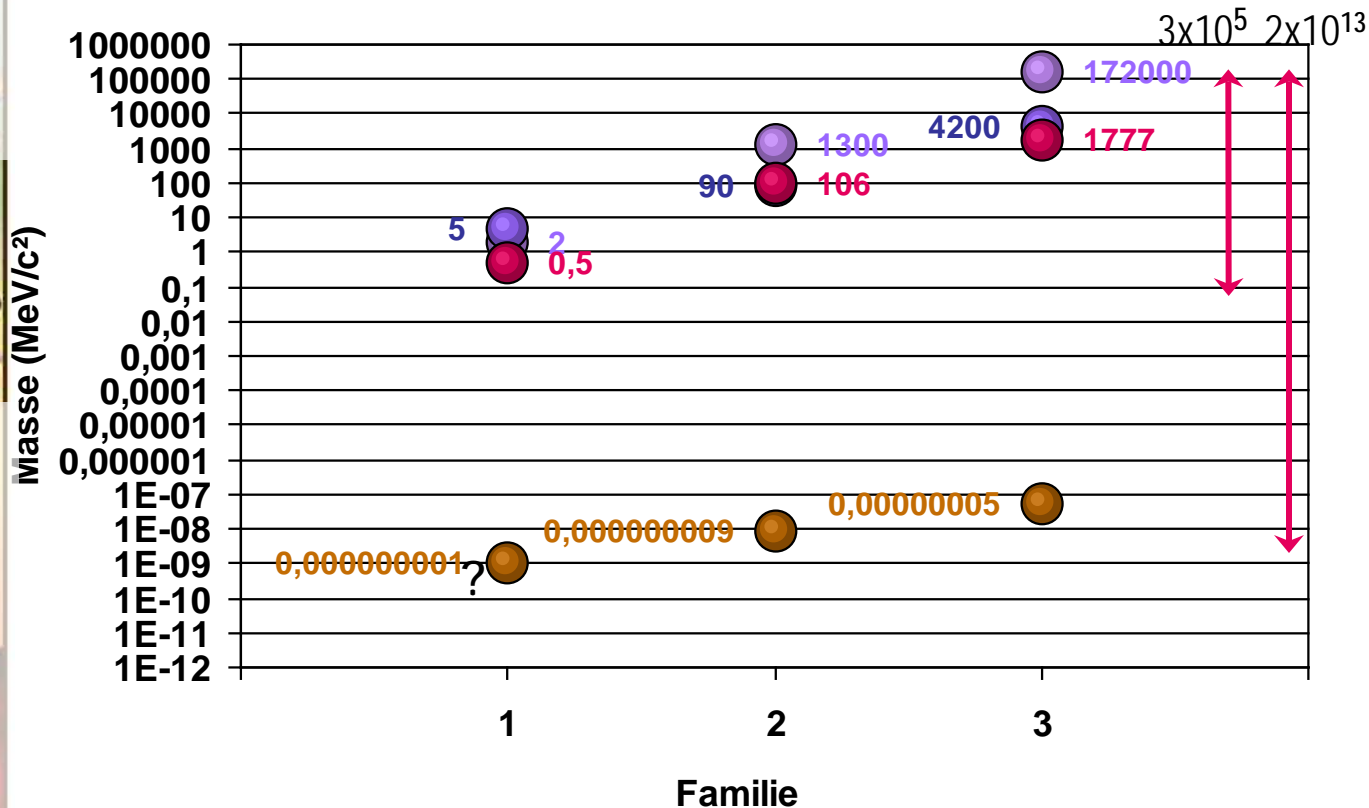
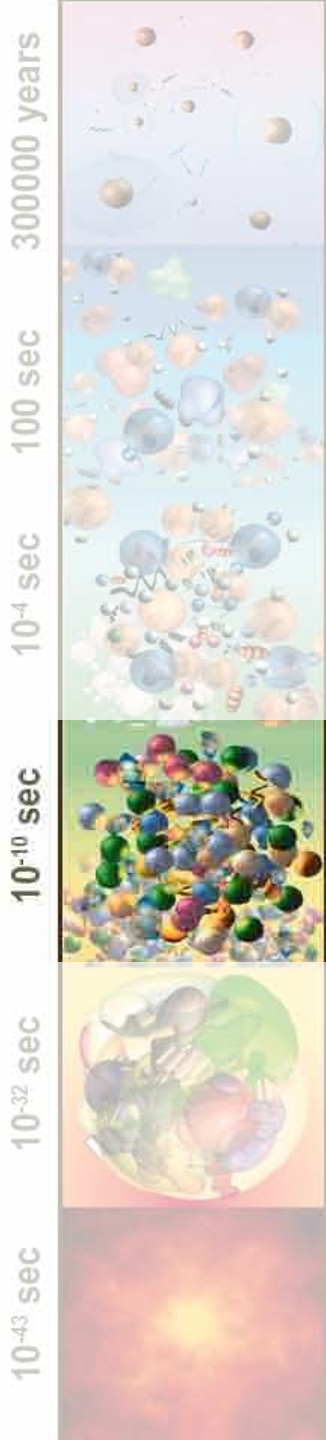
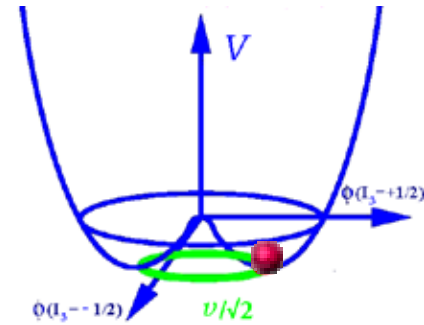
- Grund: schwache Eichsymmetrie



# Die Ruhemassen der Bausteine

## n Symmetrien erfordern masselose Teilchen

- Erhalten Masse erst  $\sim 10^{-11}$  sec nach Urknall durch „spontane“ Symmetriebrechung
- Entsteht Masse durch Kopplung an ein „Higgs“ Hintergrundfeld?
- Was verursacht die riesigen Massenunterschiede ?



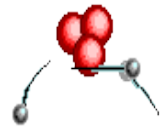
- Up Typ
- Down Typ
- Lepton +/-
- Neutrino

# Die Bedeutung der Teilchenmassen

## Ⓡ Größen- und Energieskala der Atome (Moleküle, Festkörper, Lebewesen, ...)

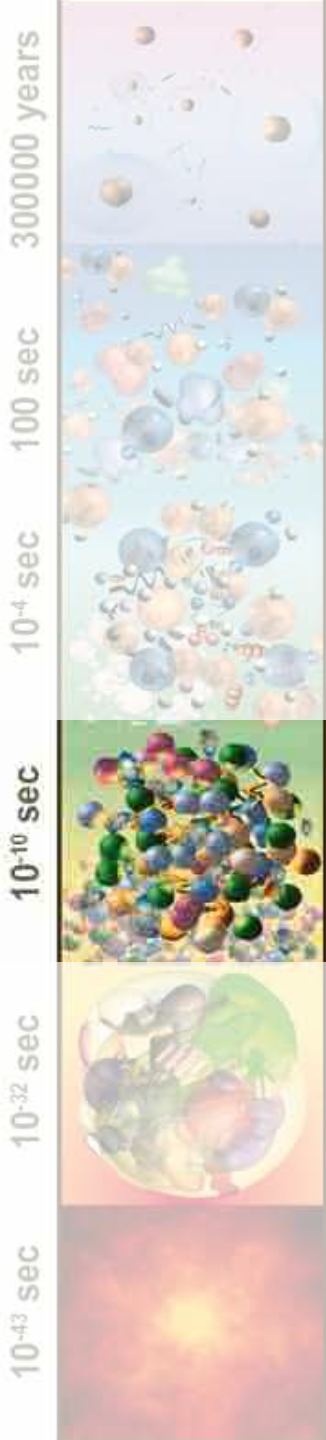
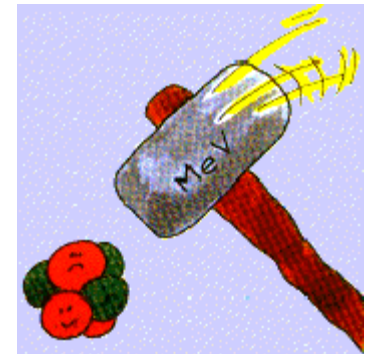
Elektronmasse regiert atomare **Energien** und **Radien**

