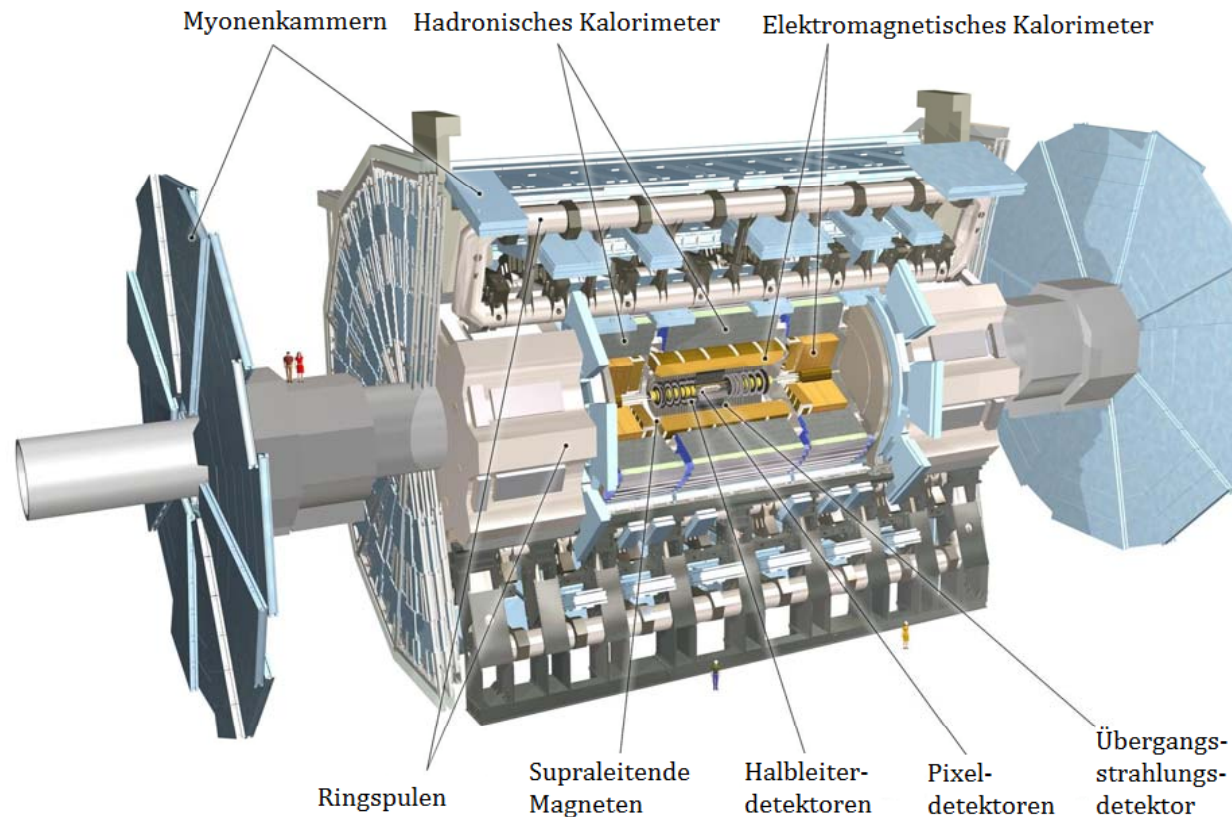


# Masterclasses mit LHC Daten – eine Premiere

Michael Kobel (TU Dresden)

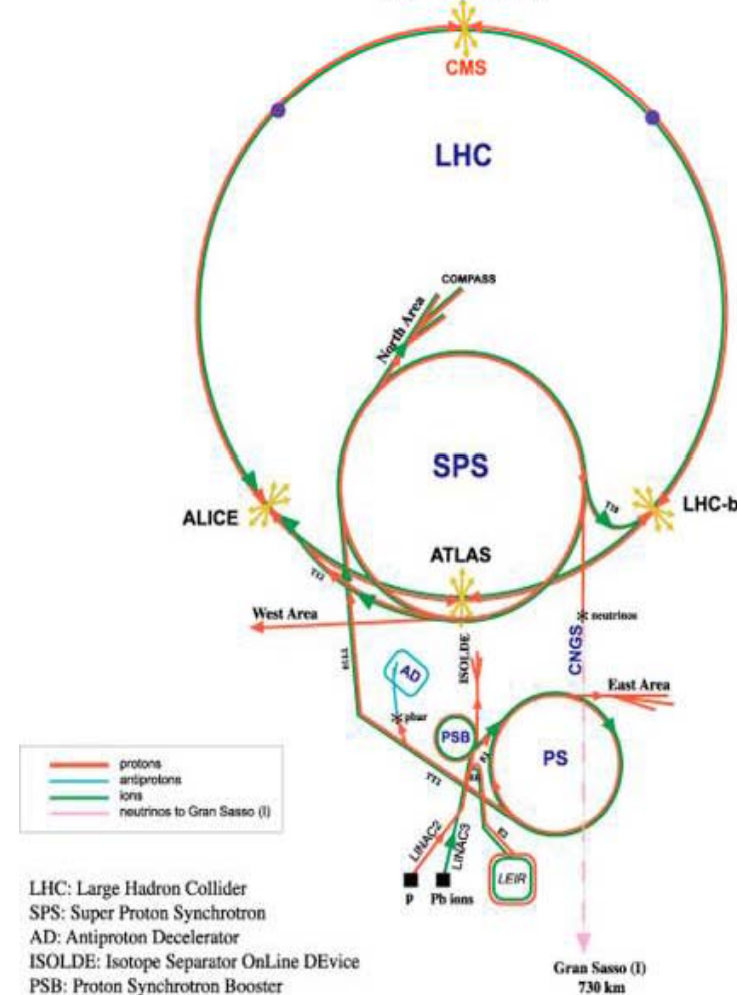
Schülerworkshop, CERN

27.11.2010





CERN Accelerators  
(not to scale)



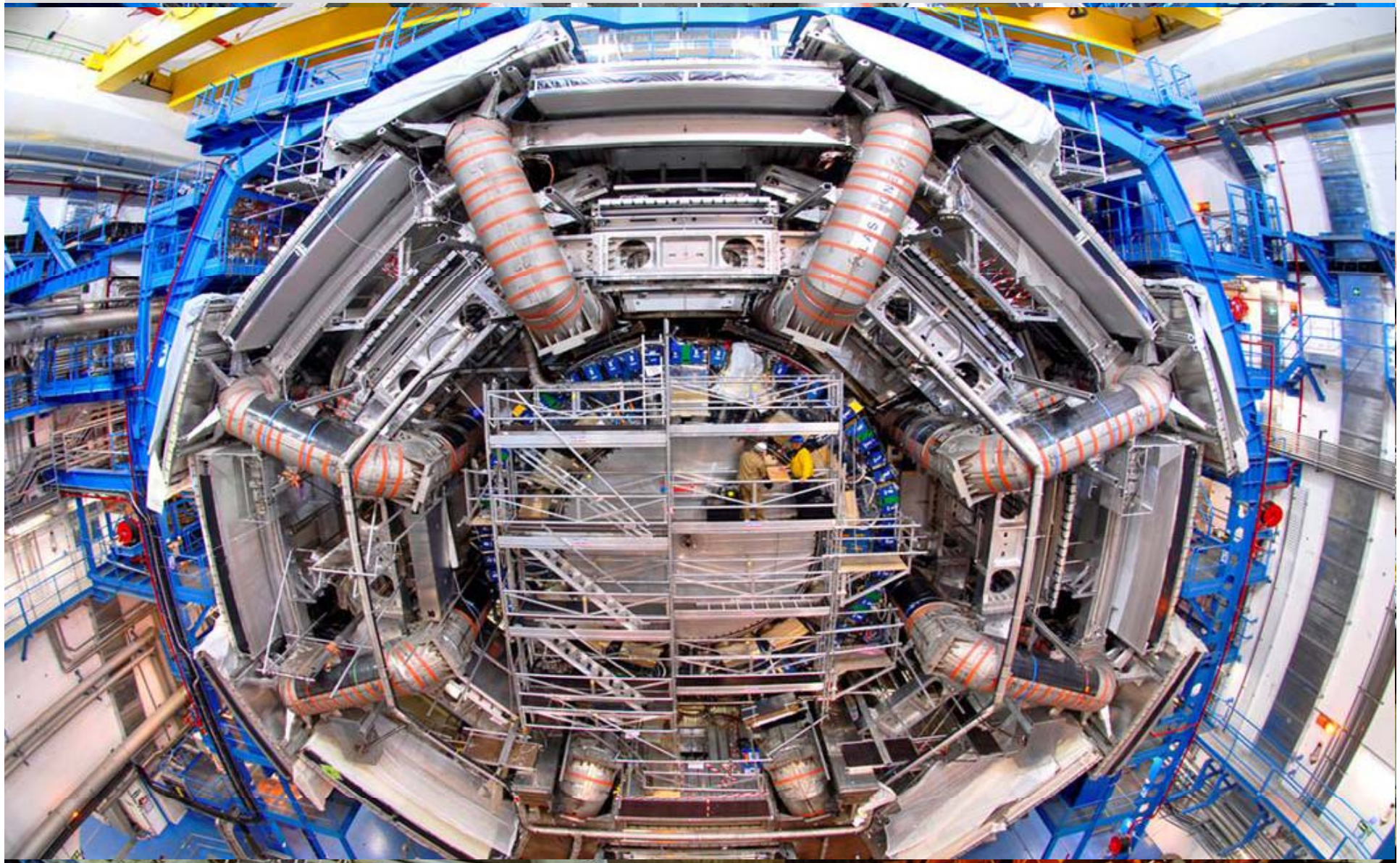
LHC: Large Hadron Collider  
 SPS: Super Proton Synchrotron  
 AD: Antiproton Decelerator  
 ISOLDE: Isotope Separator OnLine DEvice  
 PSB: Proton Synchrotron Booster  
 PS: Proton Synchrotron  
 LINAC: LINear ACcelerator  
 LEIR: Low Energy Ion Ring  
 CNGS: Cern Neutrinos to Gran Sasso

Rudolf LEY, PS Division, CERN, 02.09.96  
 Revised and adapted by Antonella Di Rosa, ITT Div.,  
 in collaboration with R. Desforges, SI Div., and  
 D. Manglaski, 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
	> 2013	7000+7000 GeV?



