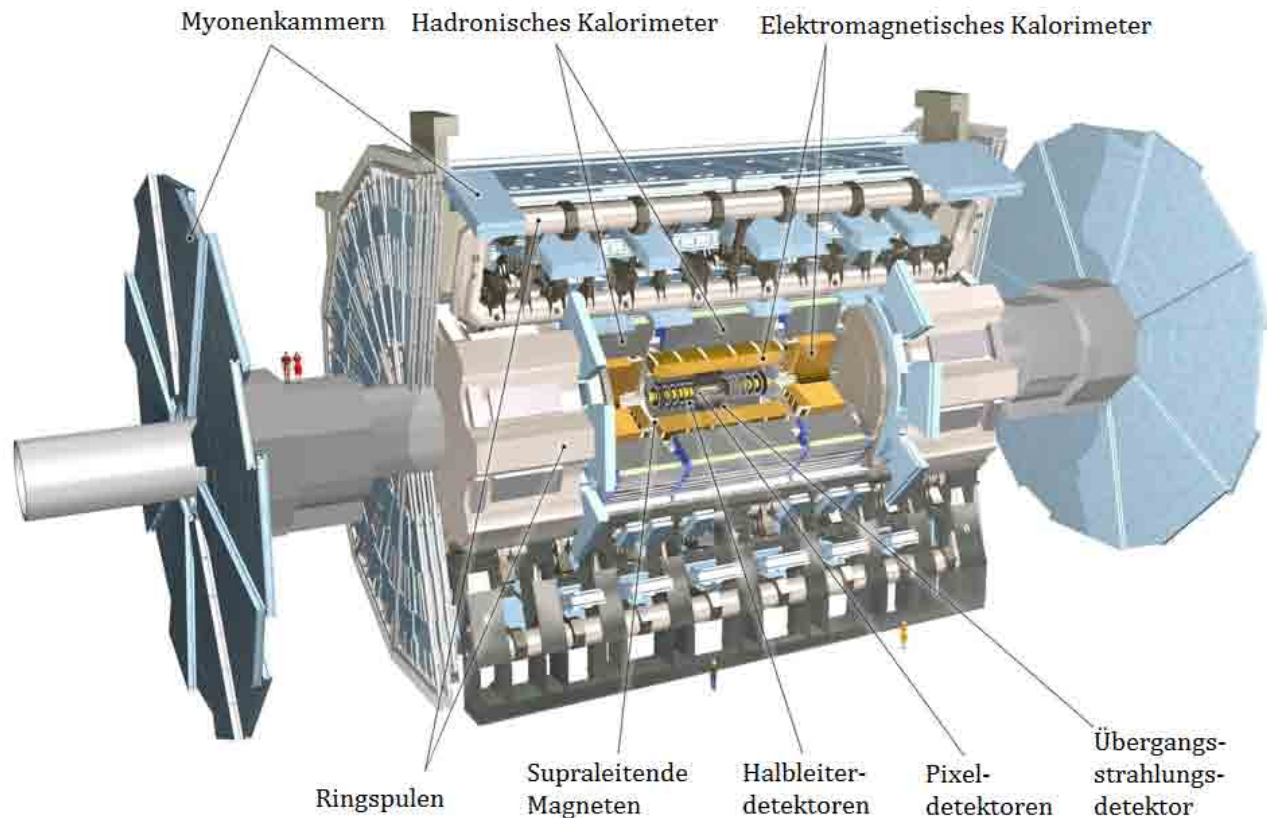


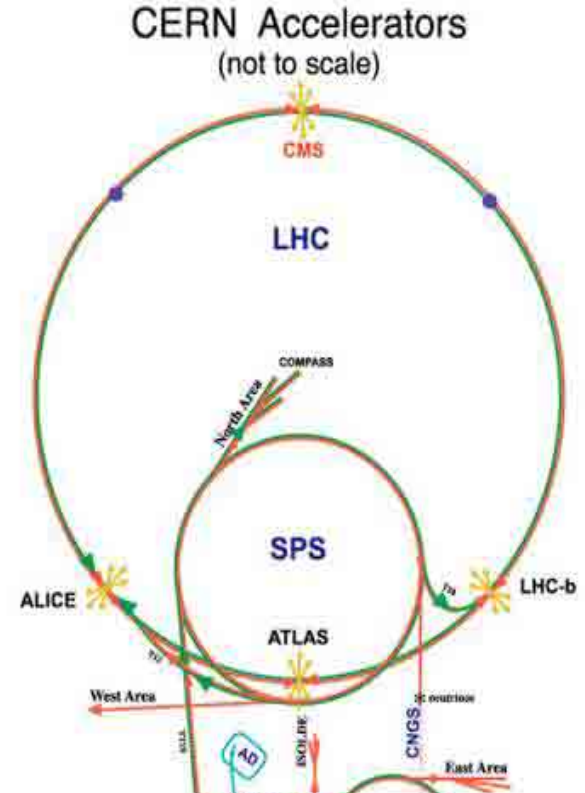
# Einführung in die Teilchenphysik

## Aktuelle Forschung mit dem Netzwerk Teilchenwelt

Michael Kobel (TU Dresden)  
MINT Camp, Dresden 22.11.2012



- # 1. BESCHLEUNIGER UND DETEKTOREN AM CERN
2. Warum Teilchenphysik?