- Ⓡ Bindungsenergie steigt mit  $m_e$
- Ⓡ Atomdurchmesser fällt mit  $1 / m_e$

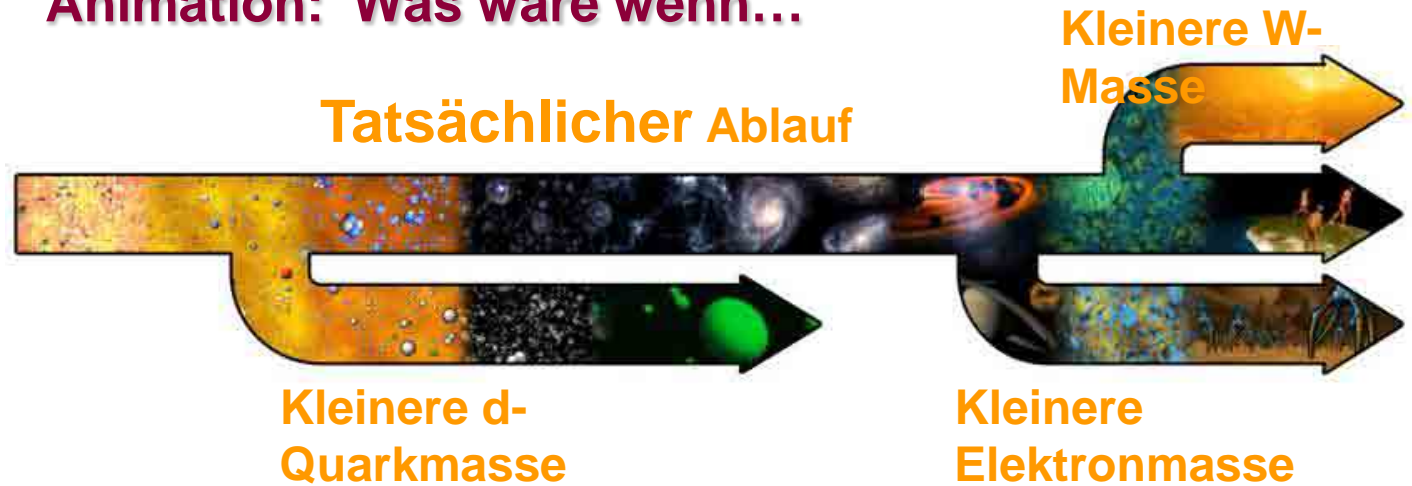
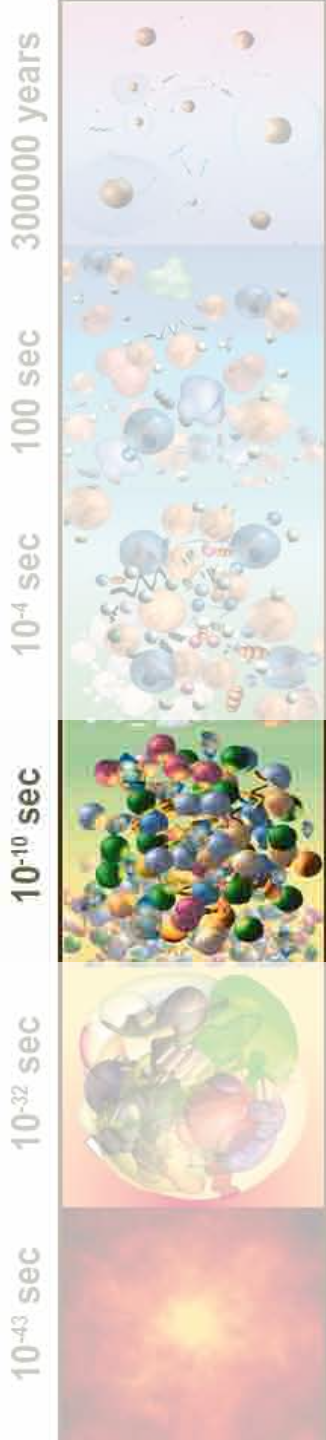


## Ⓡ Stabilität der Nukleonen: Feine Abstimmung zwischen

- Ⓡ Starker Kraft
- Ⓡ Elektromagn. Abstoßung der Quarks
- Ⓡ Massen(differenzen):  $m_d - m_u$ ,  $m_d - m_e$



# Animation: Was wäre wenn...



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

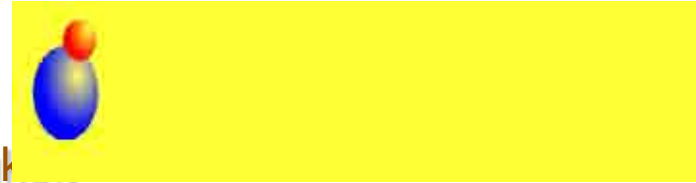
Download: : [www.teilchenphysik.de/multimedia/informationmaterial/veranstaltungen](http://www.teilchenphysik.de/multimedia/informationmaterial/veranstaltungen)

- 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?

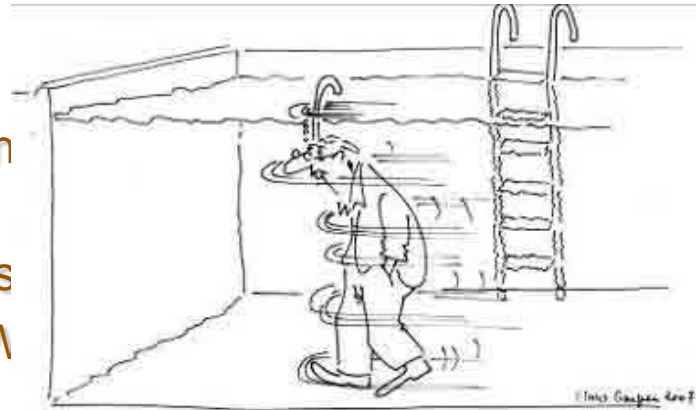
## in “Leeres” Vakuum

- Alle Teilchen sind masselos
- bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit



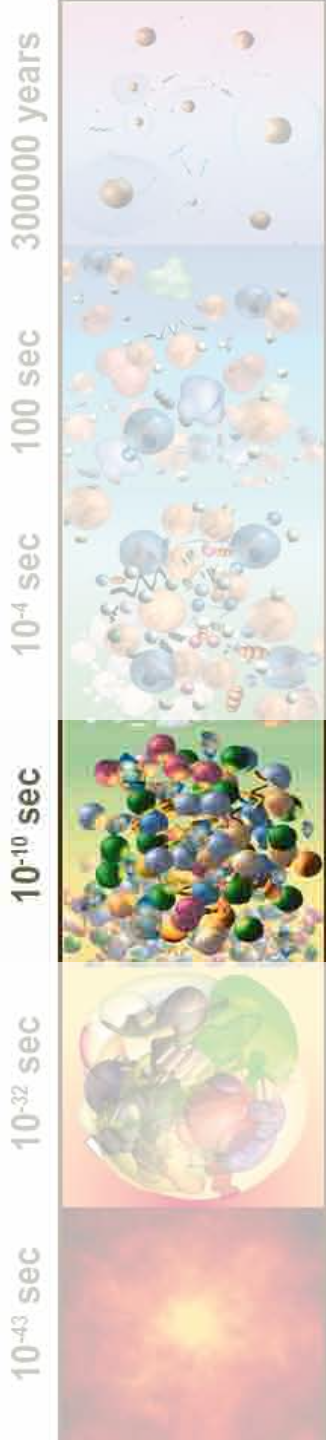
## in Higgshintergrundfeld

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



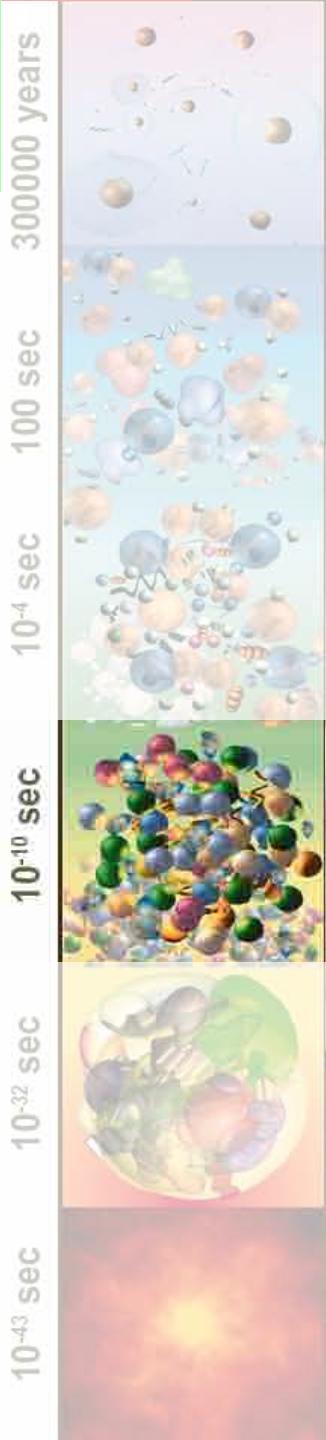
## in Higgs-Teilchen

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



# Mechanische Analogie zur Higgs Produktion

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

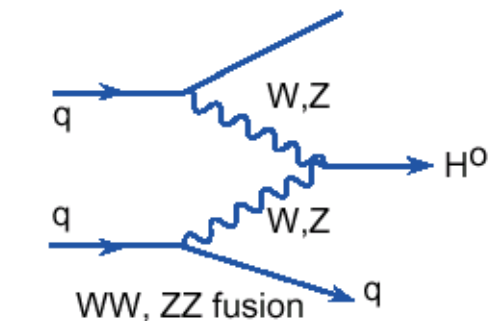
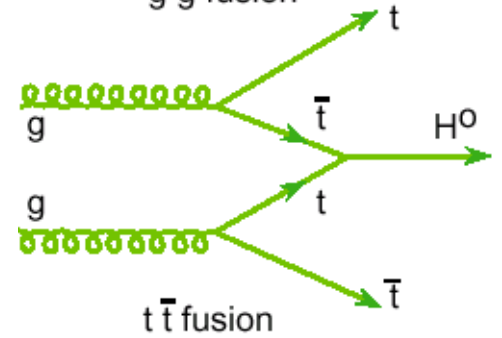
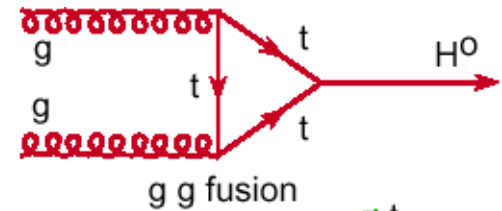
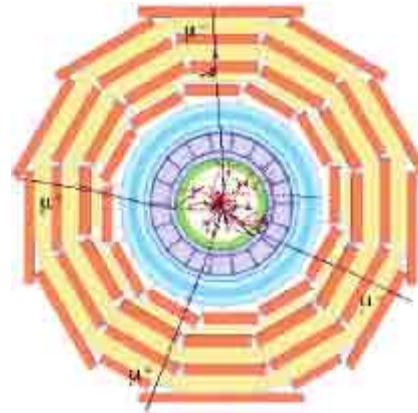
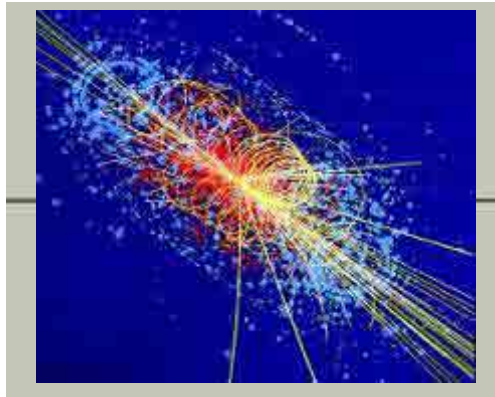


# Higgs Suche bei ATLAS und CMS

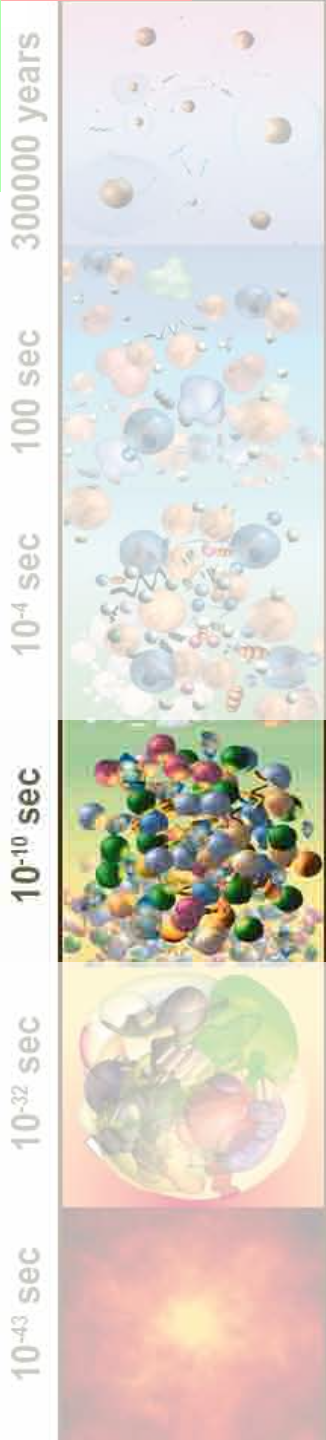
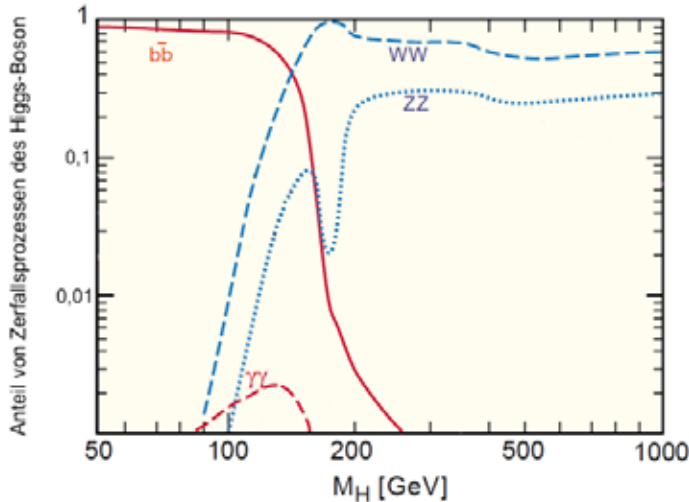
à [www.atlas.ch/multimedia](http://www.atlas.ch/multimedia)

n Higgs Masse unbekannt:

- Viele Produktionsmechanismen
- Viele mögliche Zerfälle



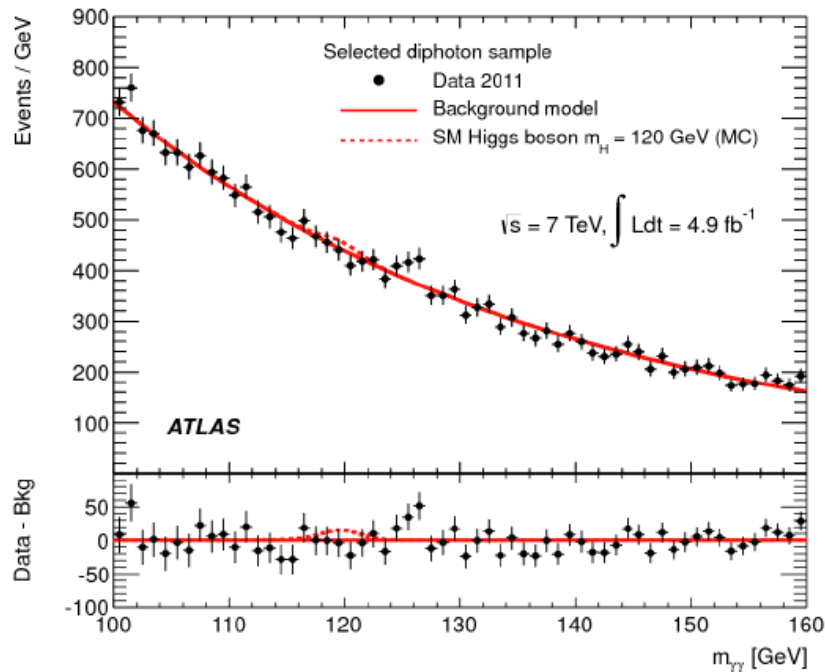
• Als Funktion der Masse vorhersagbar



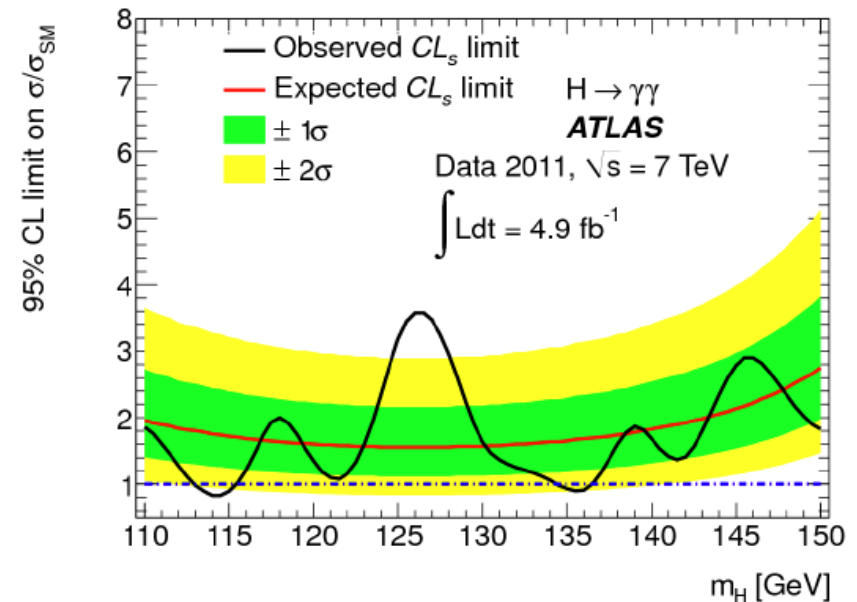
# ATLAS Suche nach $H \rightarrow \gamma\gamma$ (7. März 2012)

- Signatur:  
Anhäufung bei bestimmter „invarianter“ Masse  $m_{\gamma\gamma}$

Invariant  $m_{\gamma\gamma}$  distribution,  
summed over all categories:



Exclusion limit:



- Observed exclusion:  
113-115 GeV, 134.5-136 GeV.

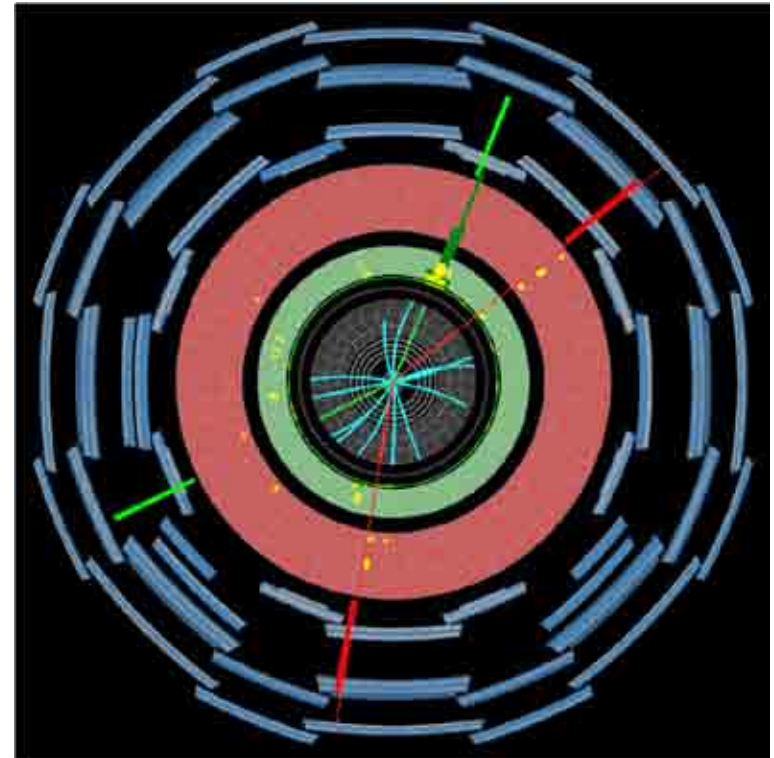
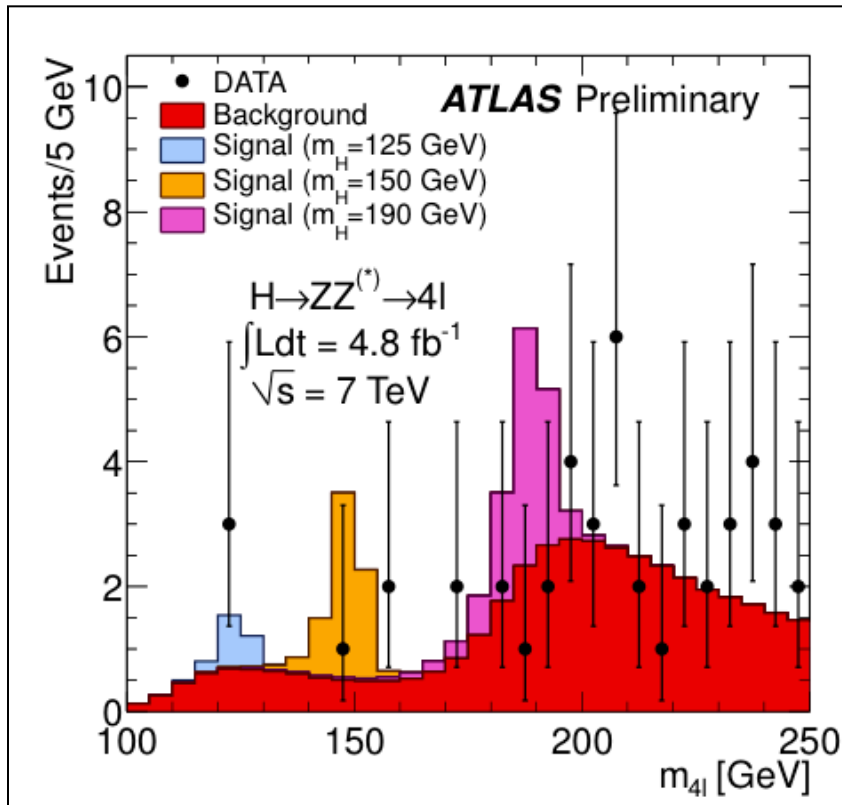
Largest excess of events observed at 126.5 GeV.