CERN visit - Introduction





## Collision Event at 7 TeV

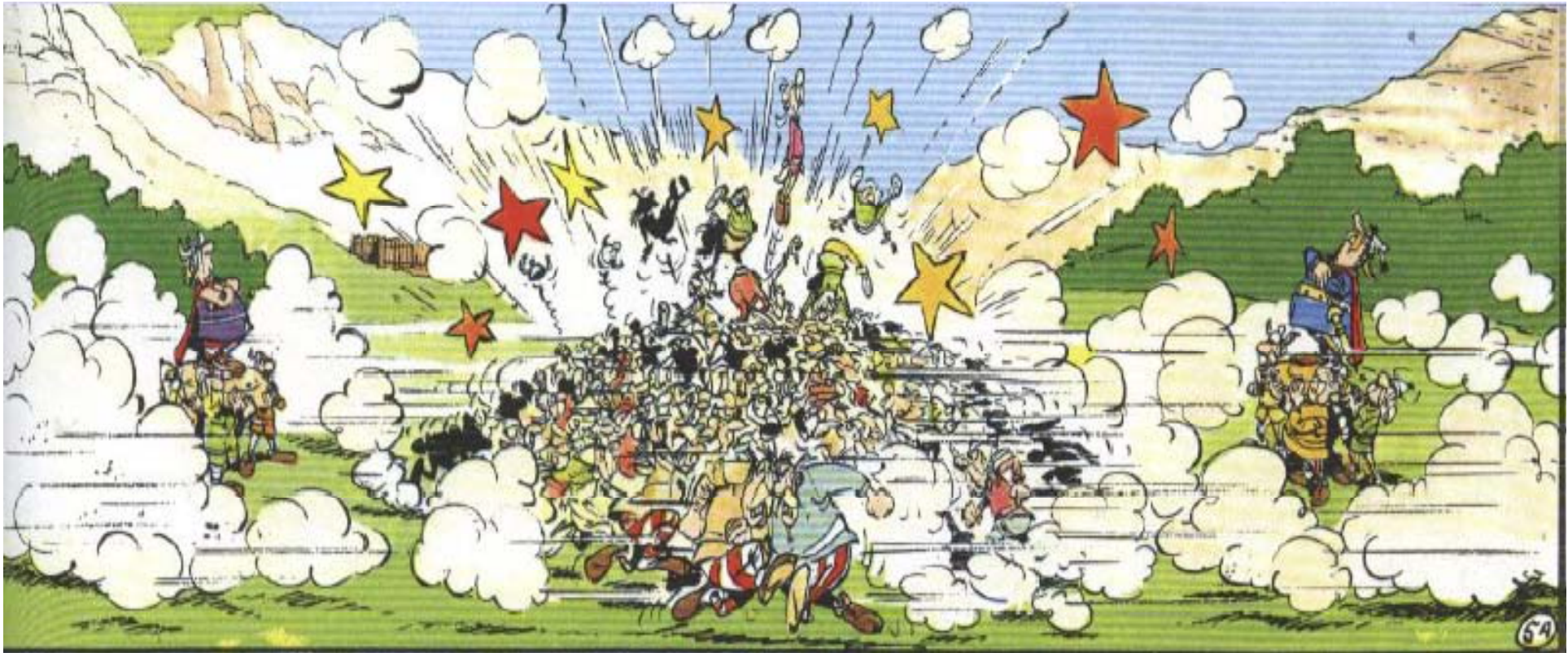
 **ATLAS**  
EXPERIMENT

2010-03-30, 12:58 CEST

Run 152166, Event 316199

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





# *Warum?*



Raum

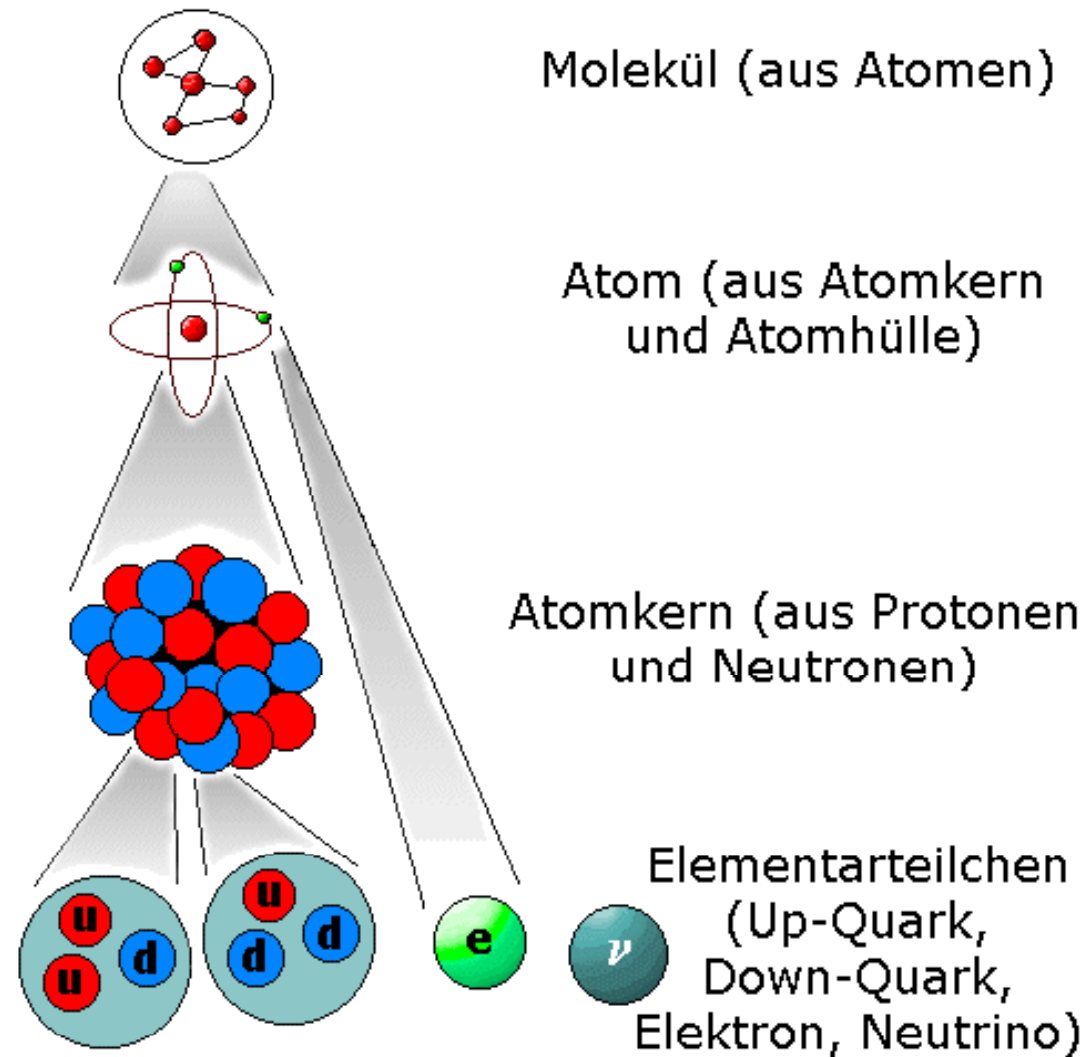


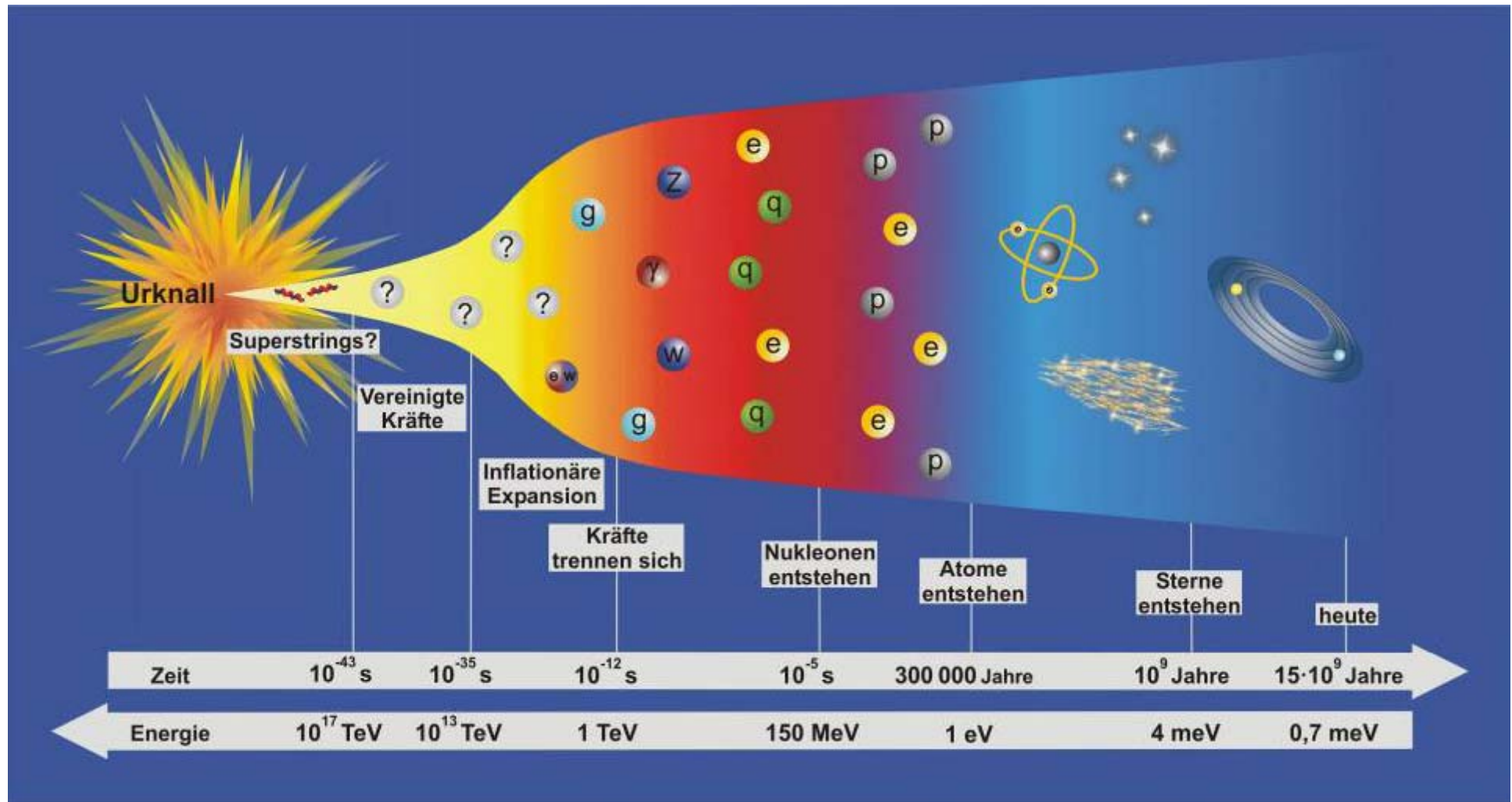
Zeit




Materie



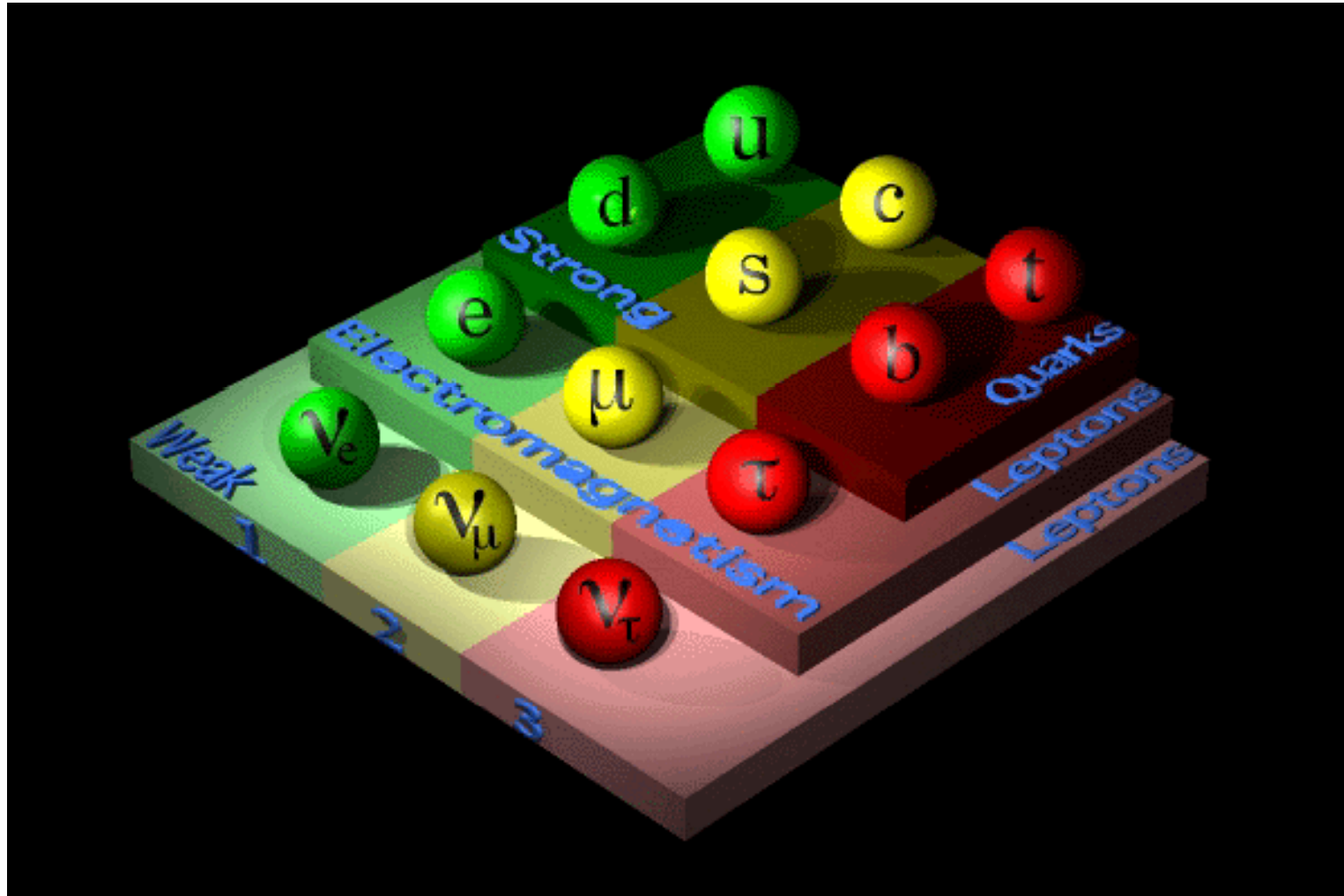




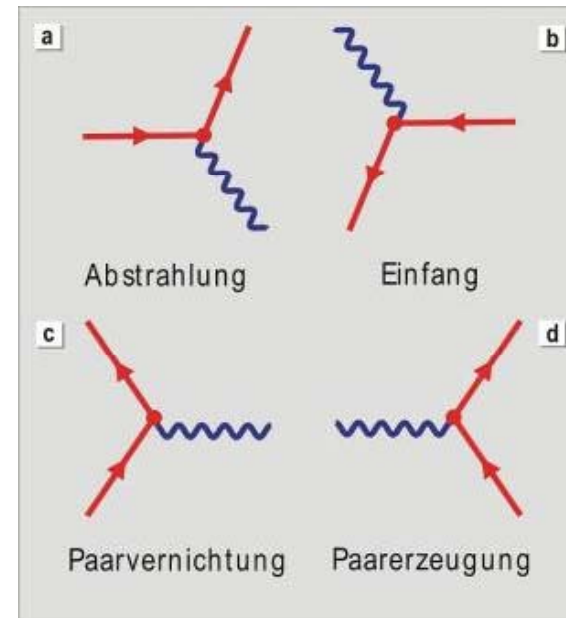
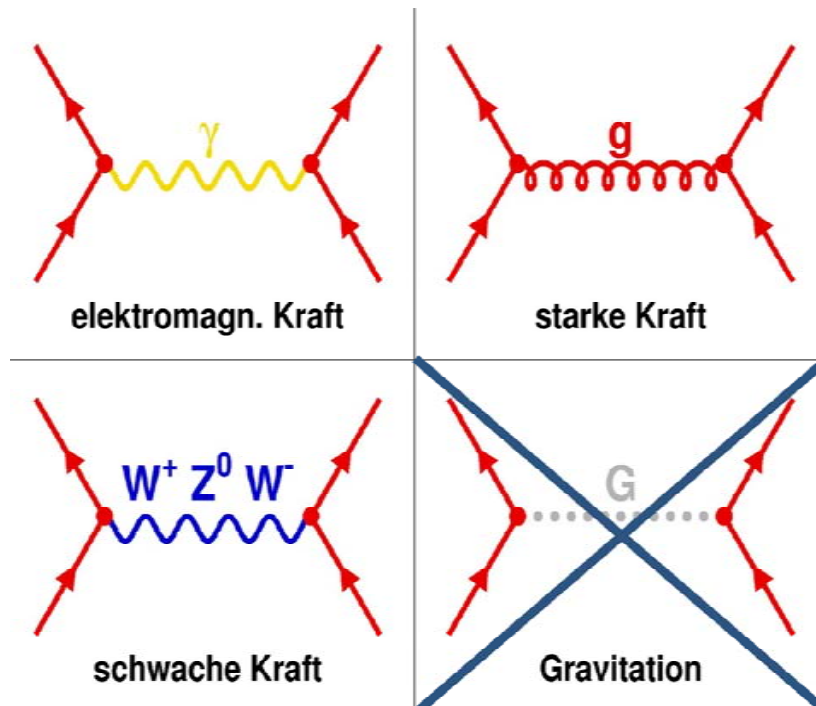
- Jede Kraft hat eigene Botenteilchen

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

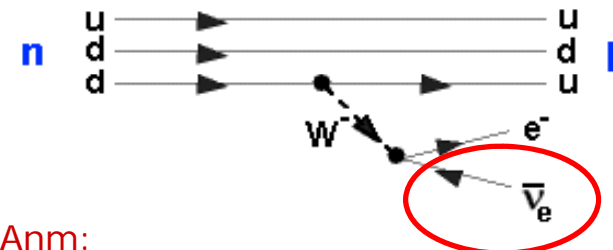
- Wechselwirkung nur dann, wenn entsprechende Ladung vorhanden



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



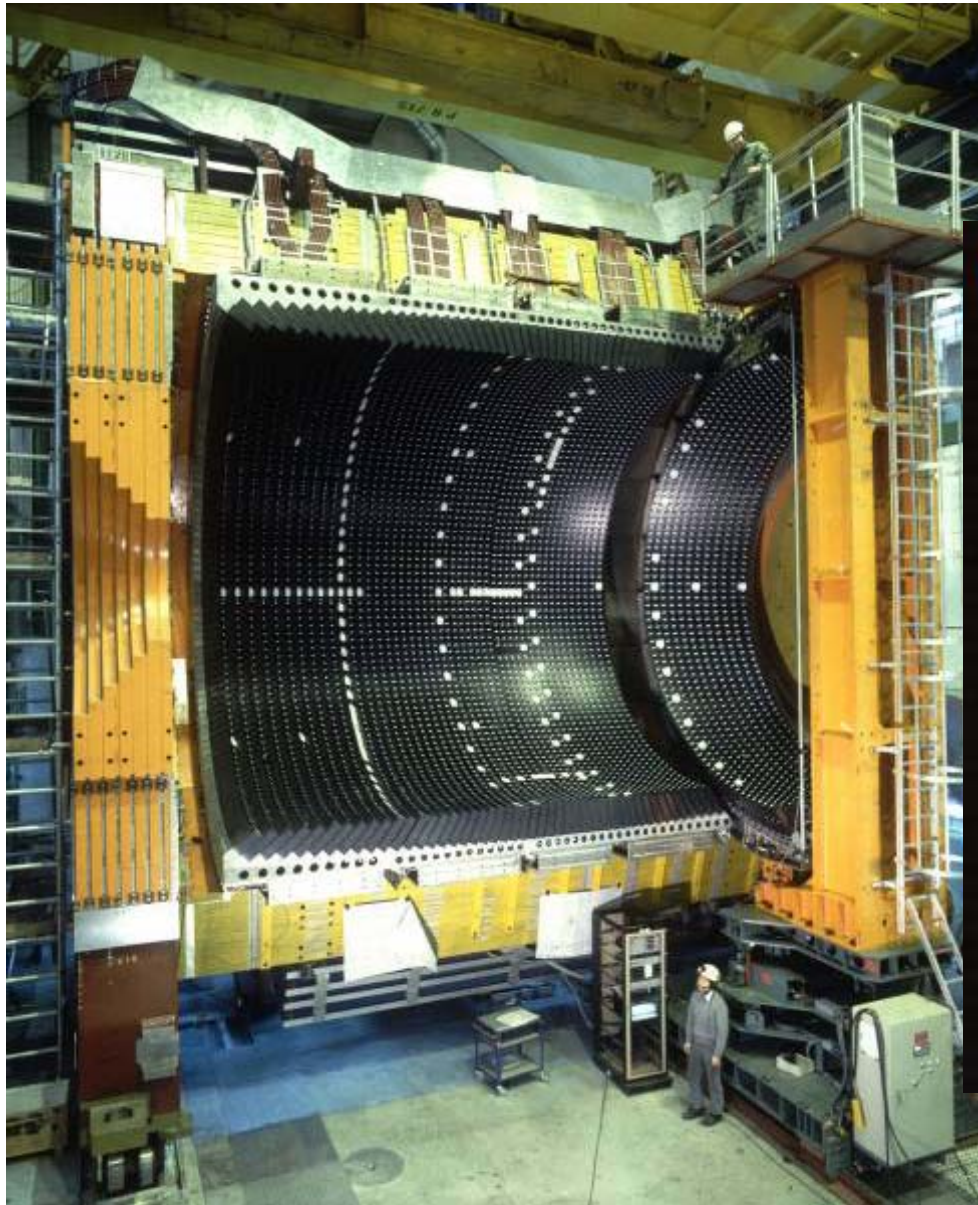
► z.B. Beta"zerfall" des Neutrons



Anm:  
Pfeilrichtung  $\leftarrow$  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.**