  3. Das Theoriegebäude: Standardmodell der Teilchenphysik
  4. Identifikation von Teilchen und Ereignissen
  5. Teilchenmassen und Suche nach dem Higgs Teilchen



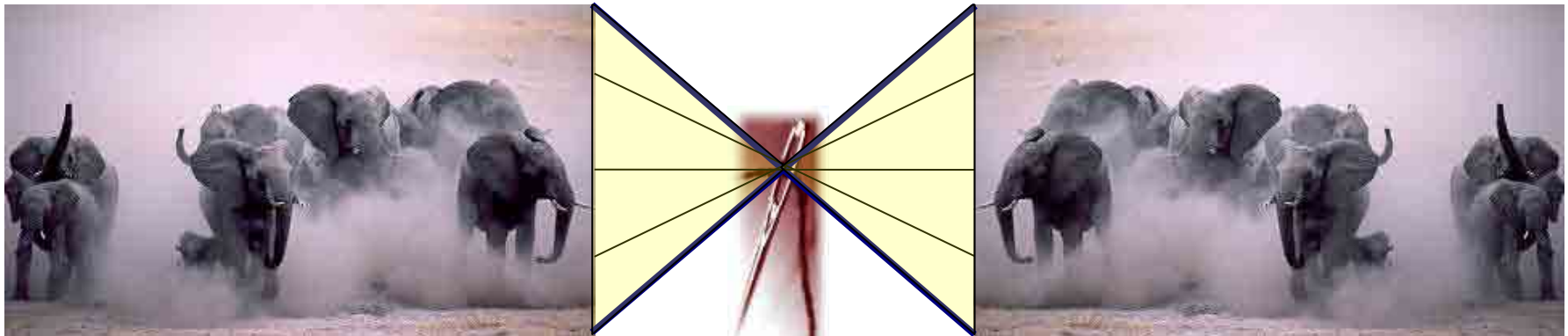
LEP ( $e^+e^-$ )	1989-1995	45+45 GeV
	1995-2000	bis 104+104 GeV
LHC (pp)	2010-2011	3500+3500 GeV
	2012	4000+4000 GeV
	> 2015	6500+6500 GeV?