- Local significance:  $2.8\sigma$  (Global:  $1.5\sigma$  for  $m_H = 110-150$  GeV).

✓ „Goldener Kanal“ (kein „Untergrund“ außer echten ZZ)

✓ Am sensitivsten für  $200 \text{ GeV} < m_H < 275 \text{ GeV}$

✓ Am zweitsensitivsten (nach WW) für  $130 \text{ GeV} < m_H < 200 \text{ GeV}$



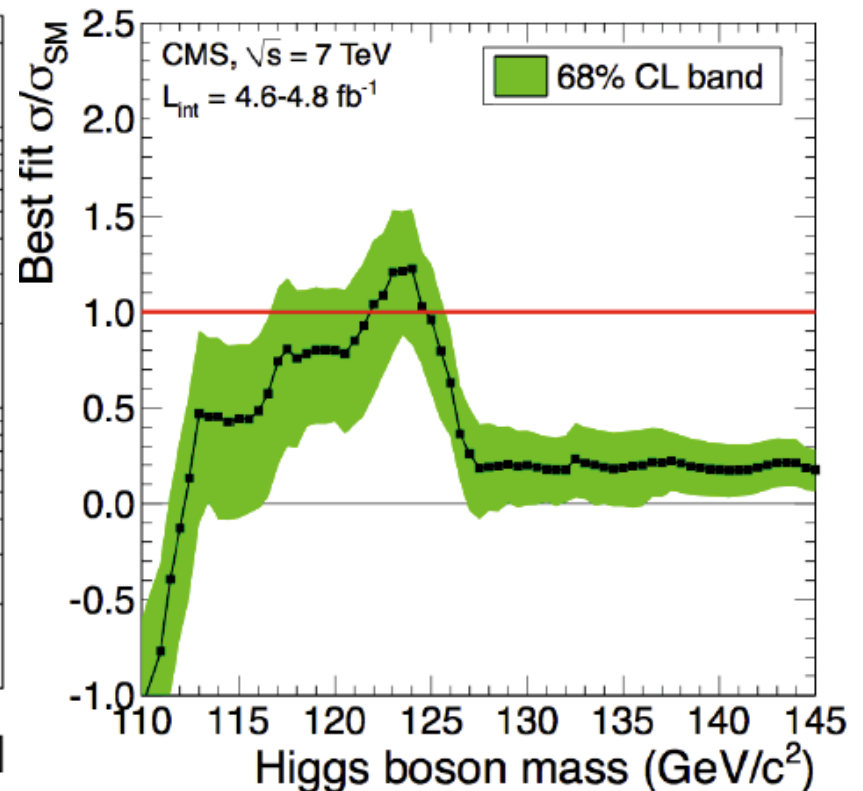
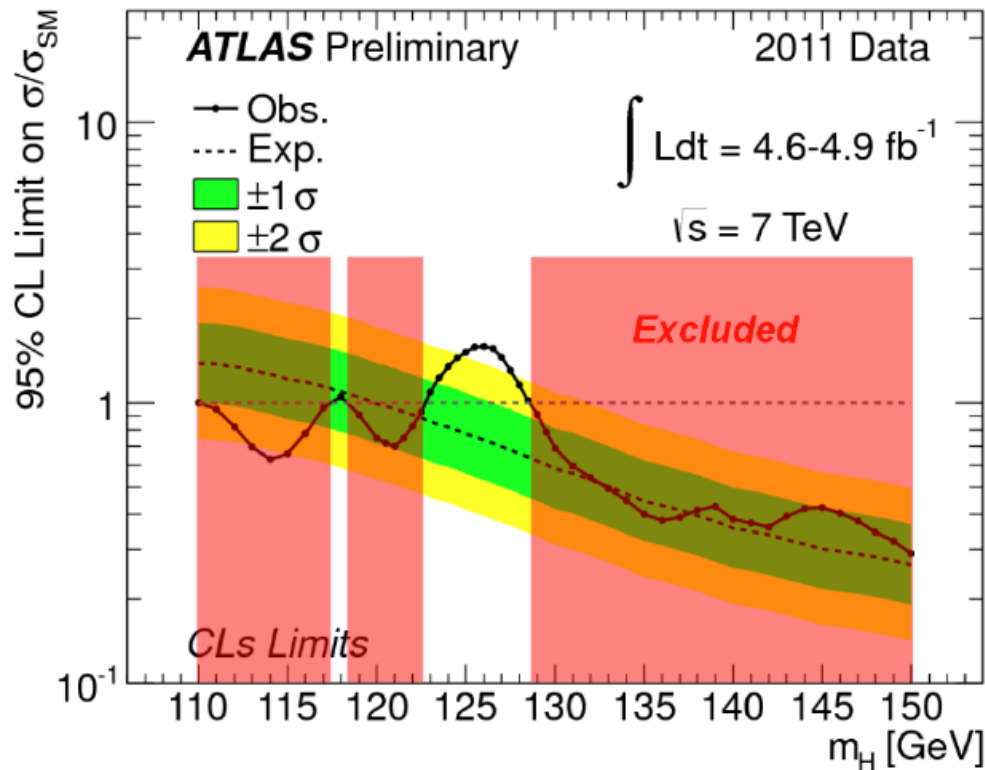
## ATLAS