# Die Augen der Teilchenphysik: Detektoren



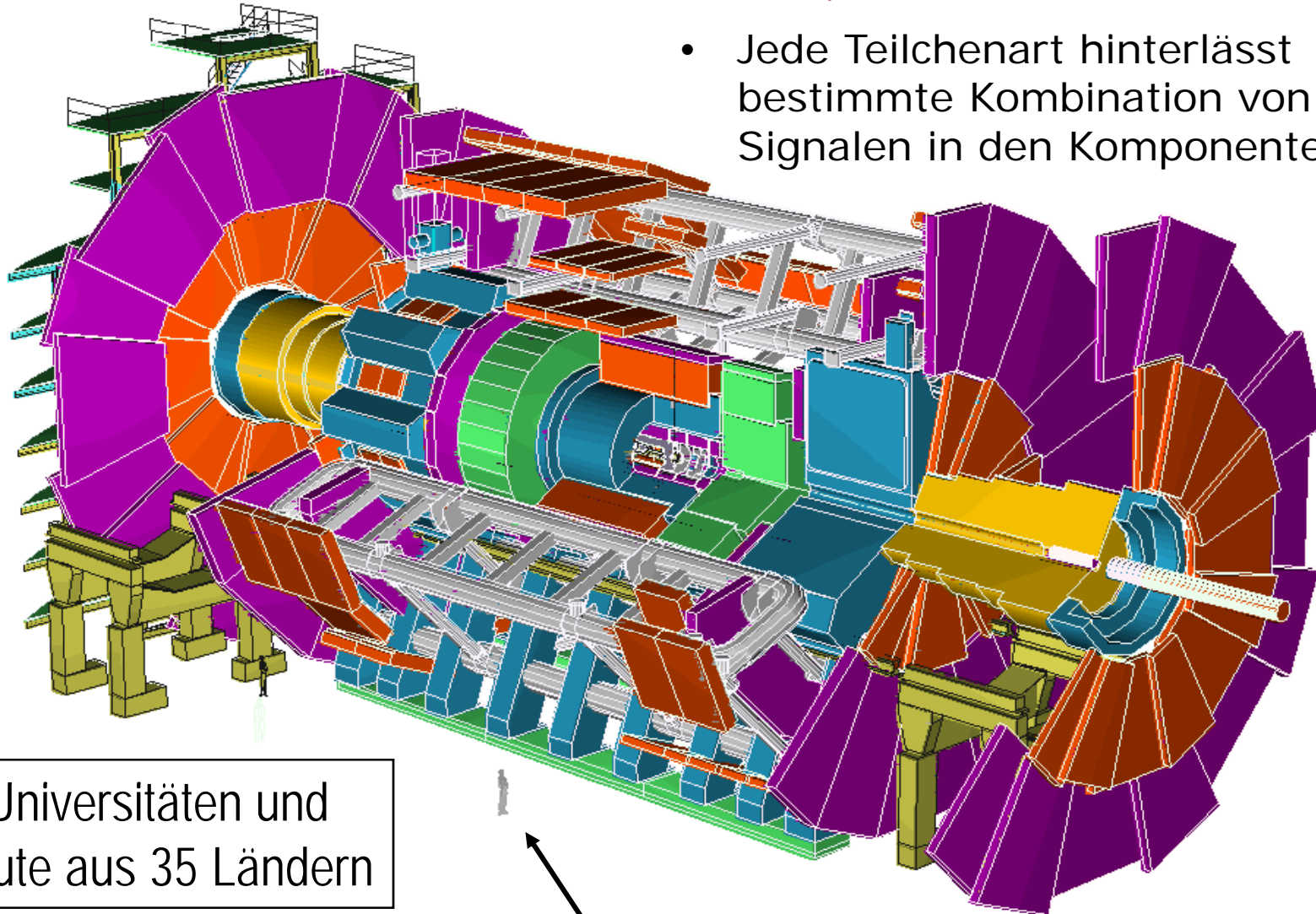
CERN, Genf,  
bis 2000



Elektronische Bilder

# Aktivität heute : ATLAS Experiment, LHC

- Jede Teilchenart hinterlässt bestimmte Kombination von Signalen in den Komponenten



170 Universitäten und  
Institute aus 35 Ländern

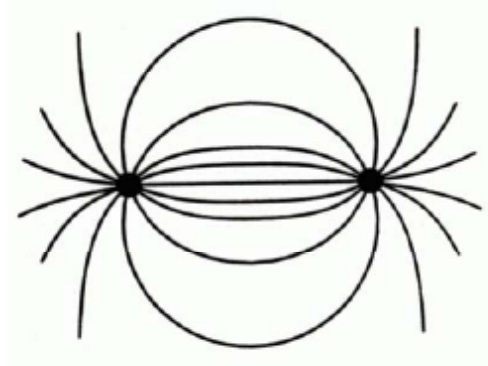
Größenvergleich

- Zwiebelschalenartiger Aufbau verschiedener Komponenten



# Confinement

QED



Feldlinien eines elektrischen  
Dipols reichen ins Unendliche

QCD

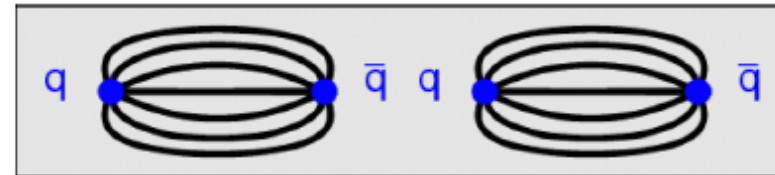


Feldlinien eines Farbdipols bilden einen  
engen Flussschlauch  
Grund: Selbstkopplung der Gluonen

Die Feldenergie des Farbdipols wächst proportional zur Länge:

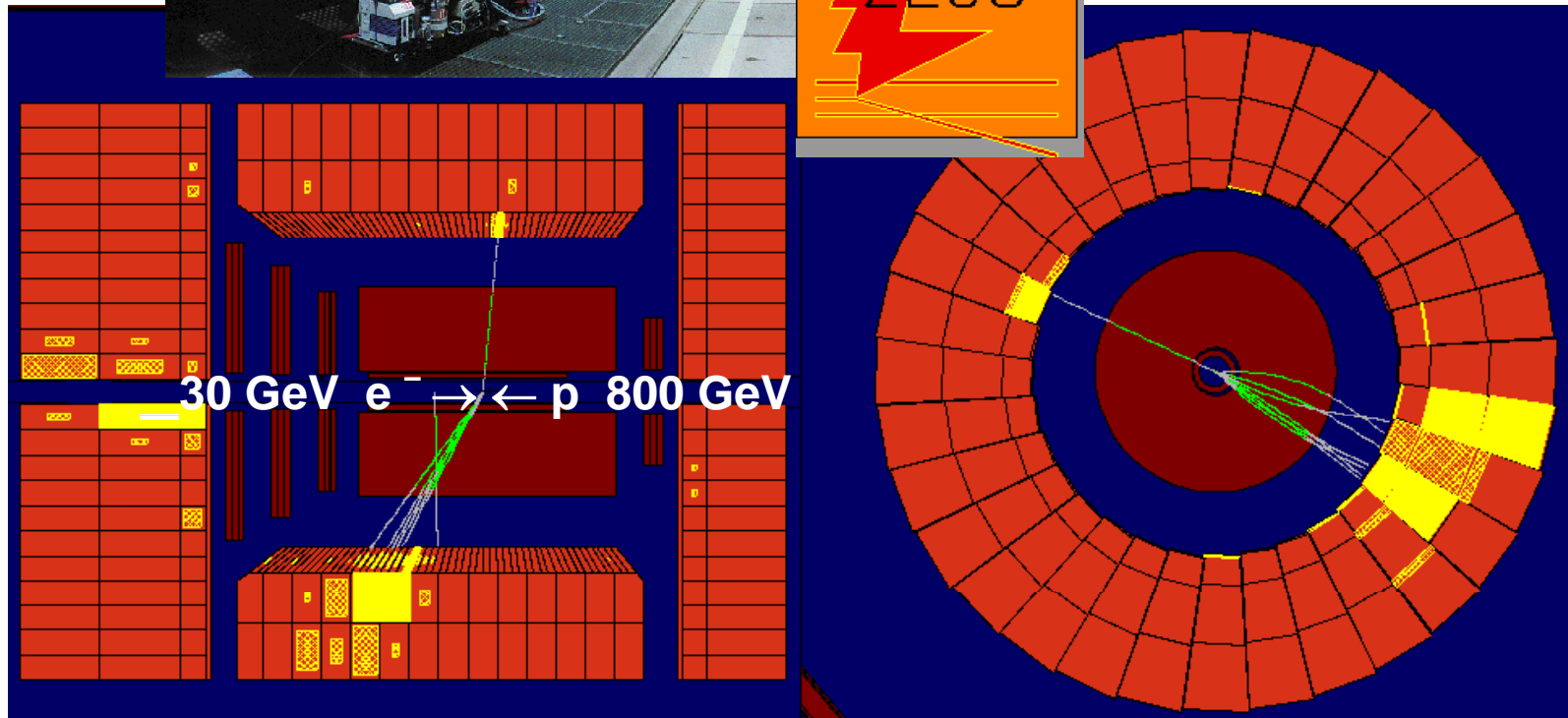
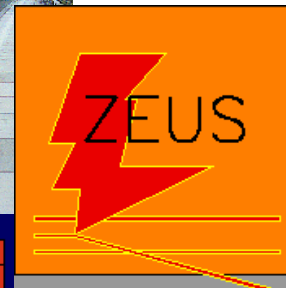
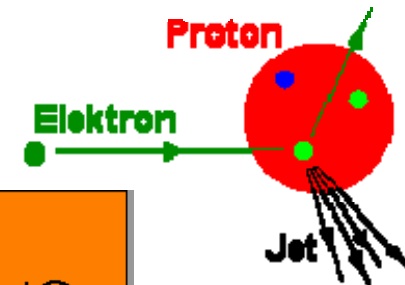
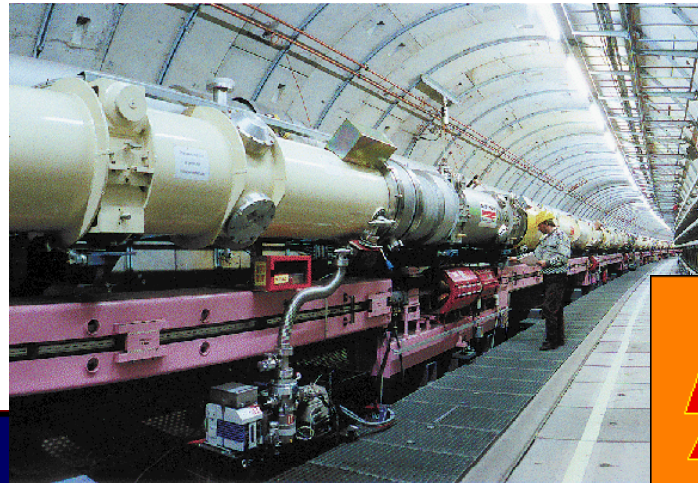
$$V(x) = k \cdot x \quad \text{mit} \quad k \approx 1 \text{ GeV / fm}$$

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

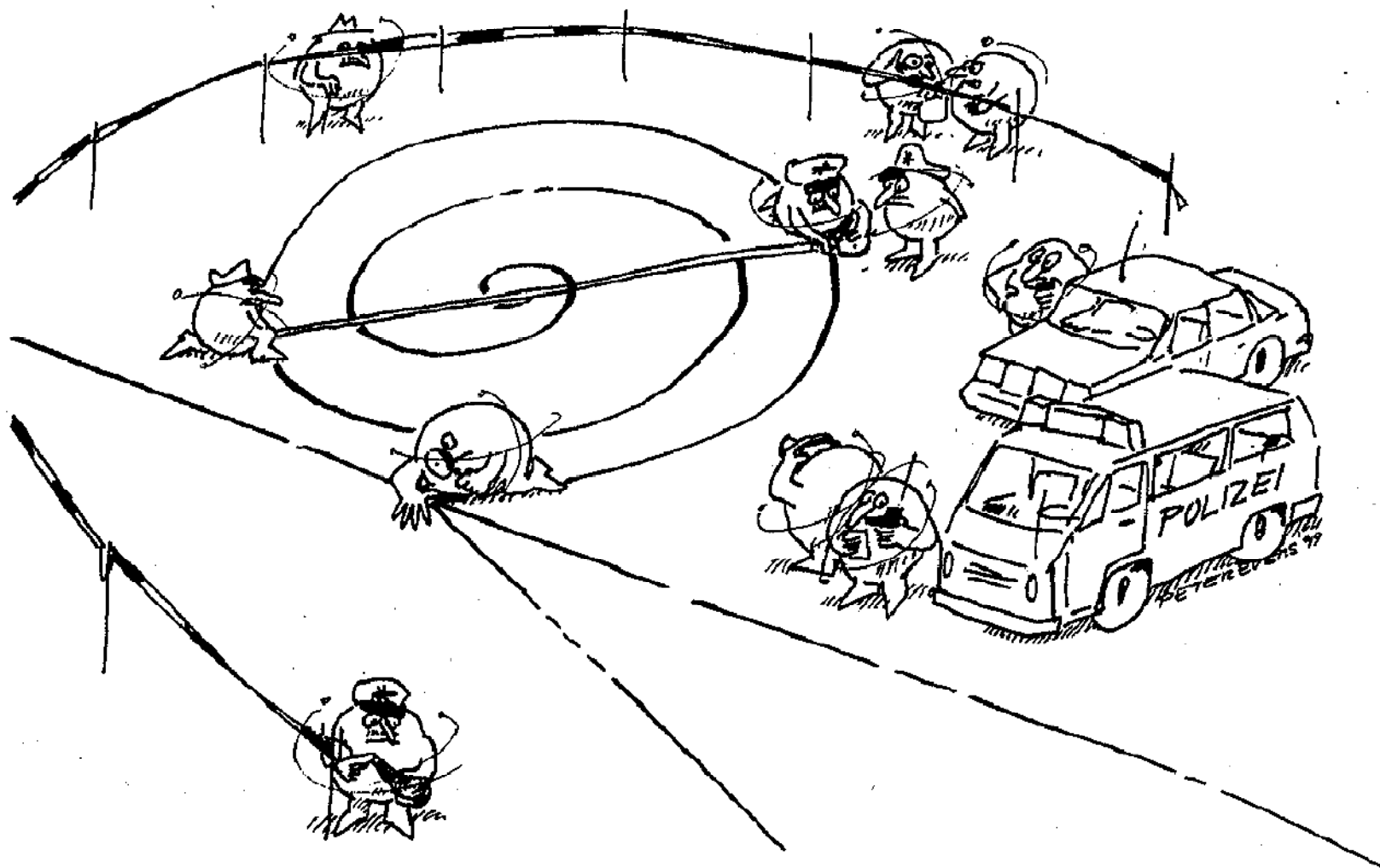


# Einzelne Quarks ergeben „Hadronen“ Jets

- e-p Kollisionen bei HERA am DESY



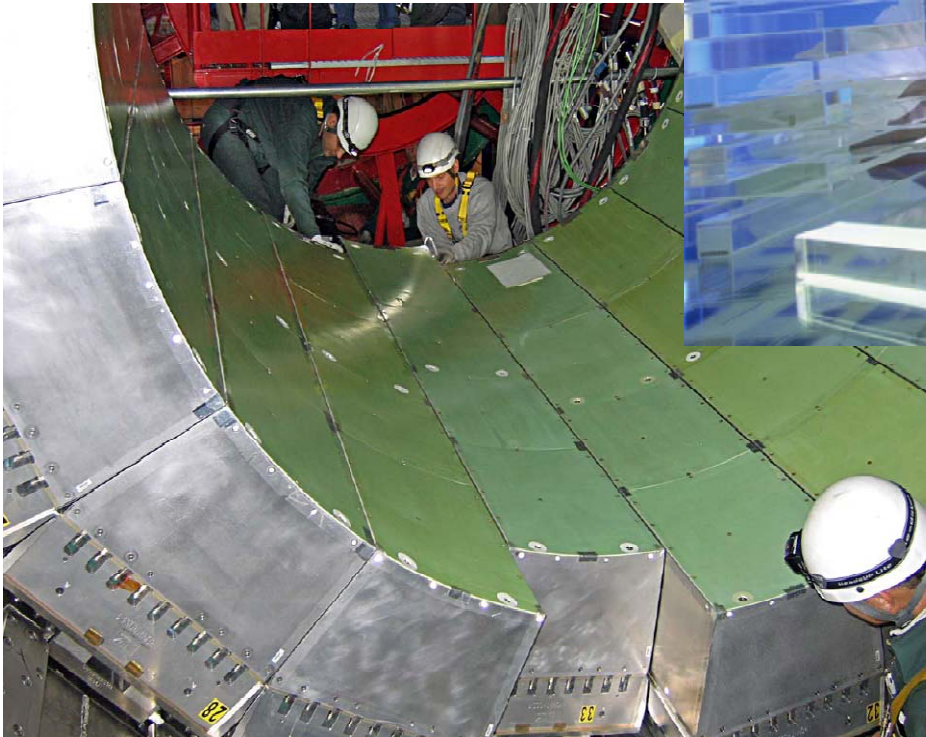
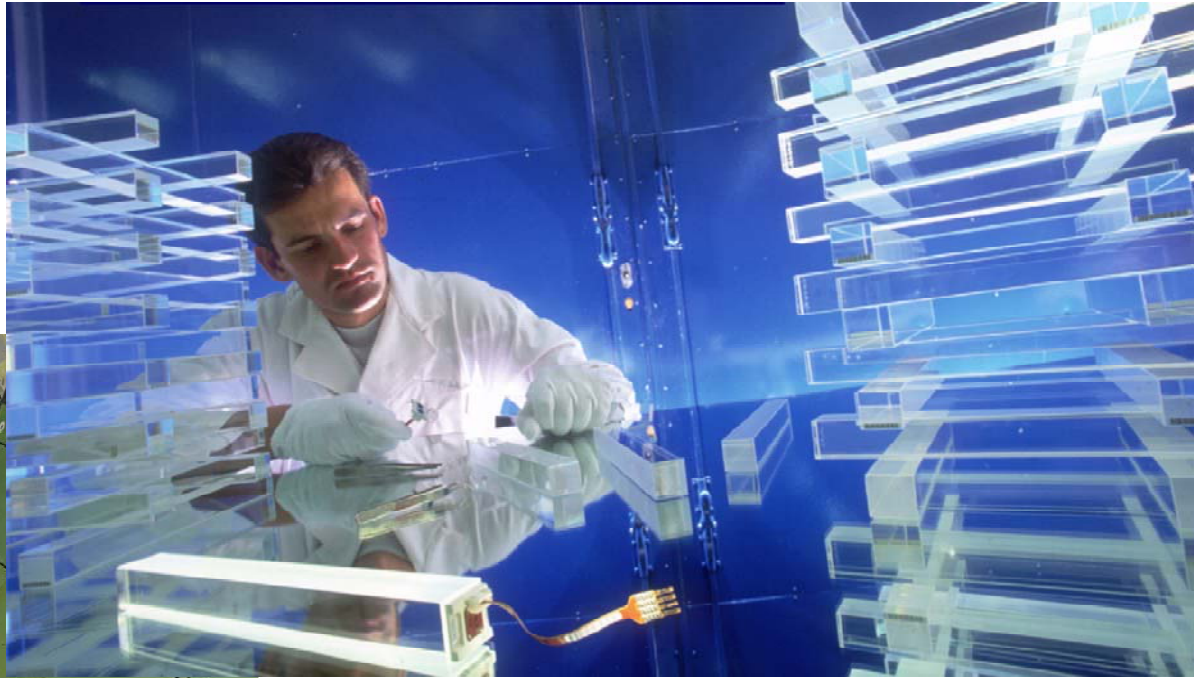
# Spurdetektor