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: LEIR, PS Divison, CERN, 02.09.98  
 Revised and adapted by Antonella Del Rossio, IFT Div.,  
 in collaboration with H. Dostinger, SI, Div., and  
 D. Margulski, PS Div. CERN, 23.05.01

- Einheit:  $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$  (1 GeV:  $10^9 \text{ eV}$ , 1 TeV:  $10^{12} \text{ eV}$ )  
Bewegungsenergie eines Teilchens mit elektrischer Ladung  $Q=1$  nach Durchlaufen einer Beschleunigungsspannung von  $U=1\text{V}$
- Gespeicherte Energie der beiden Protonenstrahlen im LHC:  $2 \times 140 \text{ MJ}$

## Wie 100 Elefanten auf Kollisionskurs



50 Elefanten mit 40 km/h

50 Elefanten mit 40 km/h



Die Energie eines einzelnen Protons entspricht der einer Mücke im Anflug

Nadelöhr:  
0.3 mm Durchmesser

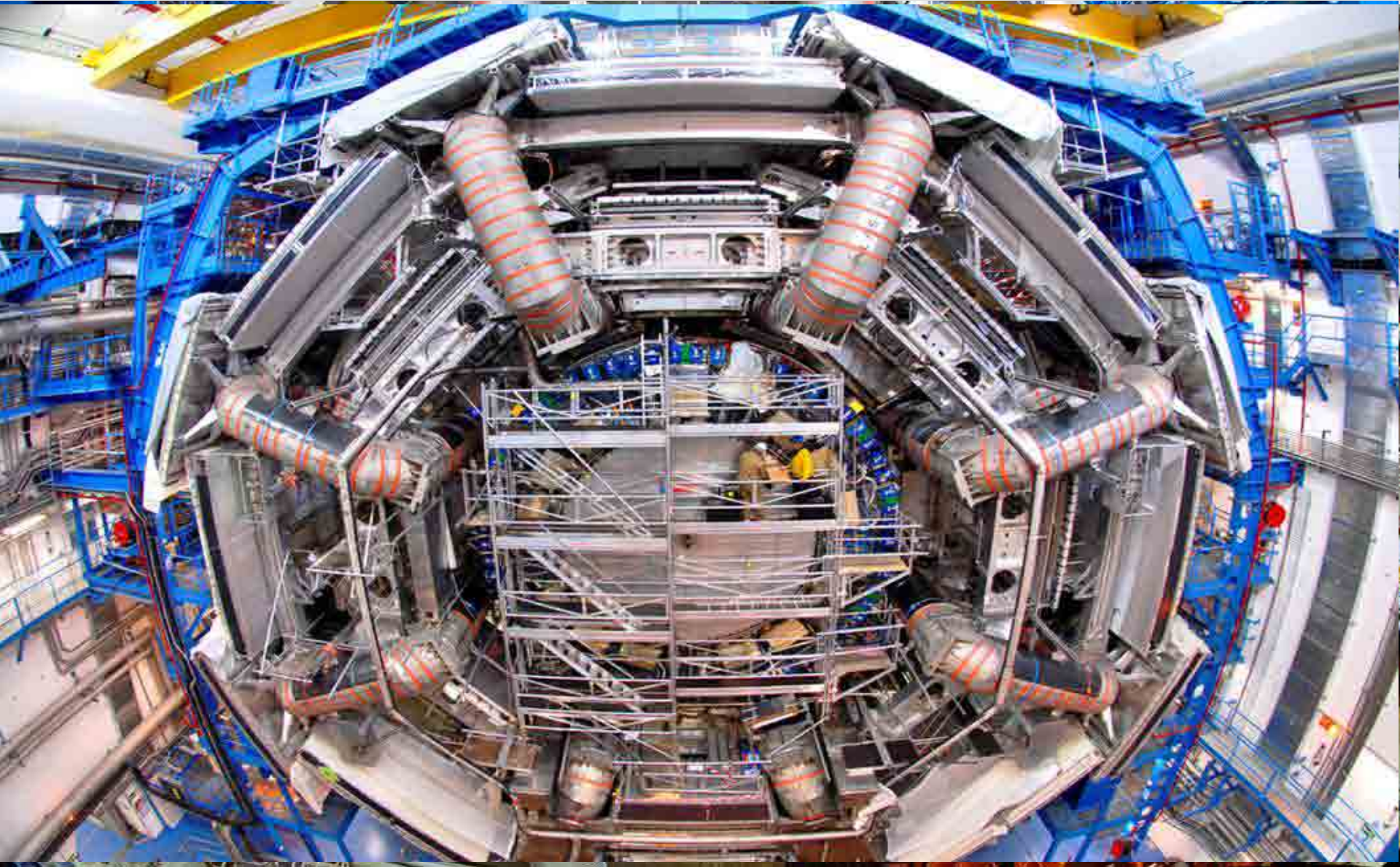
Protonenstrahlen am Kollisionspunkt:  
0.03 mm Durchmesser