∨ Ausschlussgebiete möglicher Massen des Higgs Bosons

## CMS

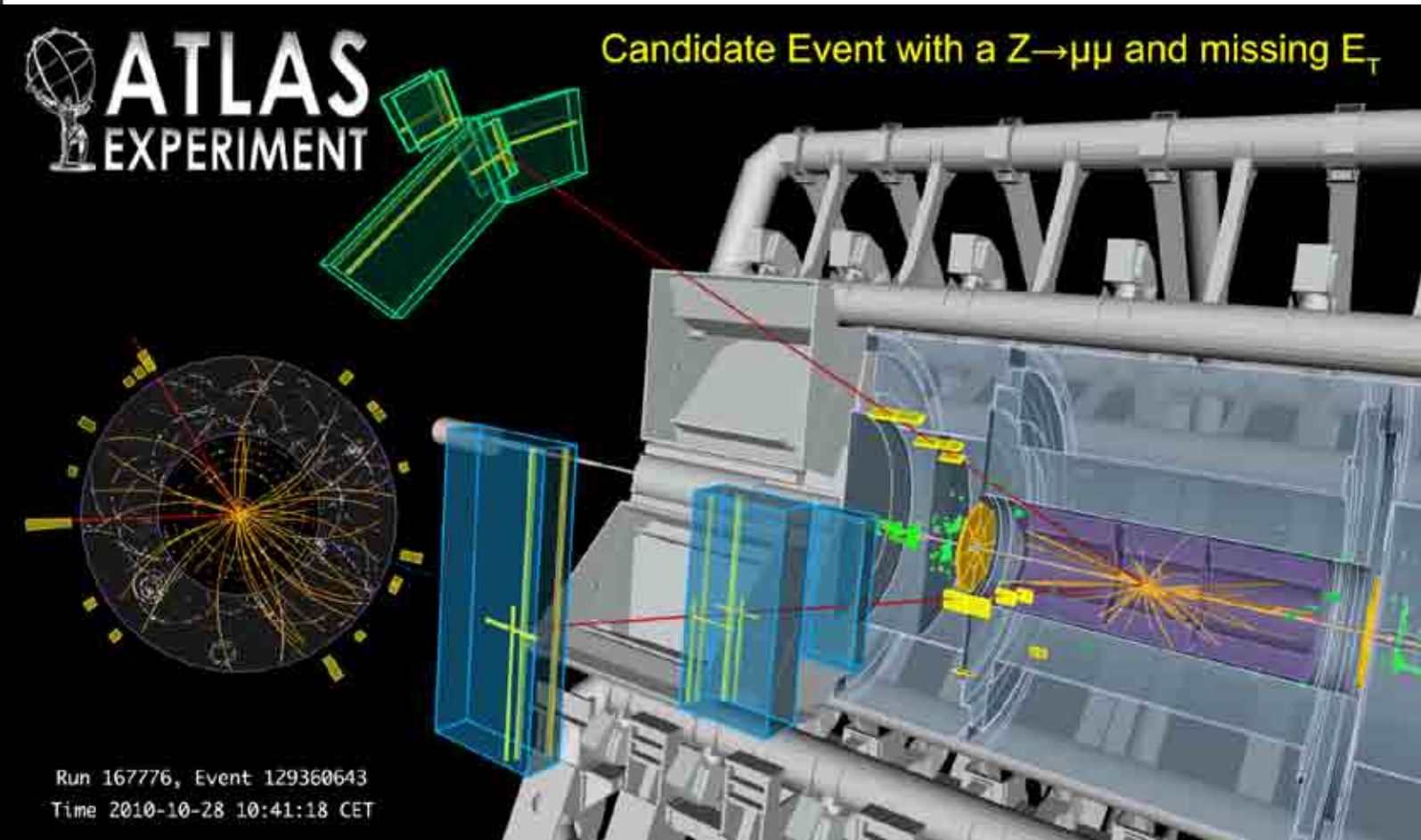
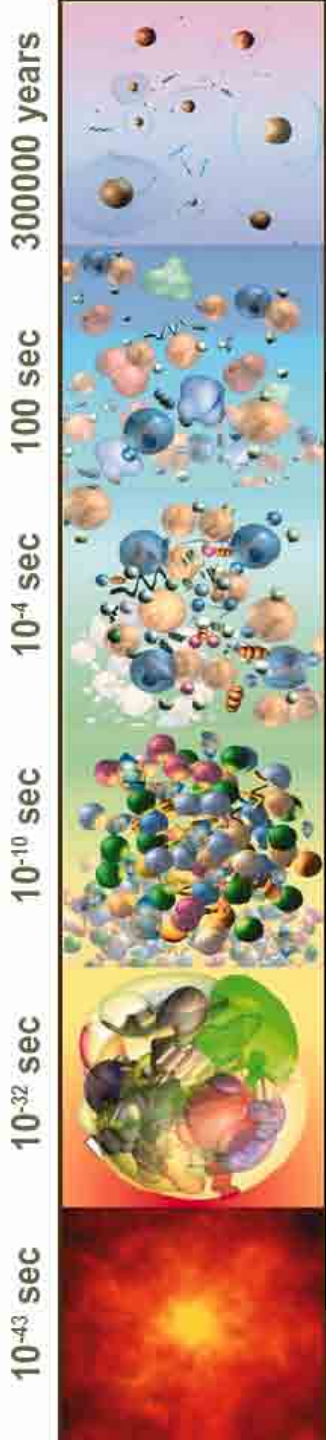
∨ Vereinbarkeit der Häufigkeit mit der Vorhersage

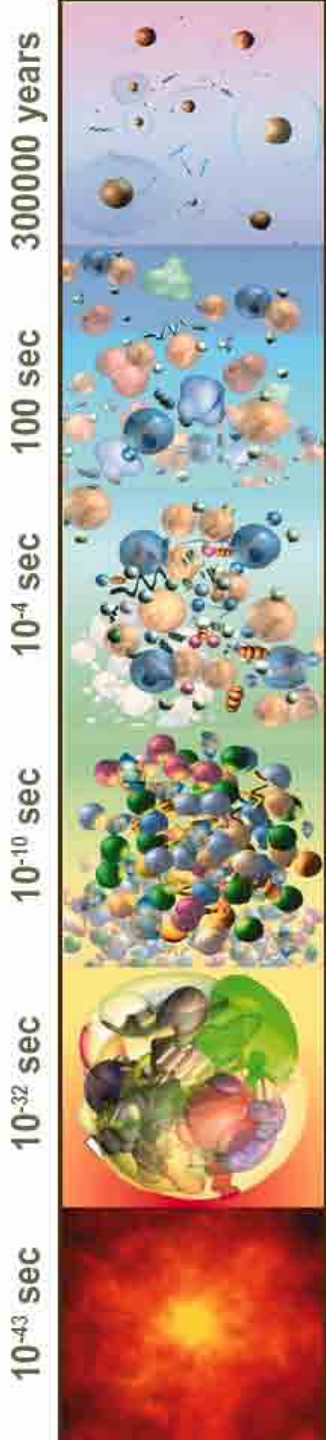
arXiv:1202.1488  
Accepted by PLB



# Zweite Aufgabe für später

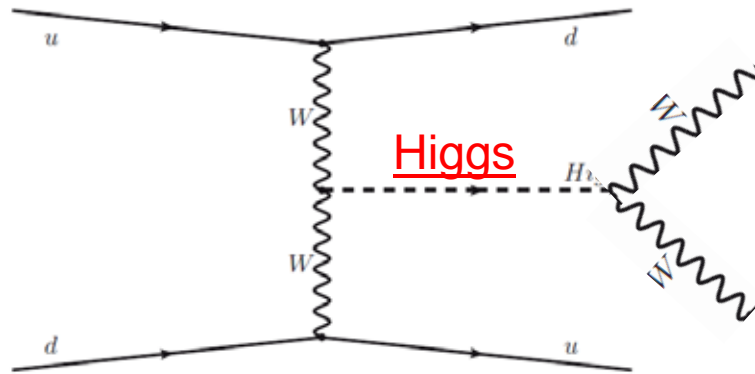
- Finden Sie Kandidaten für  $H \rightarrow W^+ W^-$