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

# Elektromagnetisches Kalorimeter (CMS)

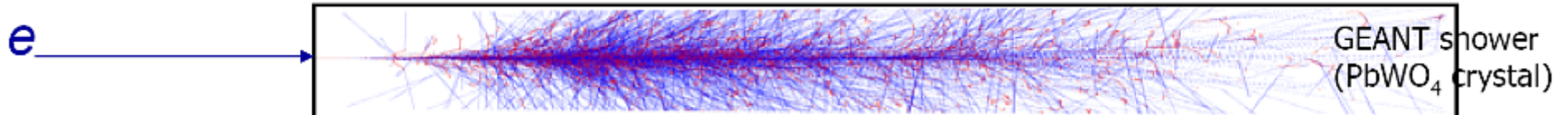
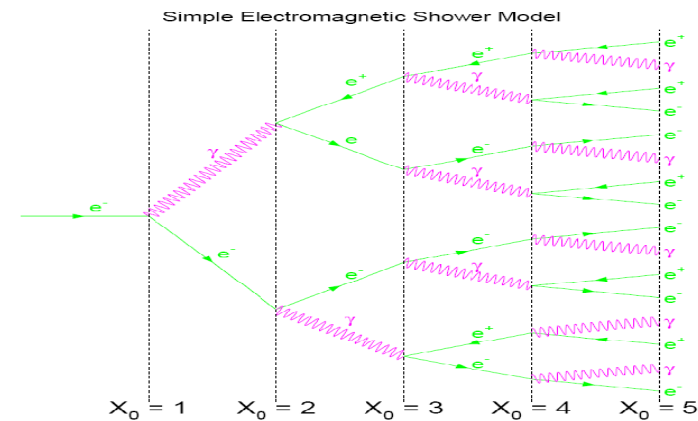
- Ein Kristall:
  - 2cm x 2cm x 23cm
  - 26  $X_0$



107

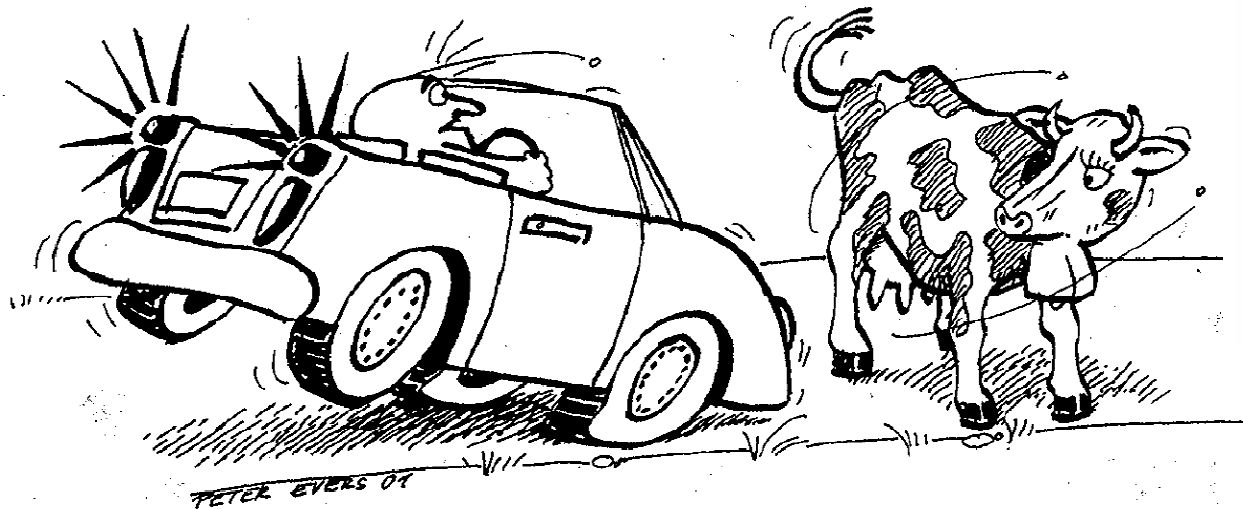
Wolfgang Funk - CERN CMS

8

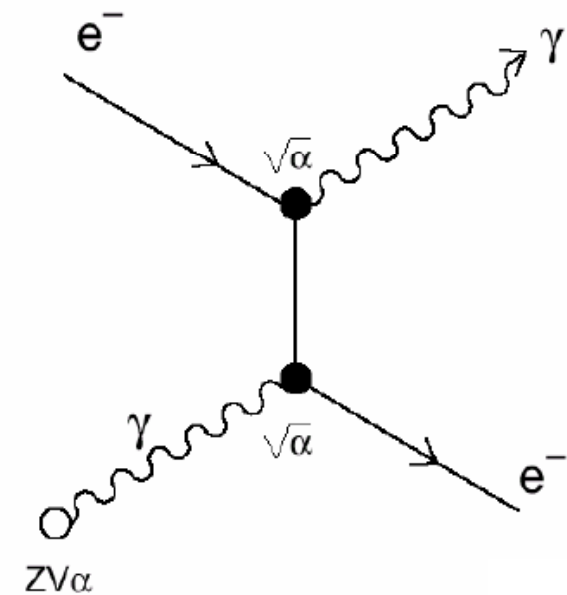


## Warum Bremsstrahlen Elektronen?

- Dominant: Bremsstrahlung im Kernfeld  $\sim Z^2 / m^2$ 
  - Kalorimeter brauchen große Kernladung  $Z$
  - Myonen sind 200 mal schwerer  
→ strahlen 40.000 Mal weniger



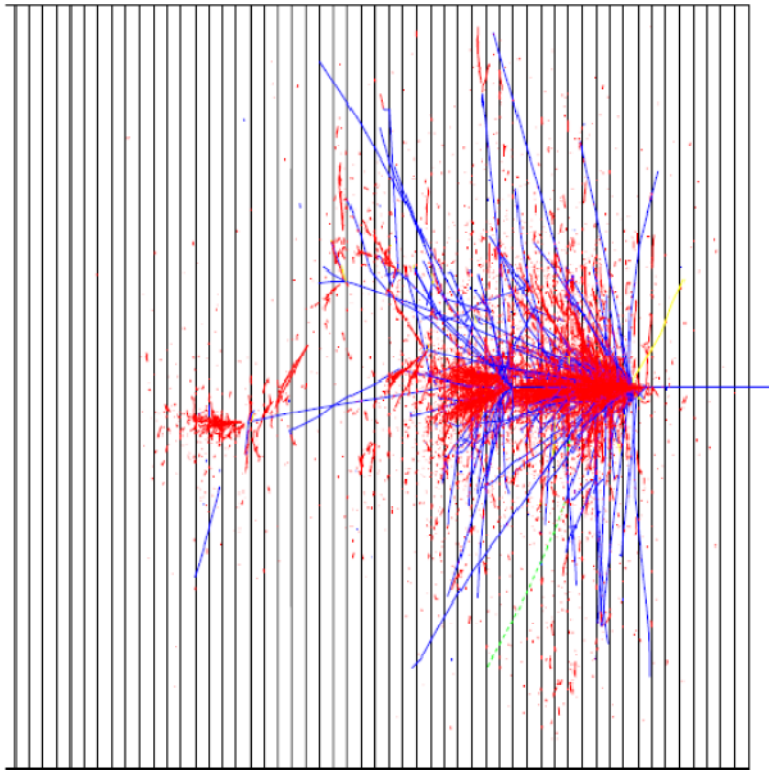
WENN EIN ATOMI BREMST,  
MACHT SICH DAS DURCH LEUCHTEN BEMERKBAR.



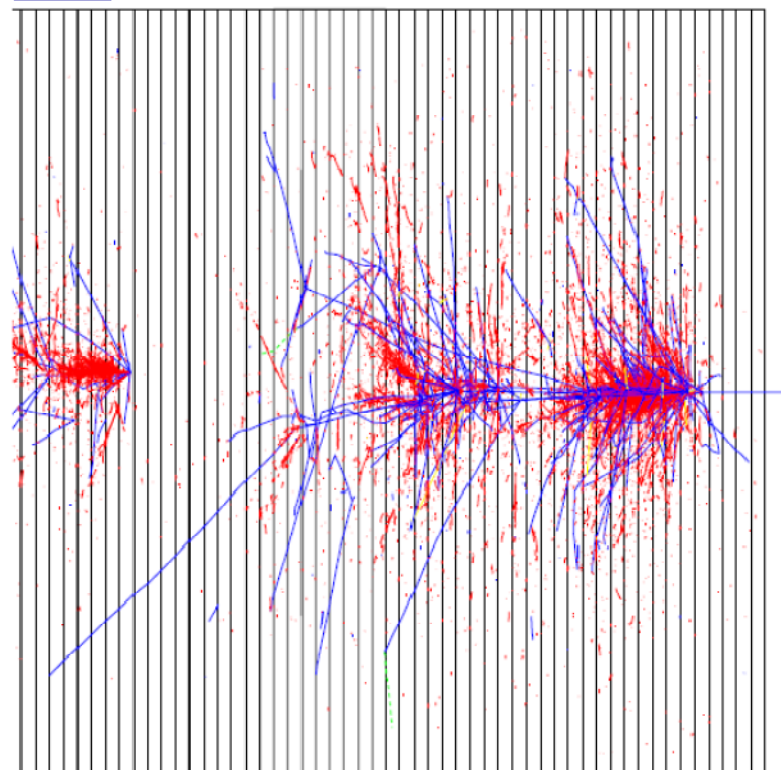
# Hadronische Schauer

- Wesentlich unregelmäßiger
- **Hadronische** und **Elektromagnetische** ( $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ ) Komponente

1.

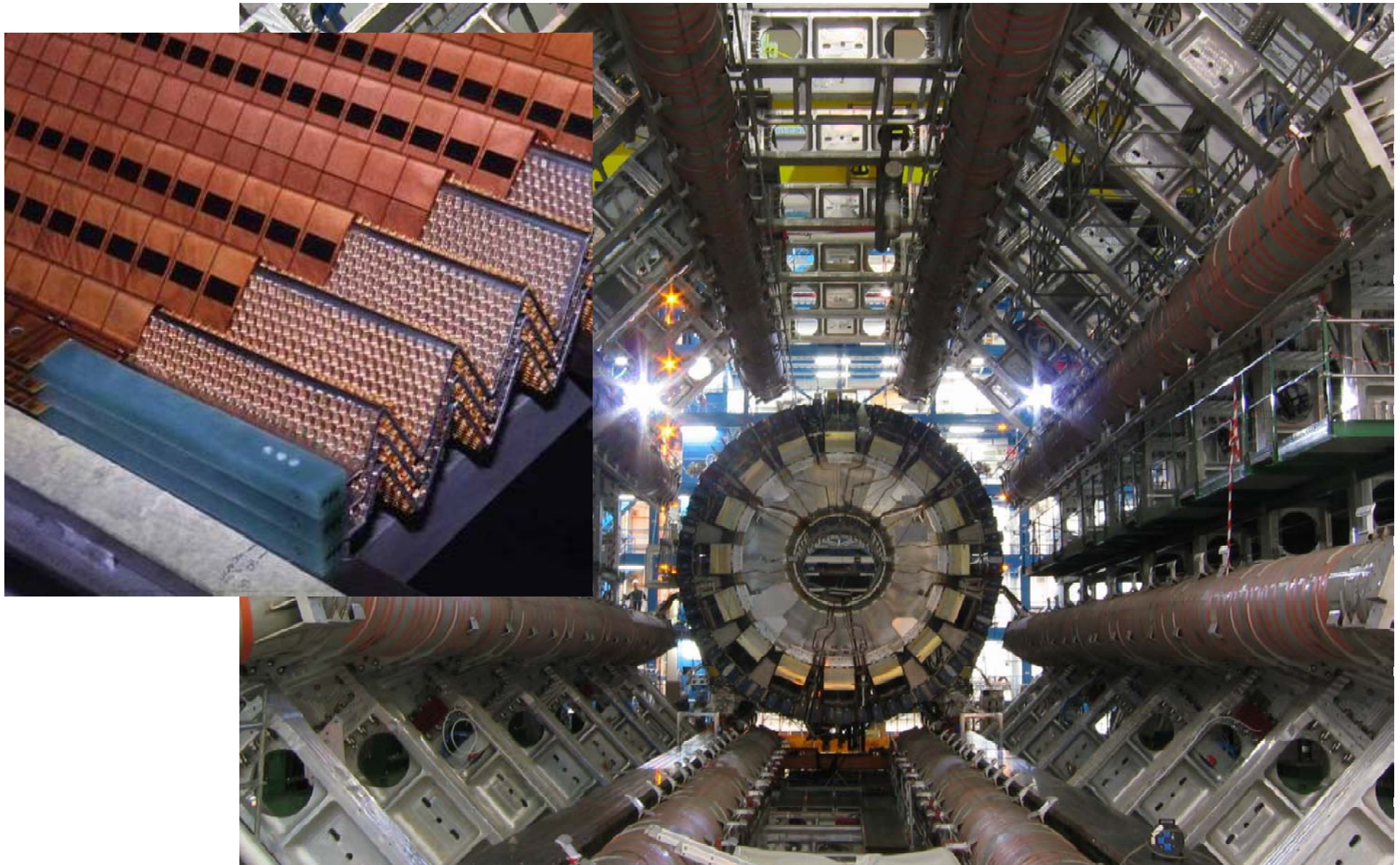


2.