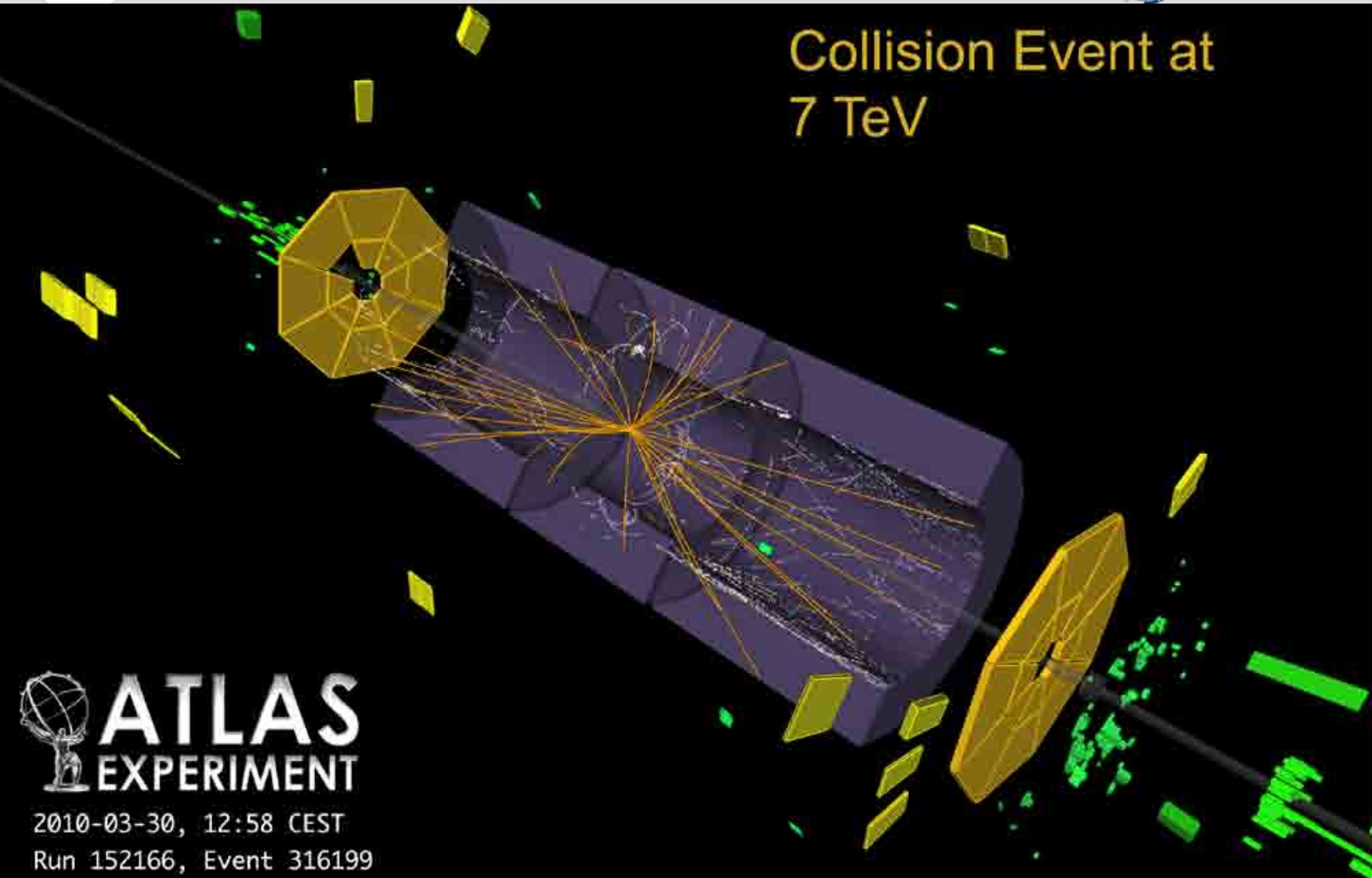
CERN visit - Introduction









Collision Event at  
7 TeV**ATLAS**  
EXPERIMENT

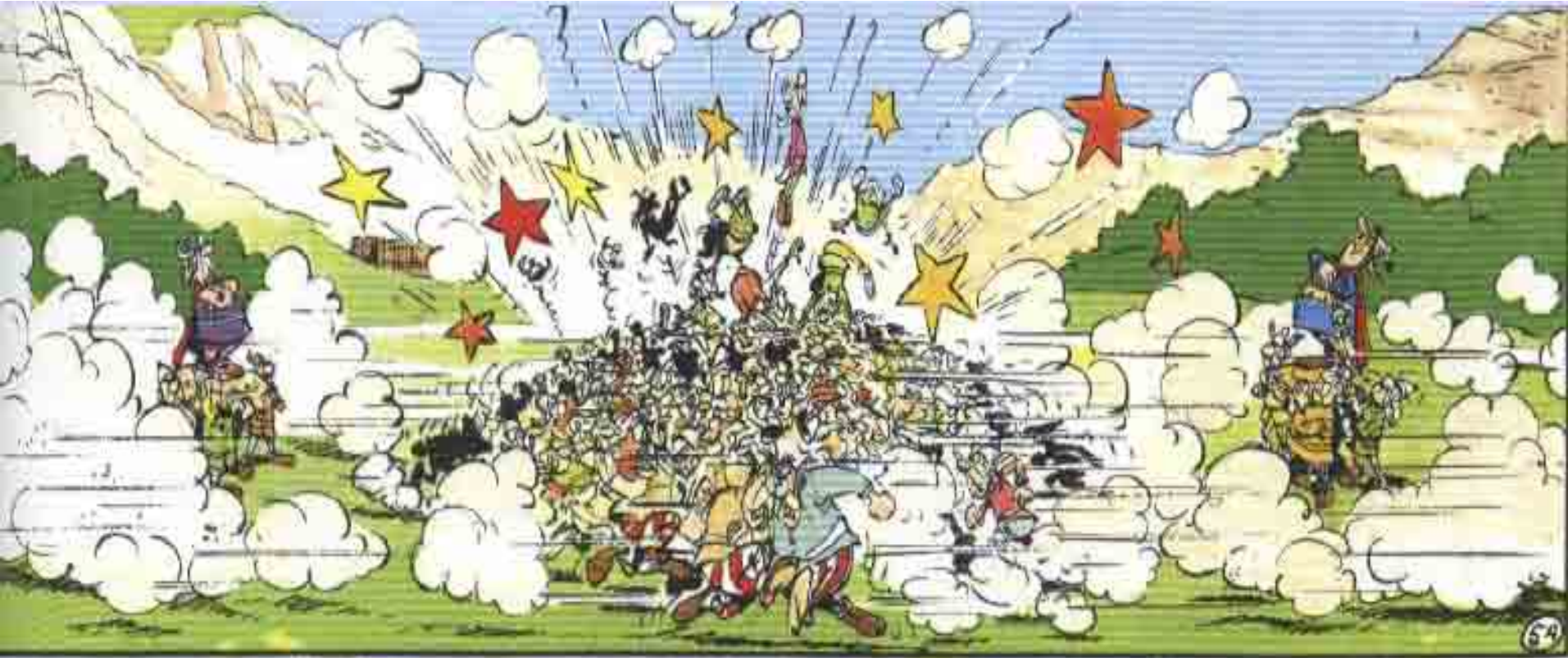
2010-03-30, 12:58 CEST

Run 152166, Event 316199

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



1. Beschleuniger und Detektoren am CERN
- 2. WARUM TEILCHENPHYSIK?**
3. Das Theoriegebäude: Standardmodell der Teilchenphysik
4. Identifikation von Teilchen und Ereignissen
5. Suche nach dem Higgs Teilchen