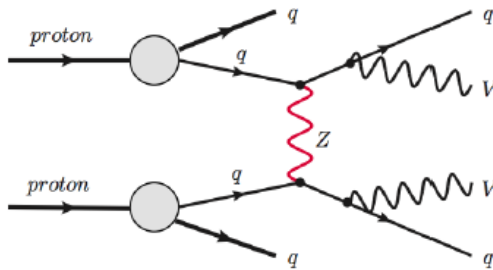
# Konkurrenz anderer echter WW Erzeugung

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

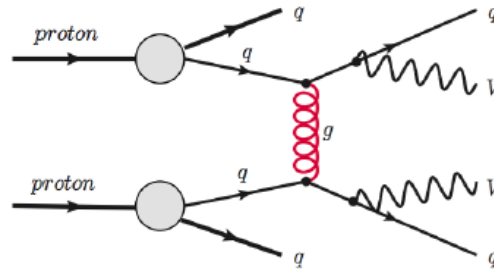


n Untergrund aus anderer  $W^+ W^-$  Erzeugung

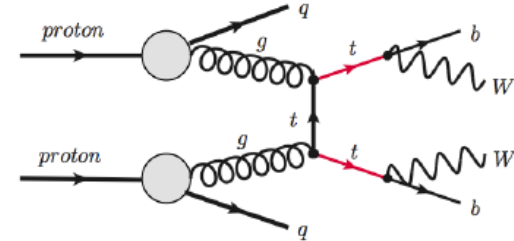
A) EW



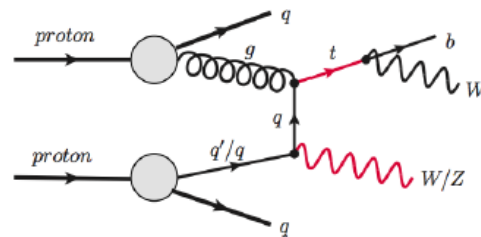
B) QCD



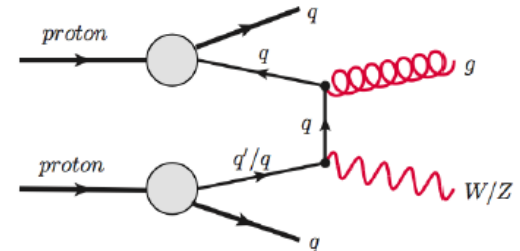
C) Top pairs



D) Single top



E) WZ+jets

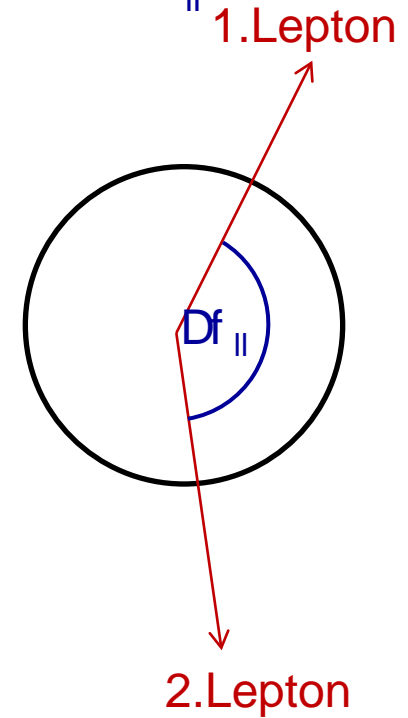
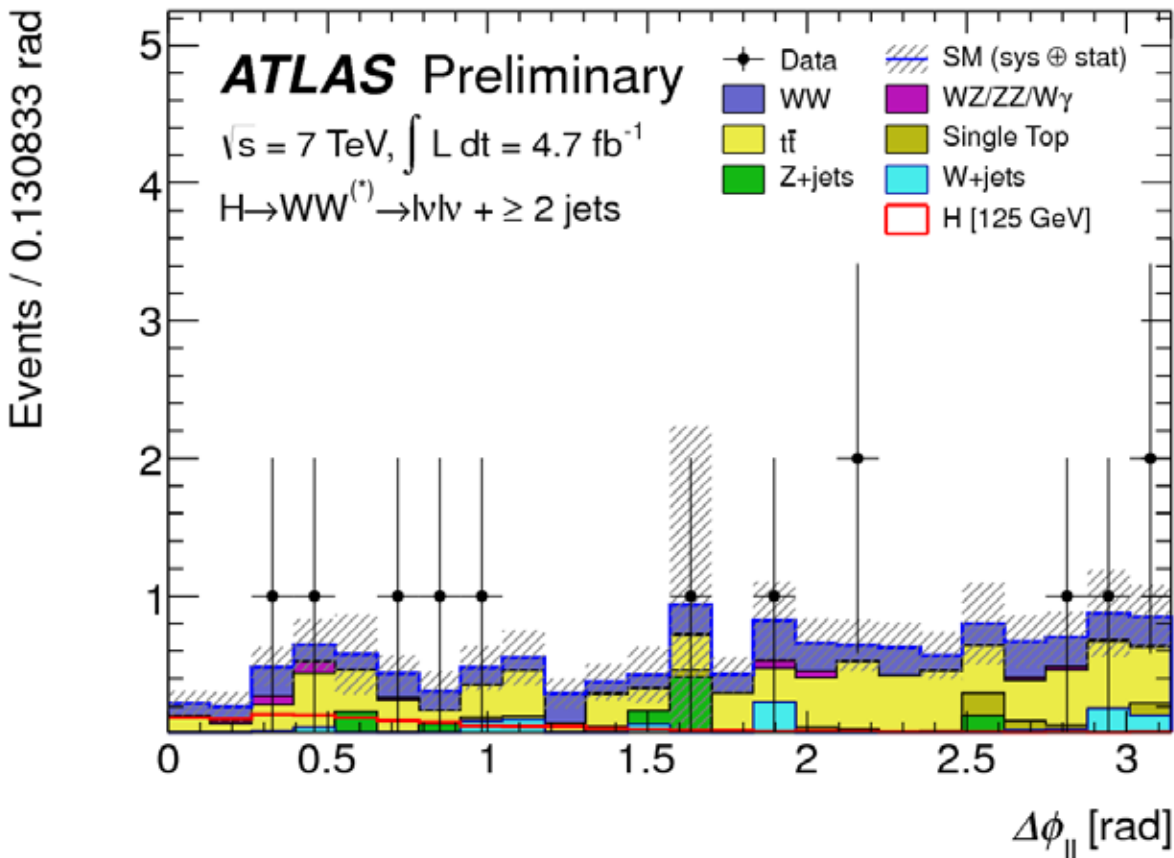


# Neuestes ATLAS Ergebnis:

**Search for the Standard Model Higgs boson in the  $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow l\nu l\nu$  decay mode with 4.7 fb<sup>-1</sup> of ATLAS data at  $\sqrt{s} = 7$  TeV**