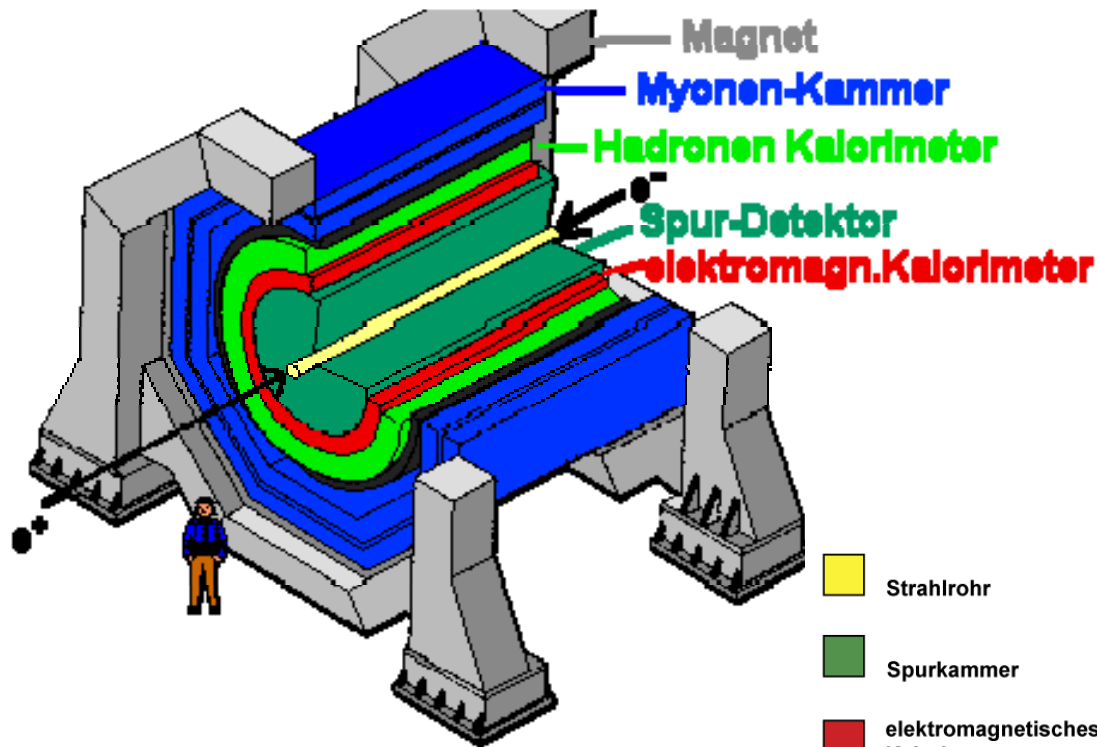


red - e.m. component  
blue - charged hadrons

- Das ATLAS Flüssig-Argon Calorimeter: "Akkordeon"



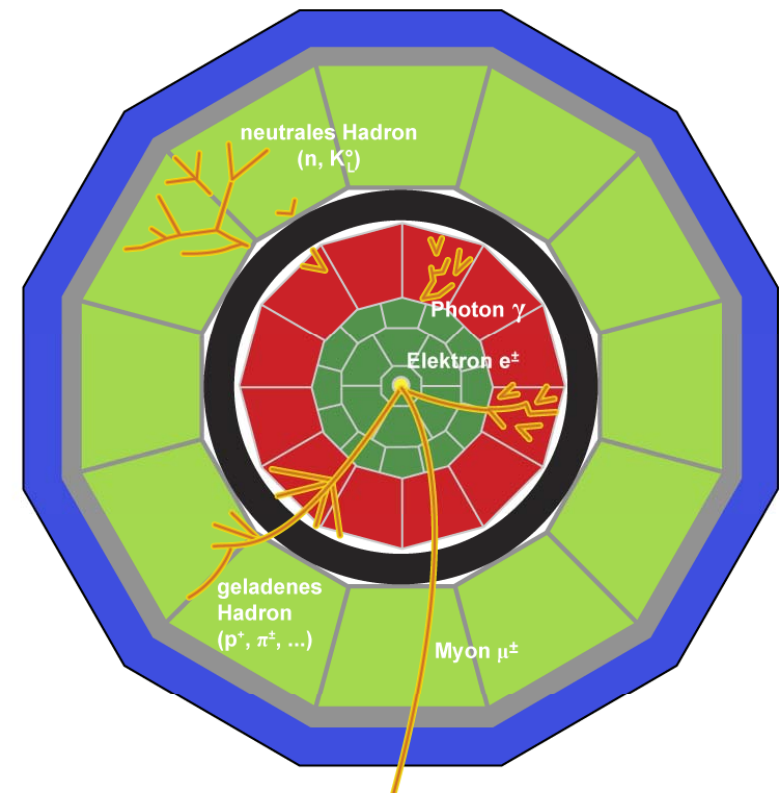
# Teilchenidentifikation



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

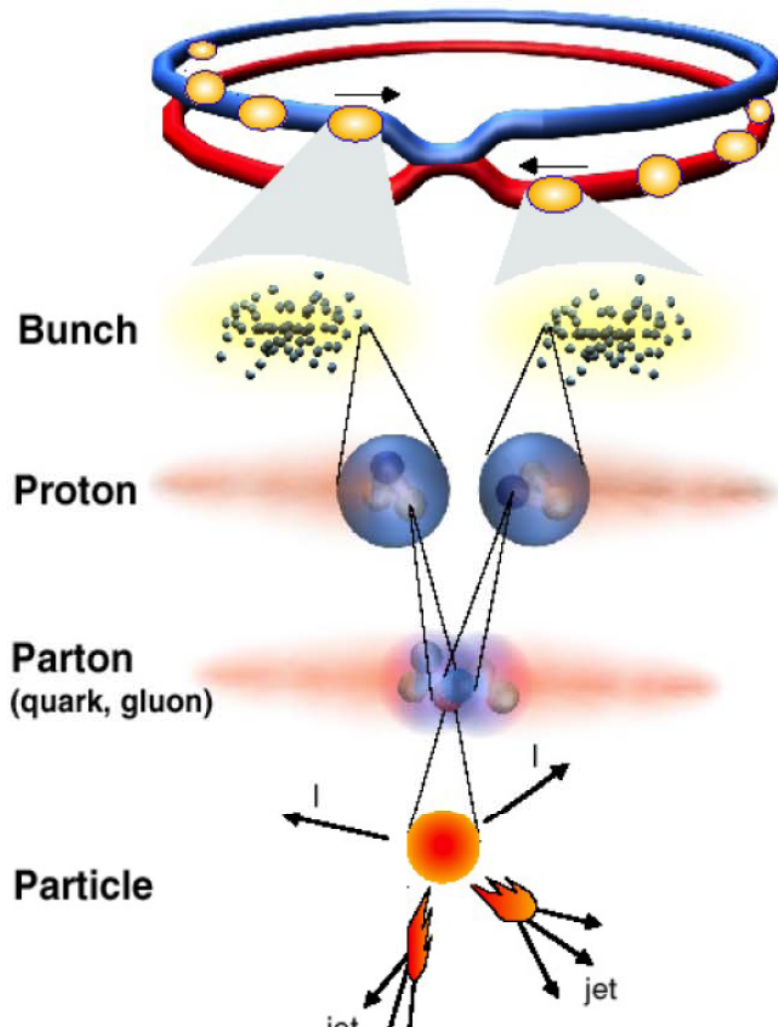
- feststellbare Teilcheneigenschaften:
  - aus Quarks („Hadronen“)
  - elektr. geladen / ungeladen
  - leicht / schwer

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





# (geplante) Parameter des LHC



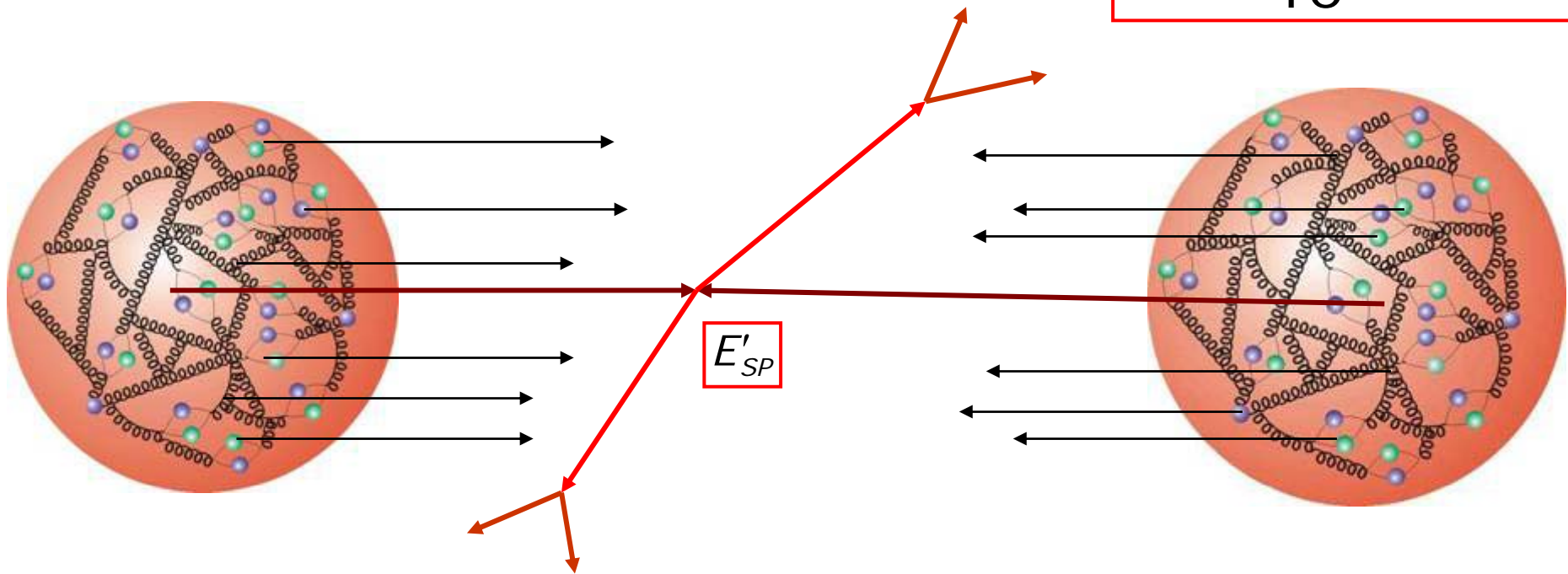
- 2835×2835 Proton-Proton-Pakete („bunches“)  
Bis jetzt: 300 x 300
- $10^{11}$  Protonen/Paket  
Proton-Energie: 7 TeV  
Bis jetzt: 3,5 TeV
- Kreuzungsrate der p-Pakete: 40 MHz  
Bis jetzt: 4 MHz
- bis zu  $10^9$  pp-Stöße/sec  
Bis jetzt:  $10^7$  pp-Stöße/sec
- Luminosität:  
 $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  Design,  
Bis jetzt:  $10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- 23 Ereignisse im Detektor überlagert  
Bis jetzt: ca. 3 Ereignisse überlagert

# Was kollidiert da eigentlich?

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

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

$$E'_{SP} \approx \frac{1}{10} E_{SP}(pp)$$



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

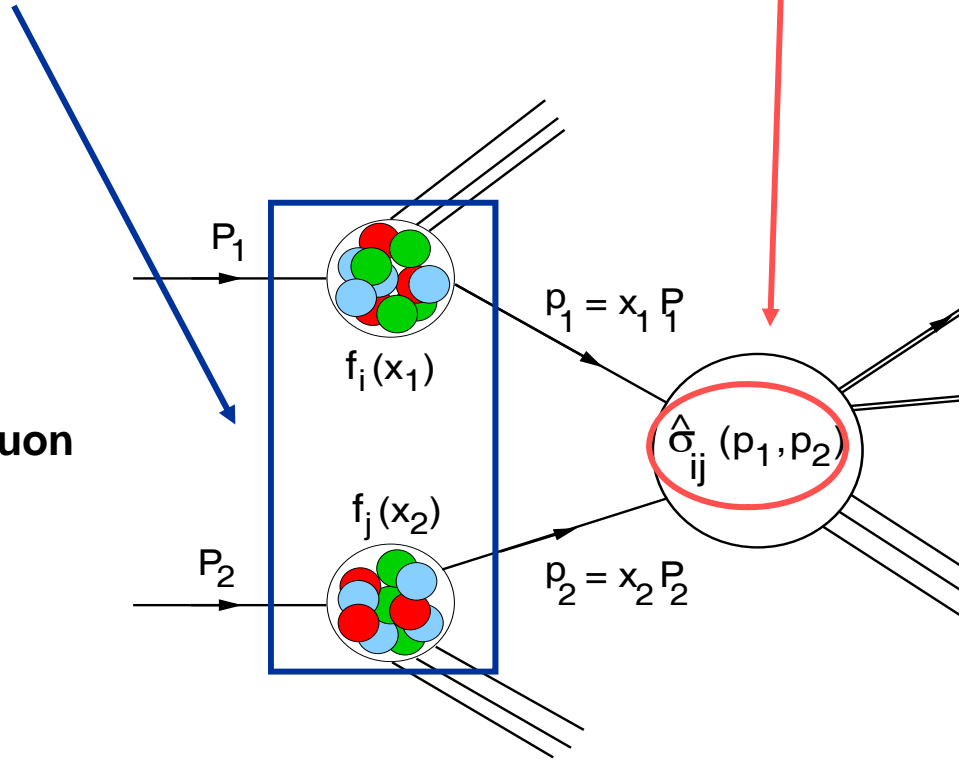
# Mathematisch

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

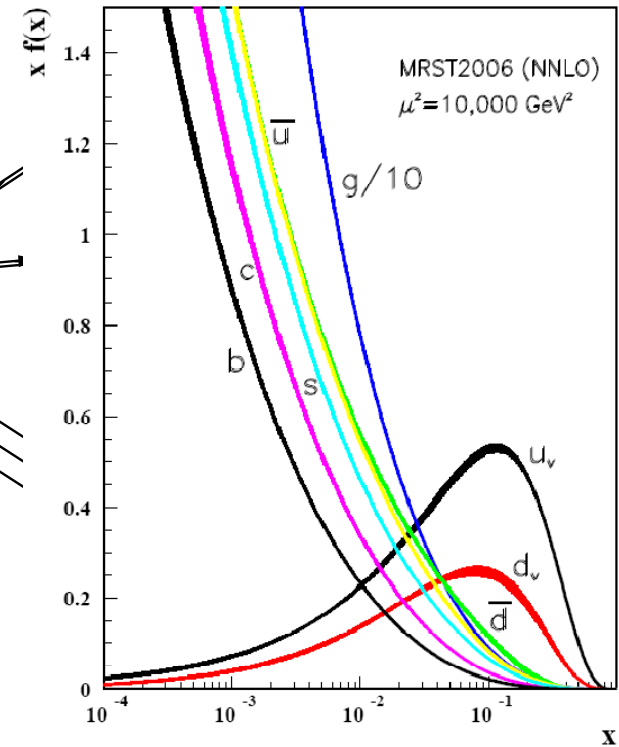
Innere Struktur  
der Protonen

Wechselwirkung der  
Partonen

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



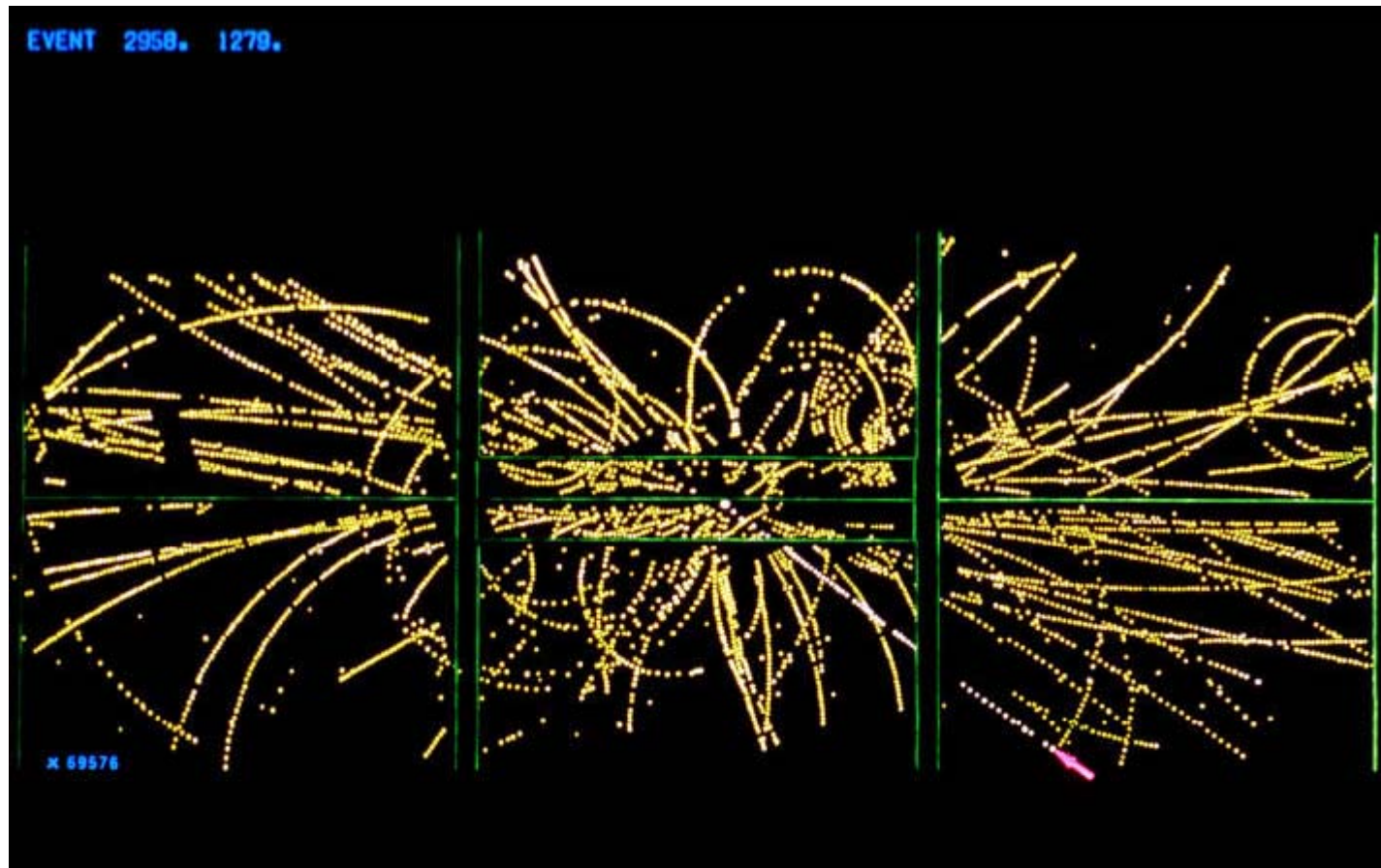
PROTON BESTEHT I.W. AUS 2u + 1d QUARK U. GLUONEN