# *Warum?*





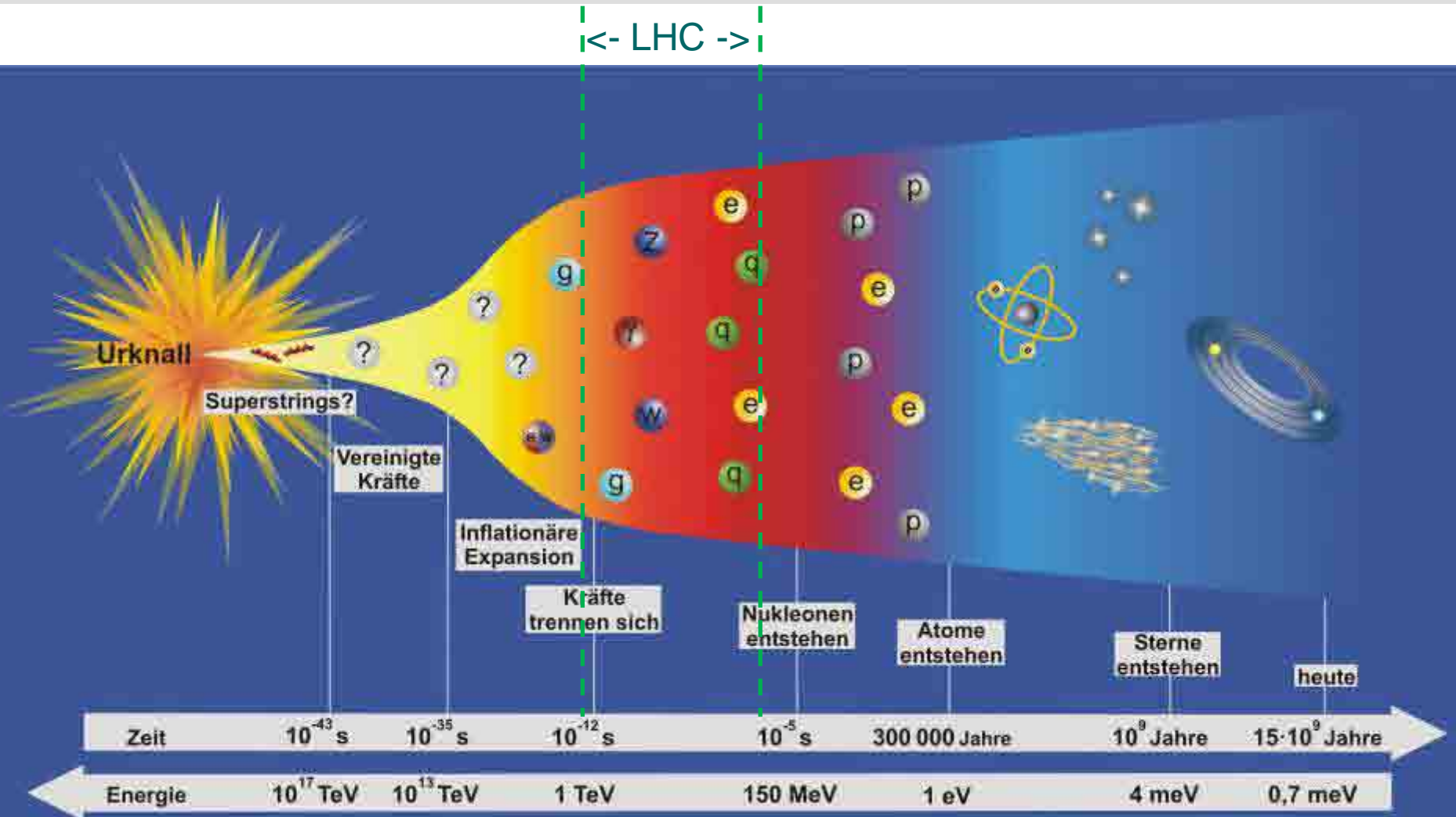
Raum



Zeit



Materie



Energie 1 TeV = mittlere Bewegungsenergie bei Temperatur von  $10^{13}$  K = 1 Million mal heißer als in der Sonne