ATLAS Collaboration, **05 March 2012**, <http://cdsweb.cern.ch/record/1429660>

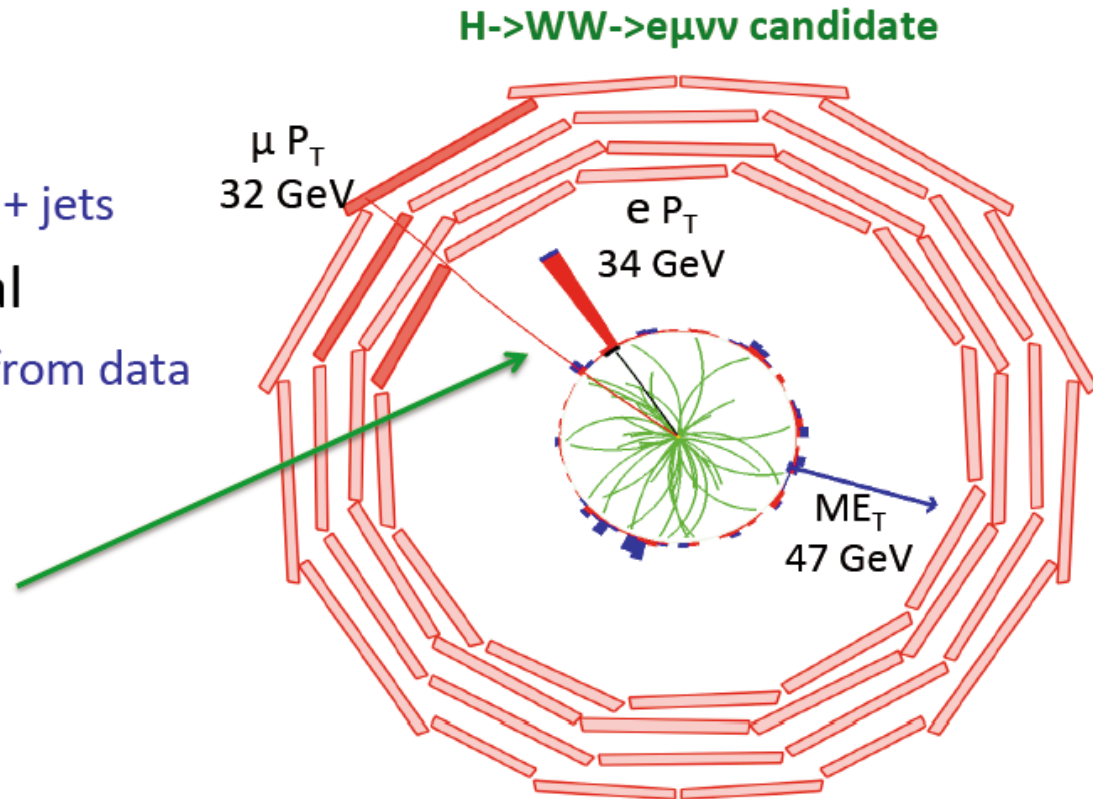
- Beispiel: 13  $W^+W^-$  + 2 Jets Kandidaten
- (mehr Kandidaten mit 1 Jet oder 0 Jets)
- Higgs signal (Rot) erwartet bei kleinen werten von  $Df_{\parallel}$



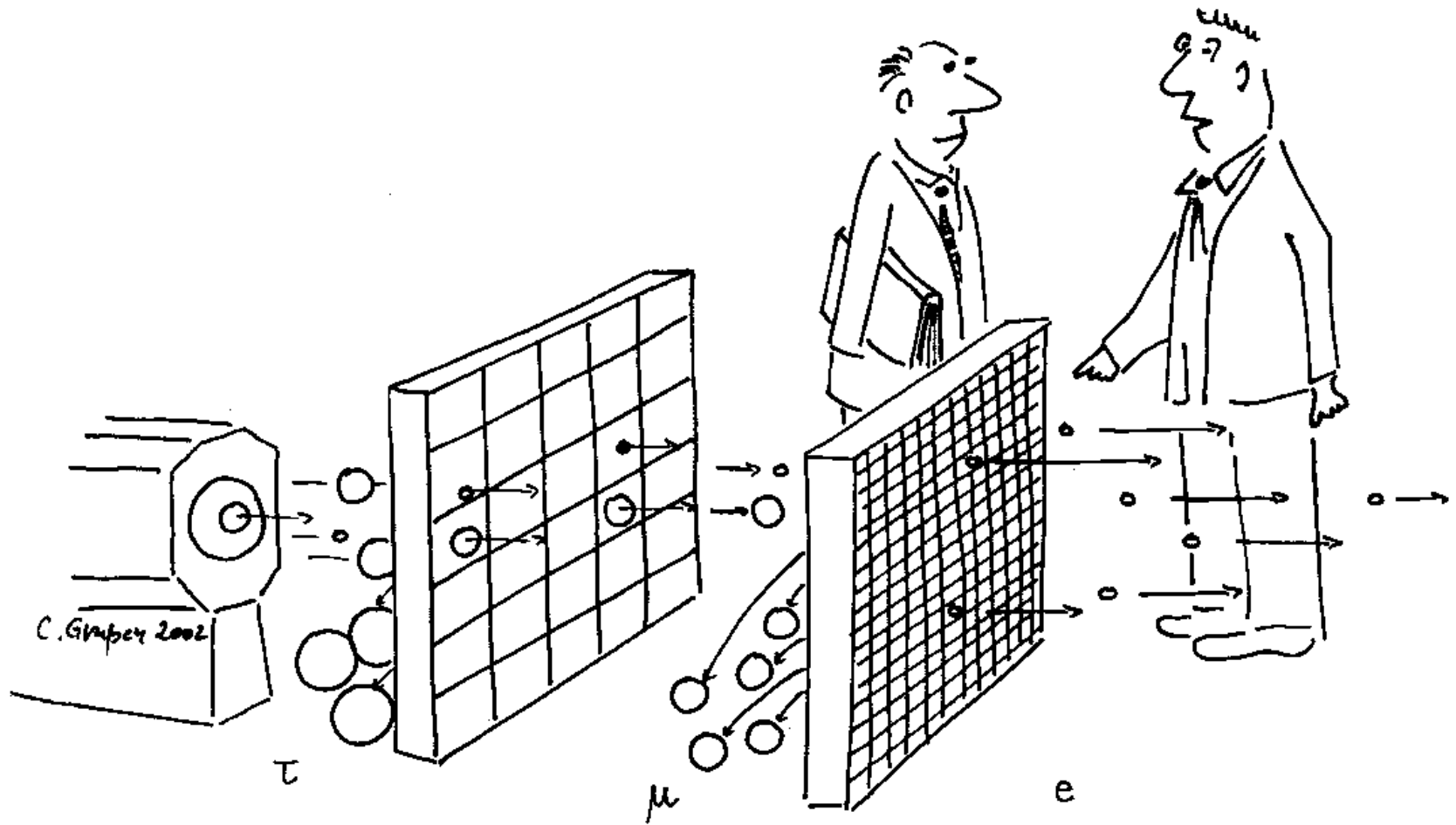
# Ähnlich in CMS

- Two high  $p_T$  isolated leptons + MET
- Main backgrounds
  - WW (irreducible)
  - Z+jets, WZ, ZZ, tt, W + jets
- BG estimation crucial
  - Main BG estimated from data

Scalar BEH boson +  
V-A structure of W decay  
favors small opening angle  
between the 2 charged  
leptons  
(tend to have small  $\Delta\phi$ )



# VIEL SPAß BEIM MESSEN!



"Our new lepton identifier!"