# Die Entdeckung des W

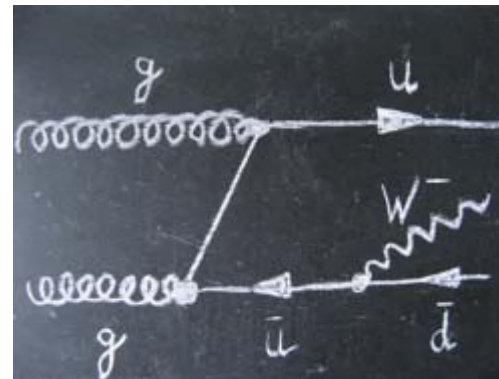
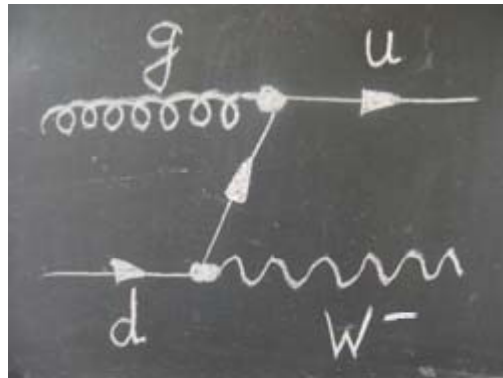
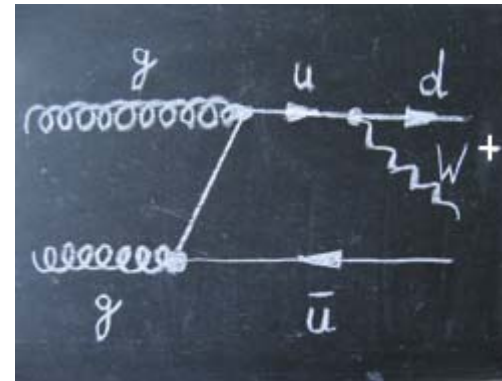
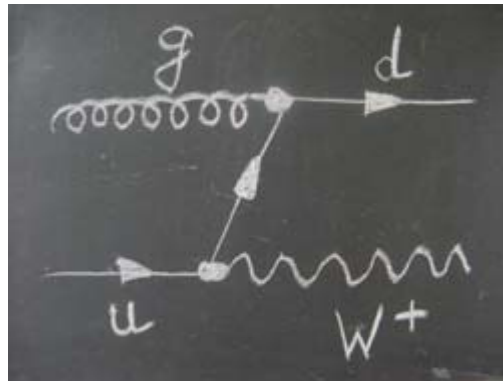
1983 am Super-Antiproton-Proton Synchrotron (S  $\bar{p}p$ S) am CERN

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



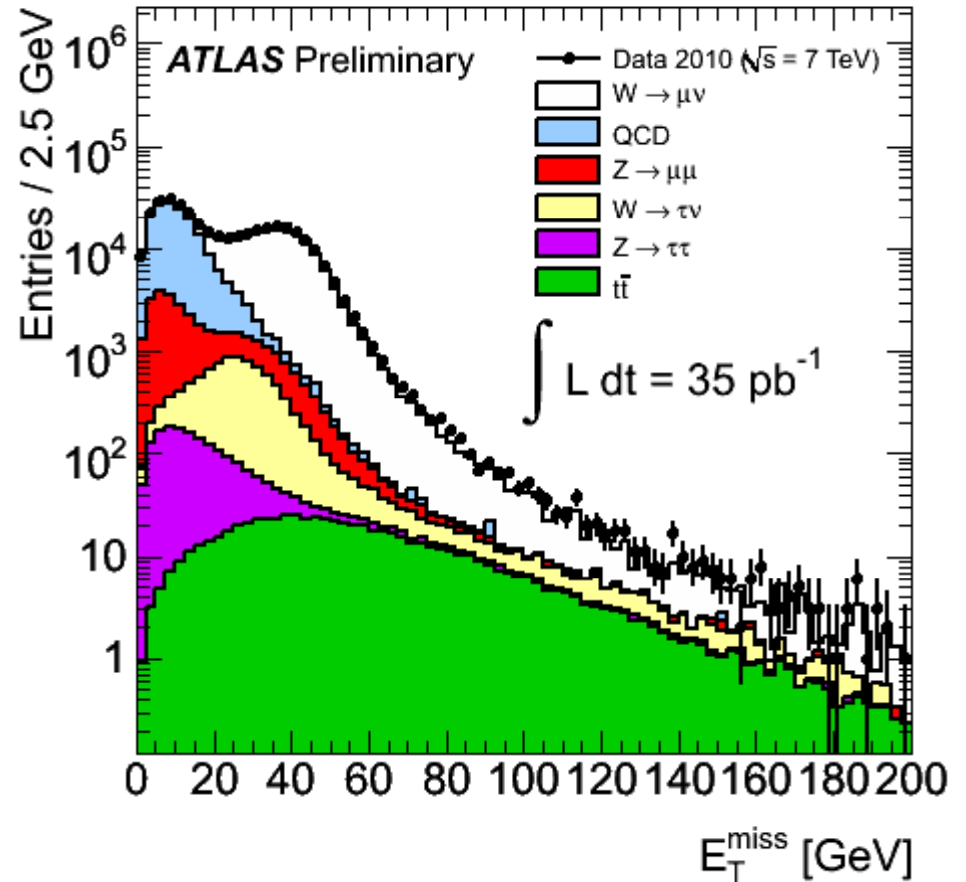
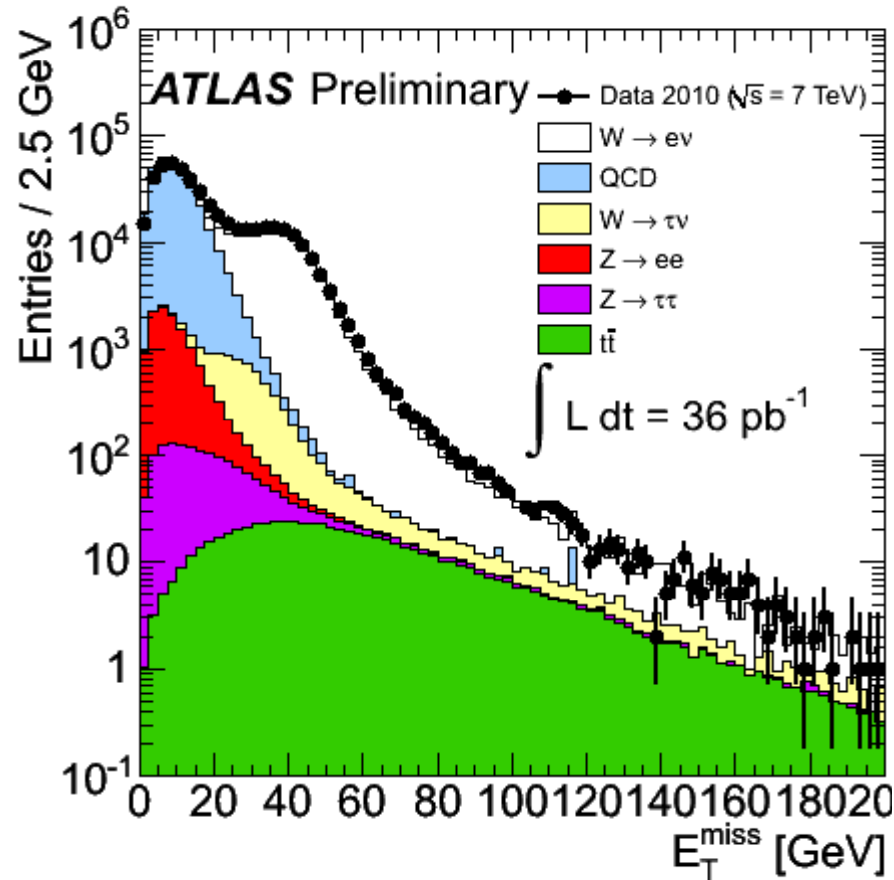
# Mögliche Herstellung am LHC

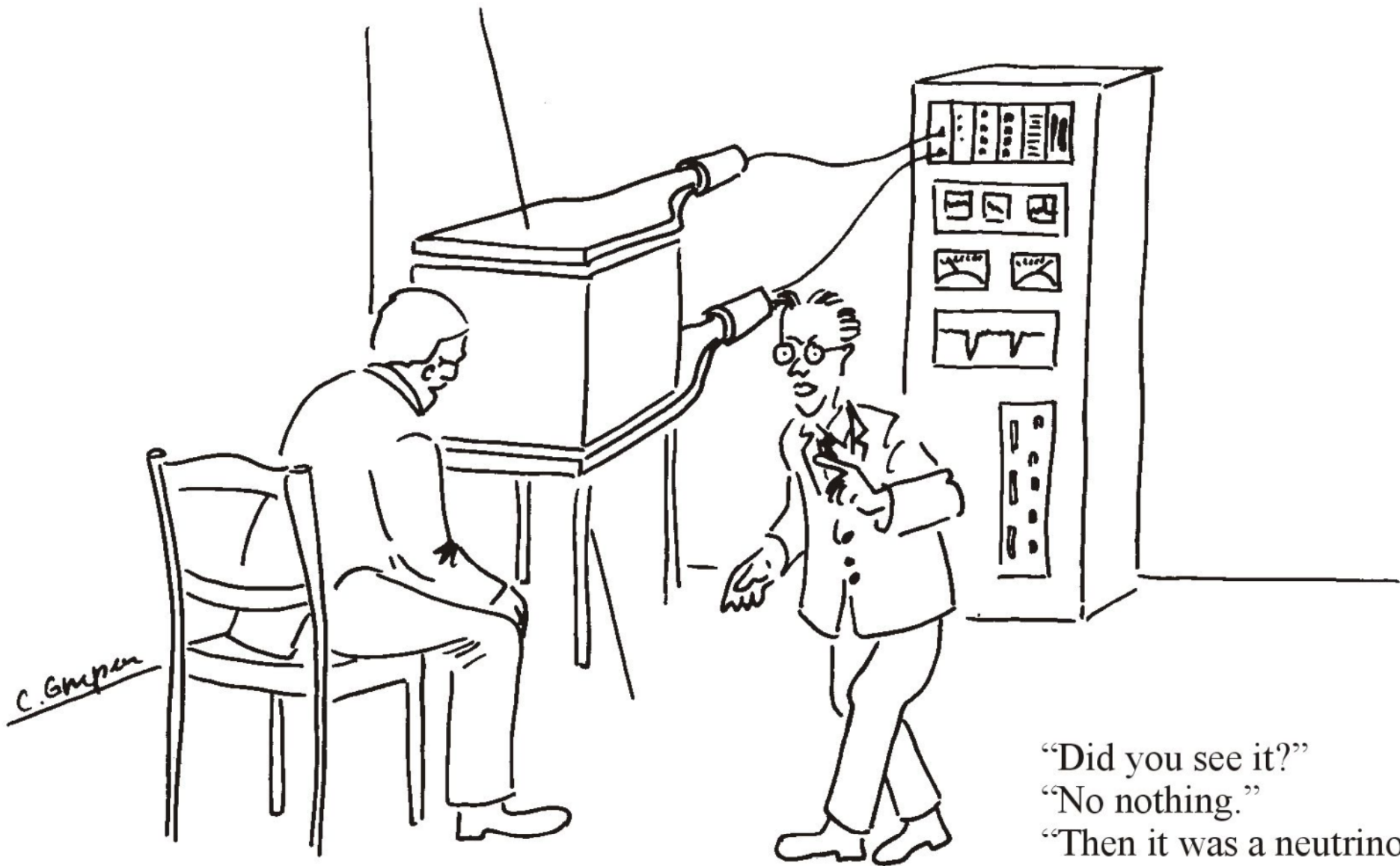
- Entweder durch Gluon-Quark oder Gluon-Gluon



- Aus den auslaufenden Quarks entstehen Jets

# Charakteristik: fehlende Energie

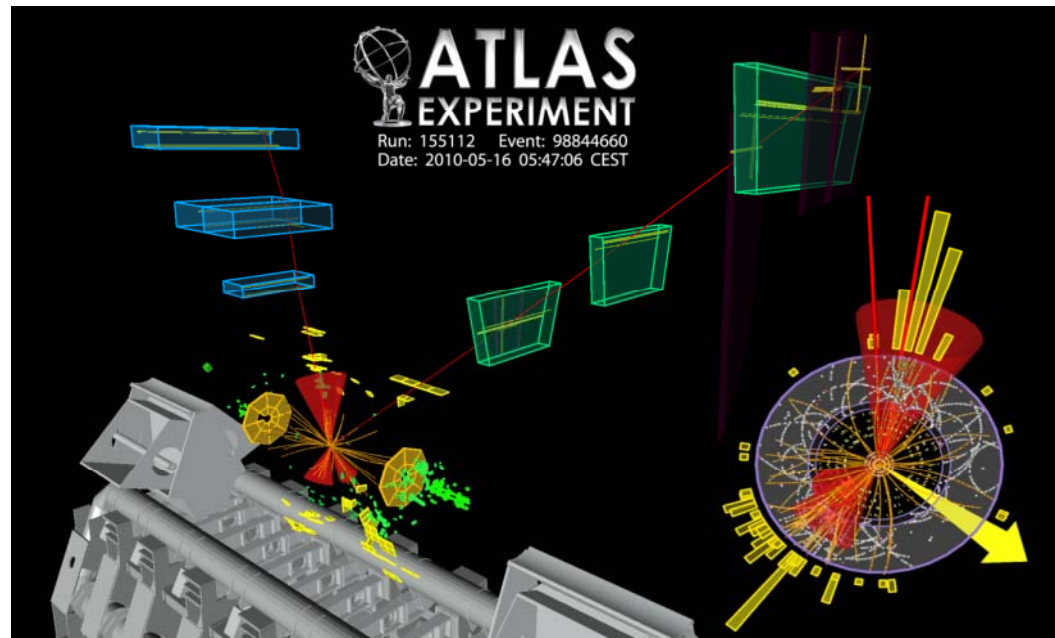
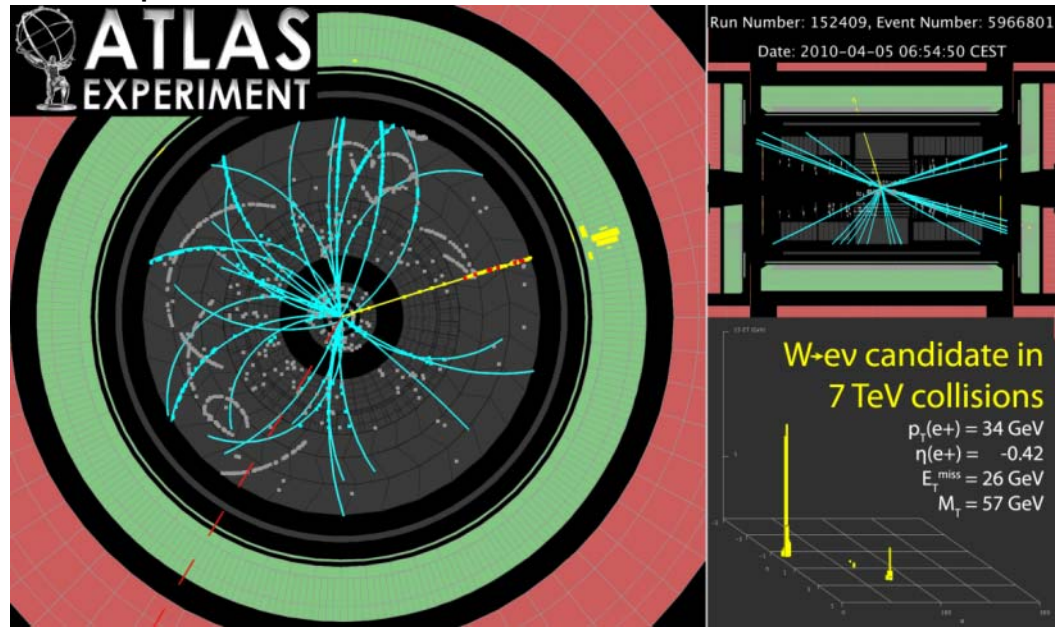
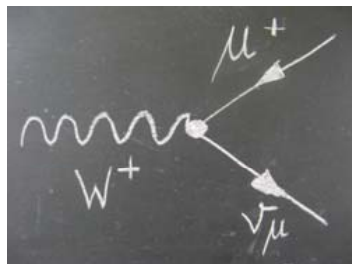
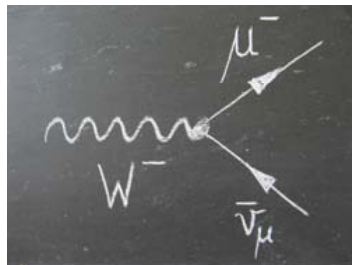
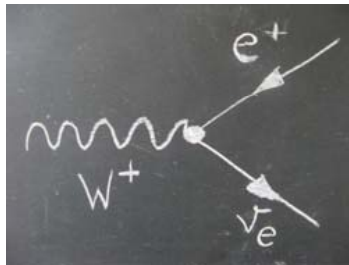
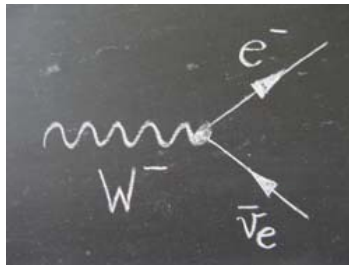




“Did you see it?”  
“No nothing.”  
“Then it was a neutrino!”

# Signaturen des W-Teilchens

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



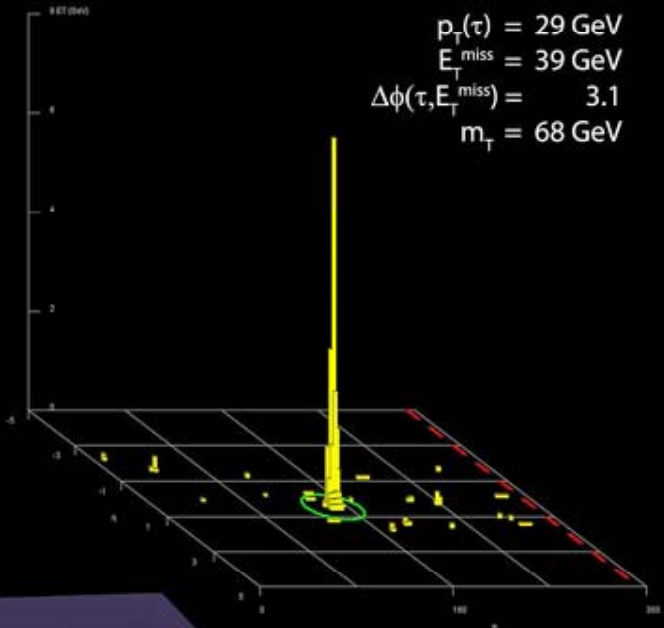
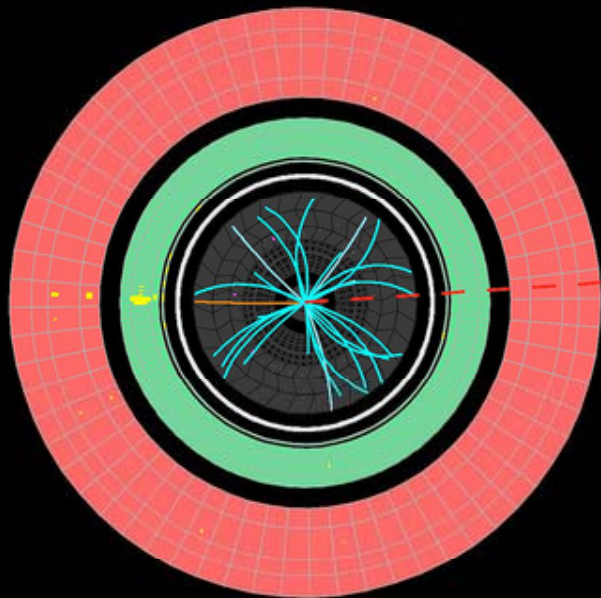


# ATLAS Kandidat für $W \rightarrow \tau\nu$

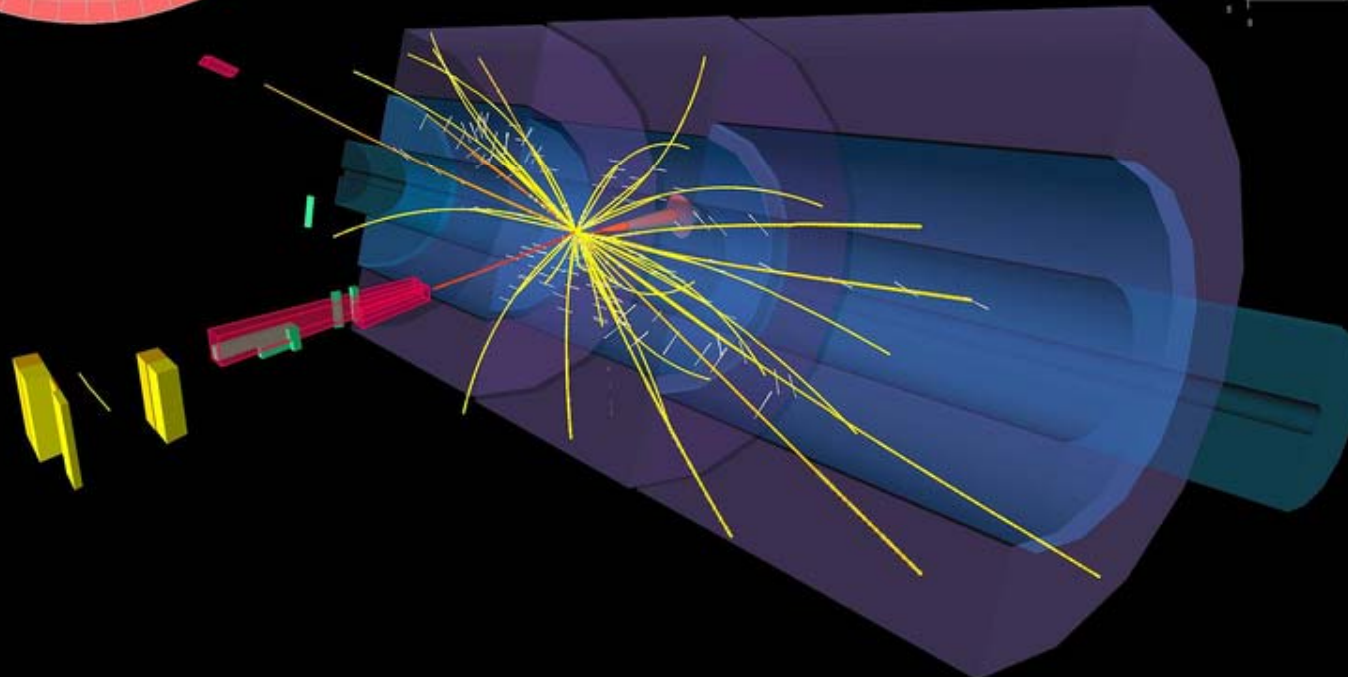


Run 155697, Event 6769403  
Time 2010-05-24, 17:38 CEST

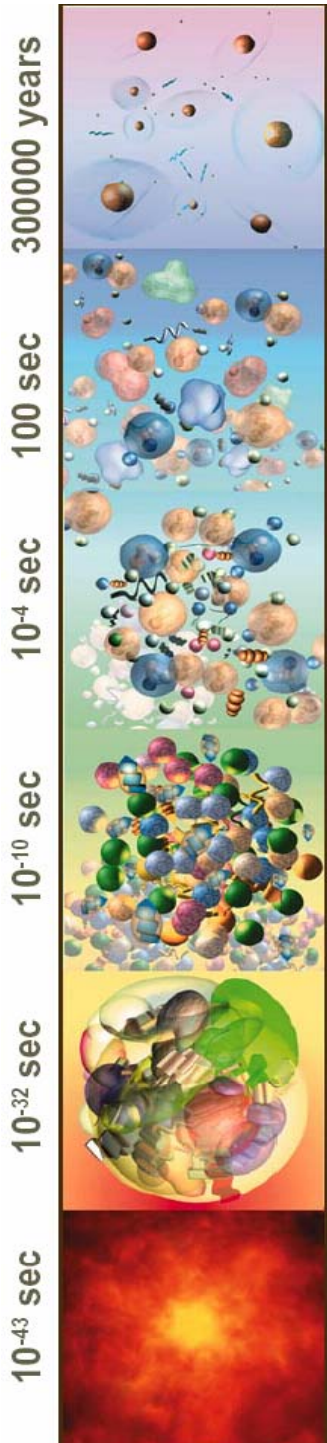
$W \rightarrow \tau\nu$  candidate in  
7 TeV collisions



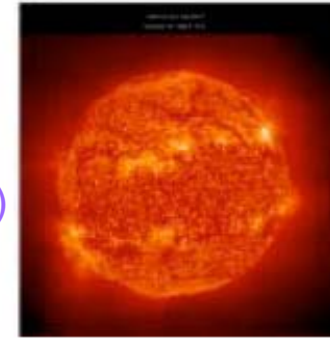
$p_T(\tau) = 29 \text{ GeV}$   
 $E_T^{\text{miss}} = 39 \text{ GeV}$   
 $\Delta\phi(\tau, E_T^{\text{miss}}) = 3.1$   
 $m_\tau = 68 \text{ GeV}$



# Massen der Teilchen



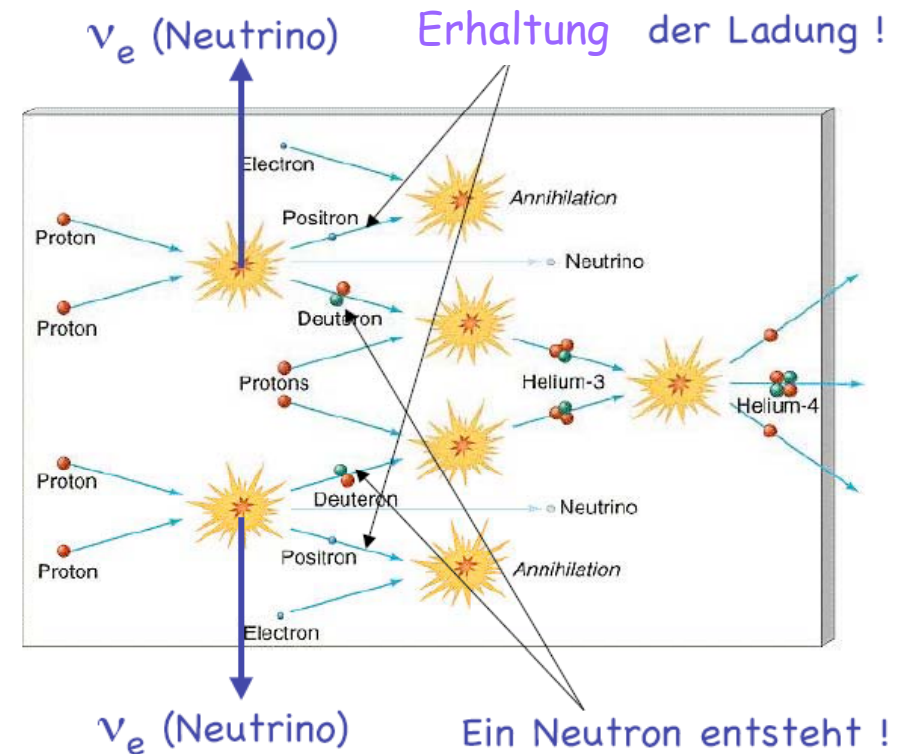
- Unter Benützung experimenteller Teilchenmassen beschreibt Theorie der schwachen Kraft alles, z.B.
- langsames Brennen der Sonne
  - $p + p \rightarrow D + e^+ + \nu$  (Energiegewinn:  $\Delta E = 0,5 \text{ MeV}$ )
  - Masse des Zwischenzustands  $m_W = 80400 \text{ MeV}$
  - Rate unterdrückt um  $\sim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



## 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 Bedeutung der Teilchenmassen

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

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

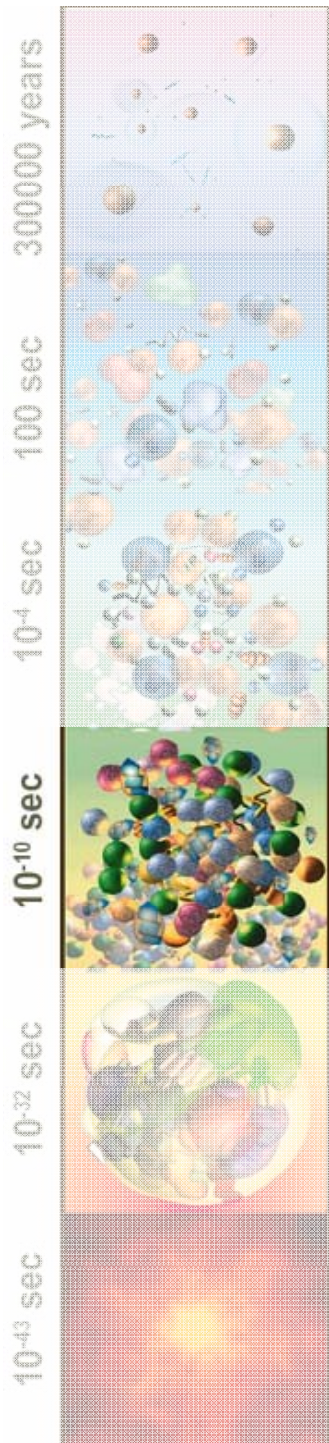
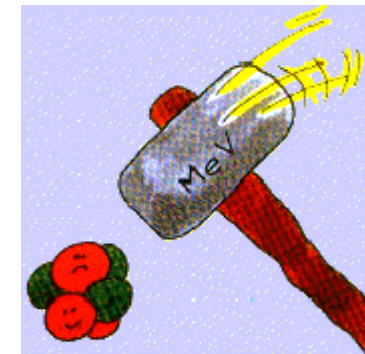
- ★ Bindungsenergie steigt mit  $m_e$
- ★ Atomdurchmesser fällt mit  $1 / m_e$

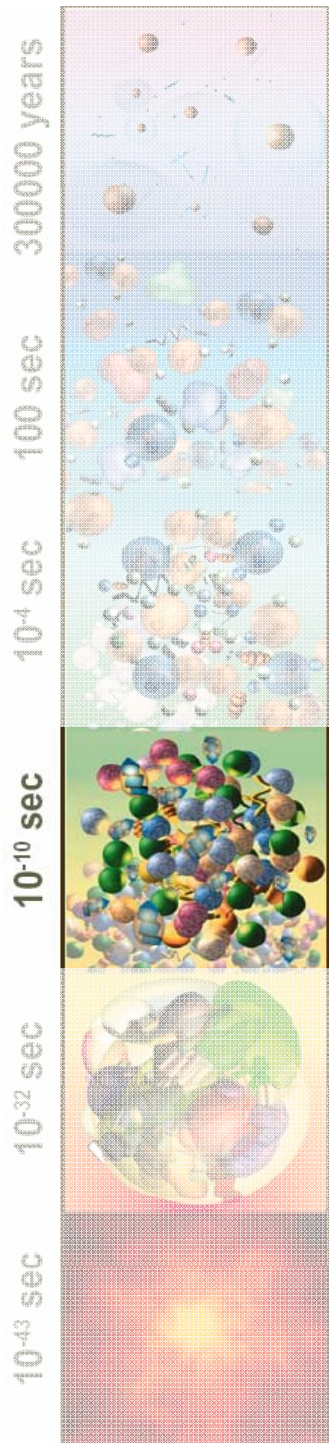


## ★ Stabilität der Nukleonen:

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)

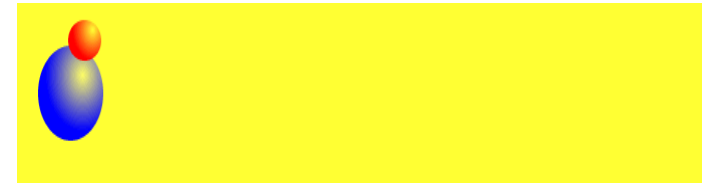
Download: : [www.teilchenphysik.de/multimedia/informationmaterial/veranstaltungen](http://www.teilchenphysik.de/multimedia/informationmaterial/veranstaltungen)

- Erst nachdem der LHC geklärt hat, wie Teilchenmassen überhaupt entstanden sind, wird man erforschen können, wie ihre Werte zustande kamen.
- [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)
- <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)
- <http://arxiv.org/abs/astro-ph/9909295v2>  
C. Hogan, „Why the Universe is Just So“ (1999)
- <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?

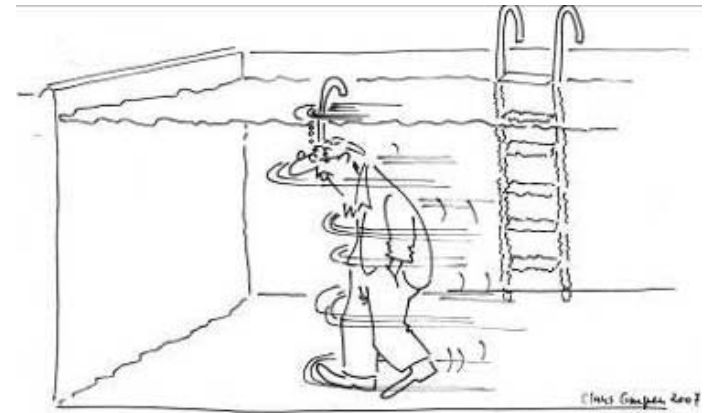
## ■ “Leeres” Vakuum

- Alle Teilchen sind masselos
- bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit



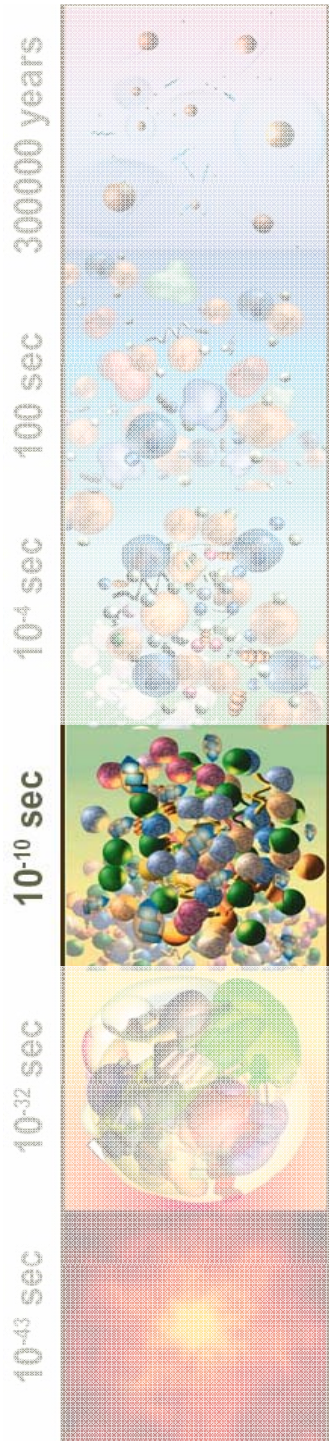
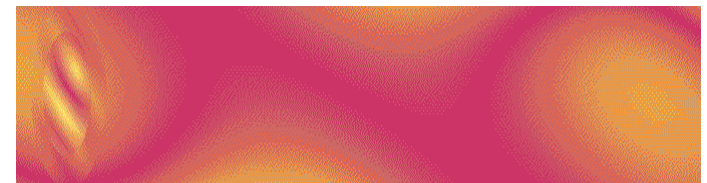
## ■ Higgshintergrundfeld

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



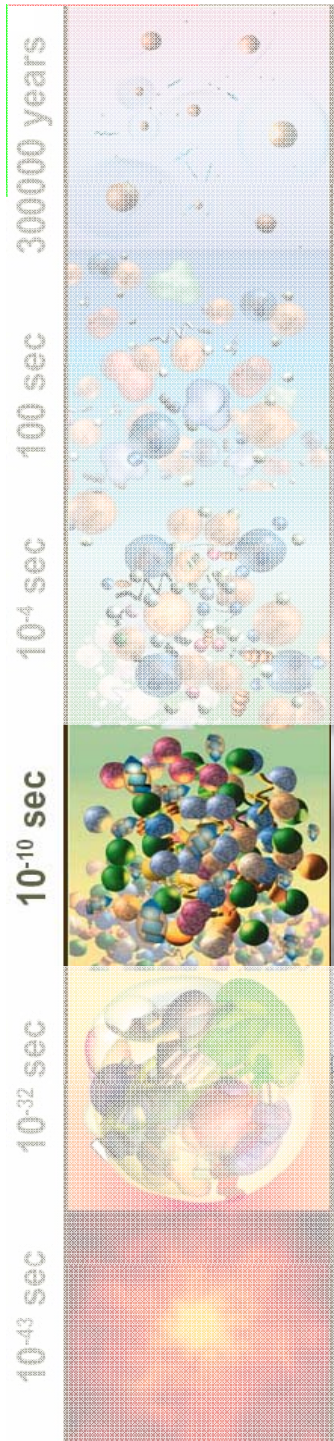
## ■ Higgs-Teilchen

- 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

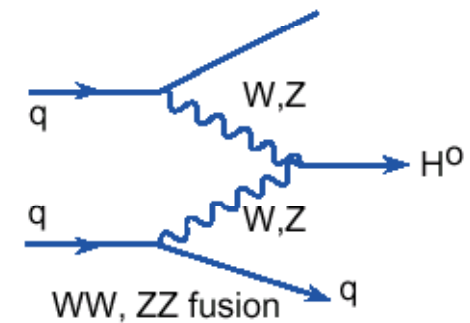
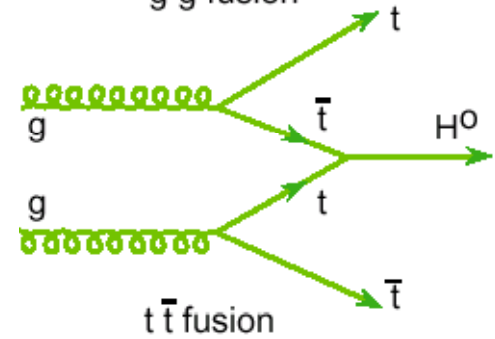
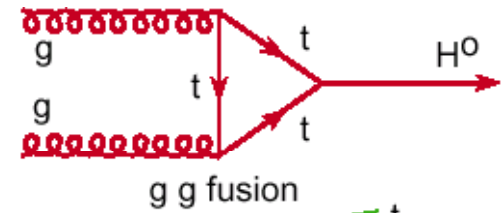
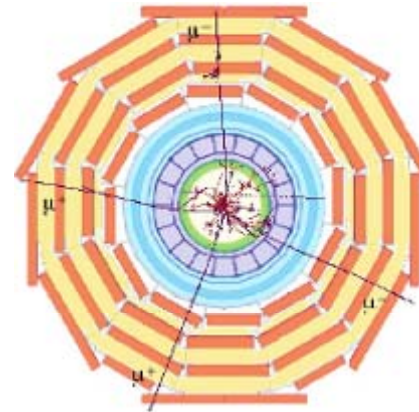
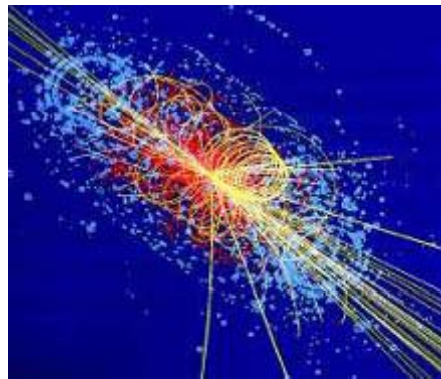


# Higgs Suche bei ATLAS und CMS

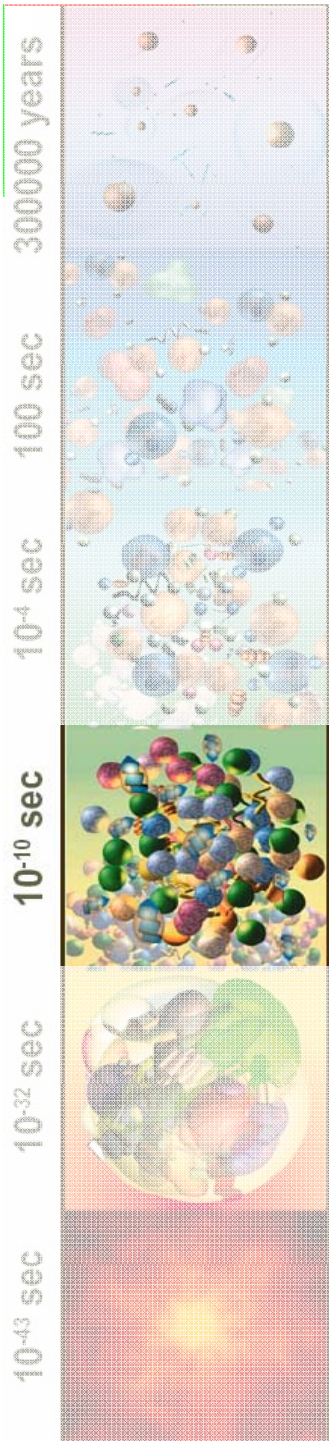
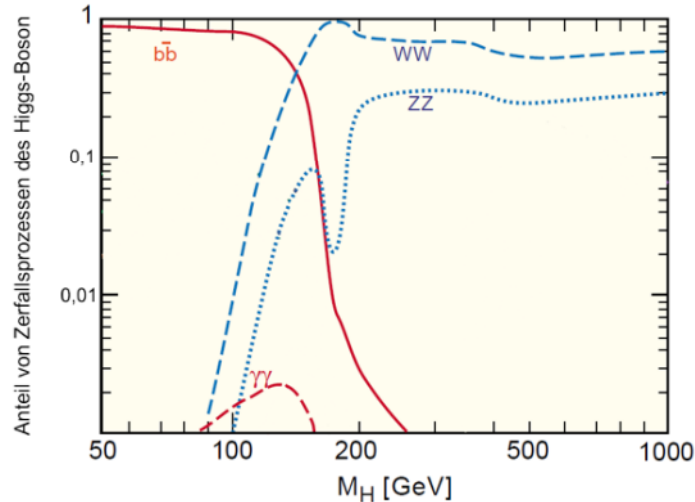
→ [www.atlas.ch/multimedia](http://www.atlas.ch/multimedia)

## ■ Higgs Masse unbekannt:

- Viele Produktionsmechanismen
- Viele mögliche Zerfälle

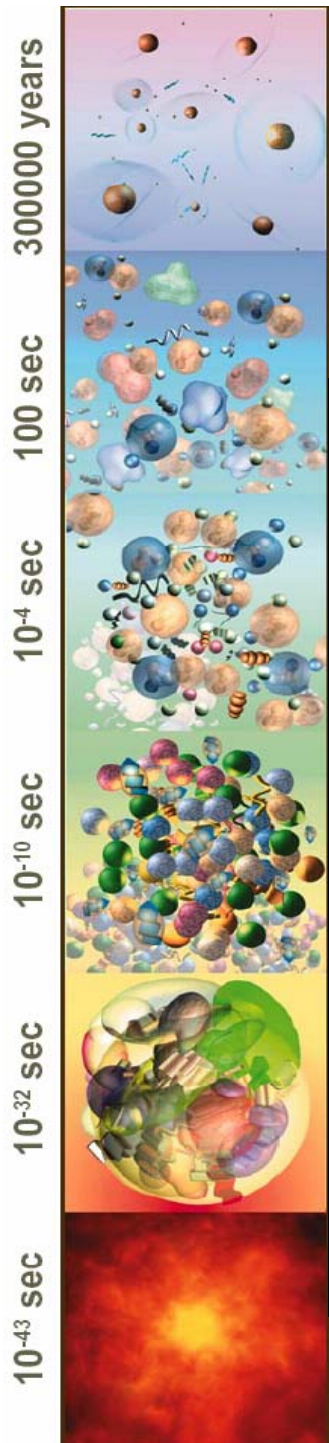


## ● Als Funktion der Masse vorhersagbar



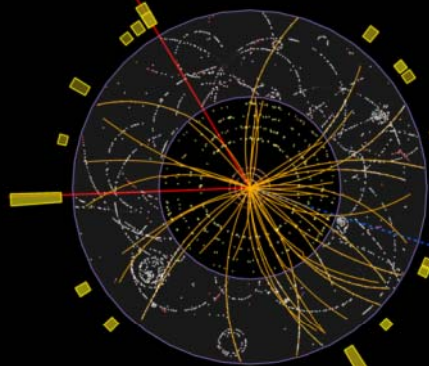
## Zweite Aufgabe für später

- Findet Kandidaten für  $H \rightarrow W^+ W^-$  !
  - Oder war das doch ein  $Z Z \rightarrow \mu^+ \mu^- \nu \nu$  ?
  - Ist das eindeutig unterscheidbar?



**ATLAS**  
EXPERIMENT

Candidate Event with a  $Z \rightarrow \mu\mu$  and missing  $E_T$

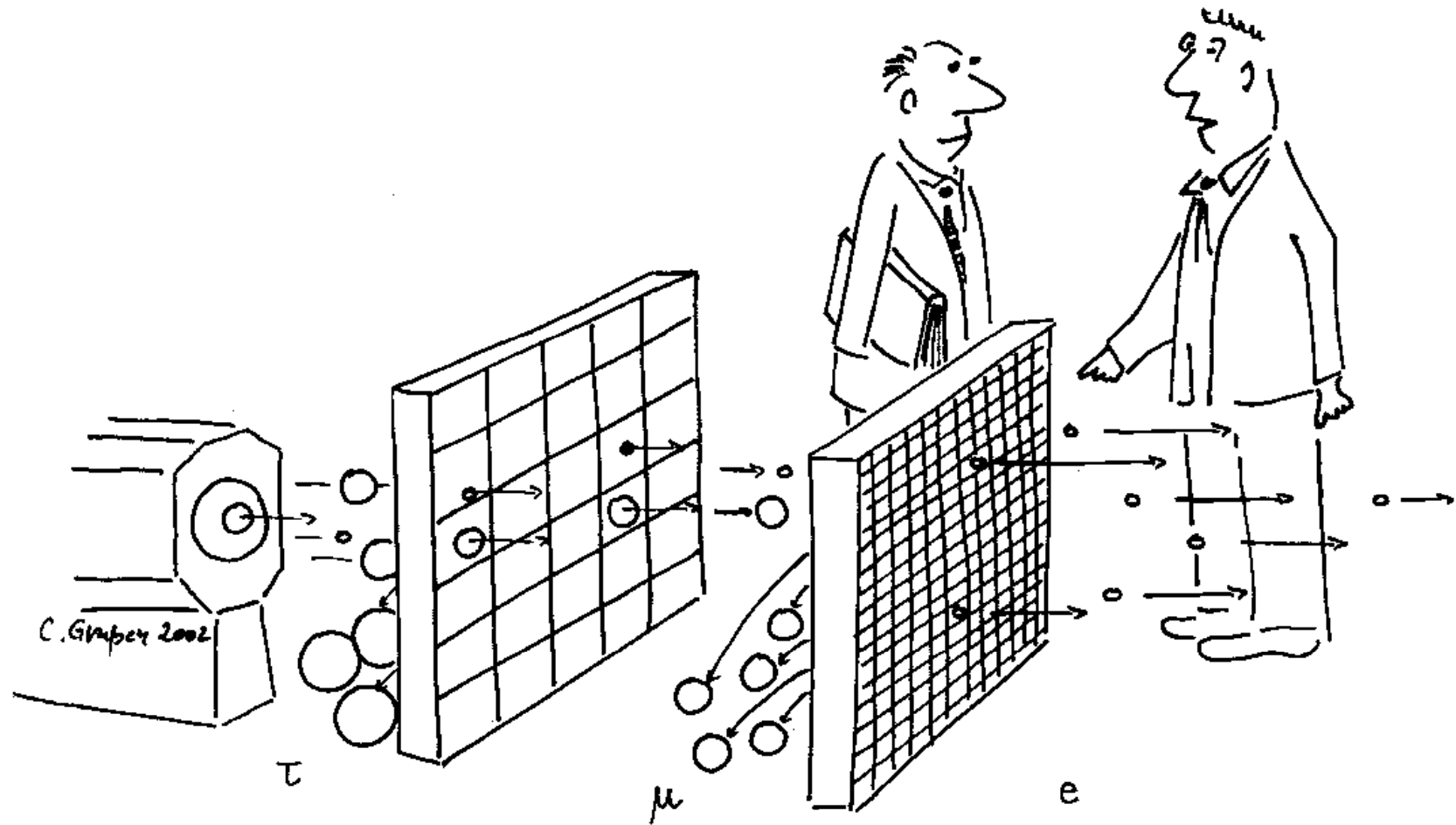


Run 167776, Event 129360643  
Time 2010-10-28 10:41:18 CET

- VIEL ERFOLG !!!



UND VIEL SPAß!



"Our new lepton identifier!"