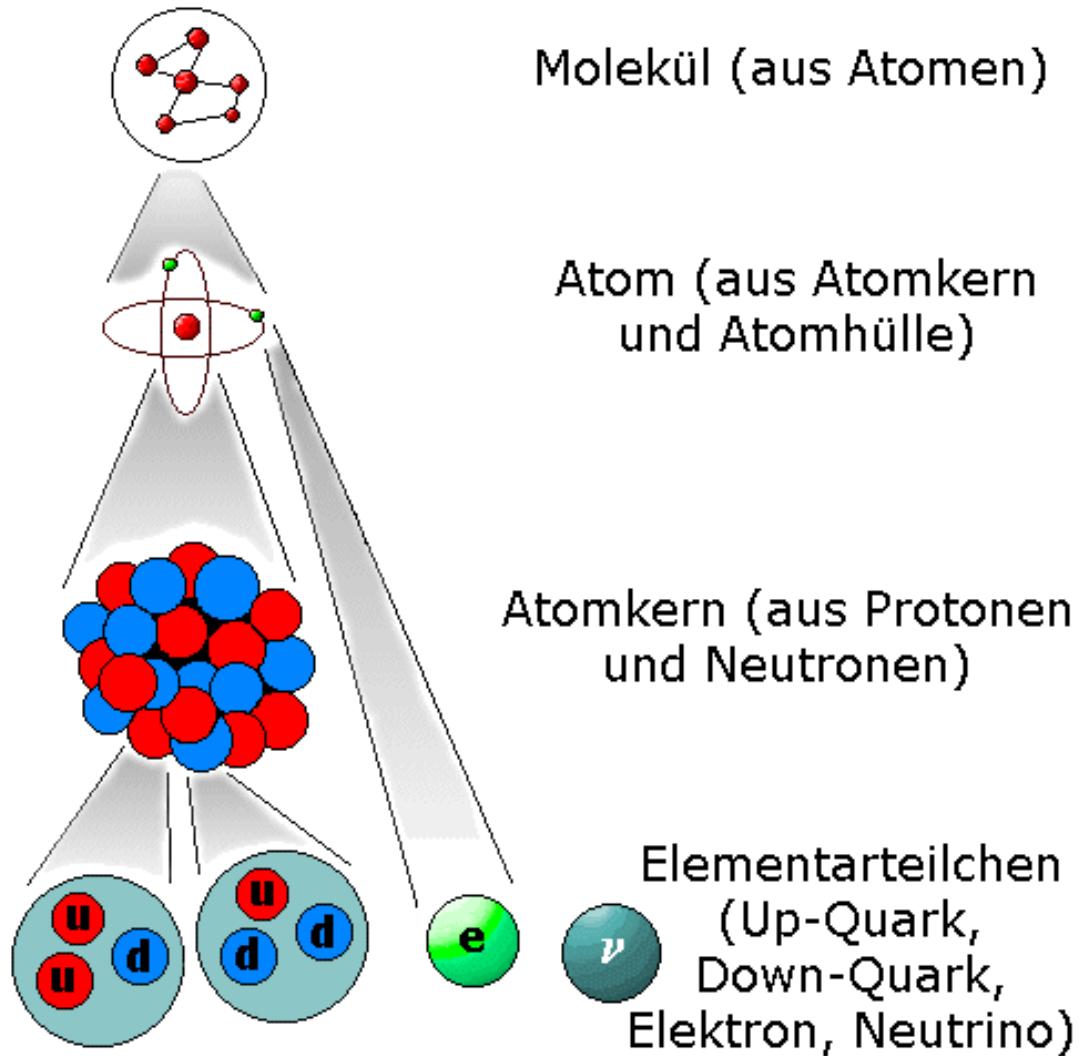




Makrokosmos



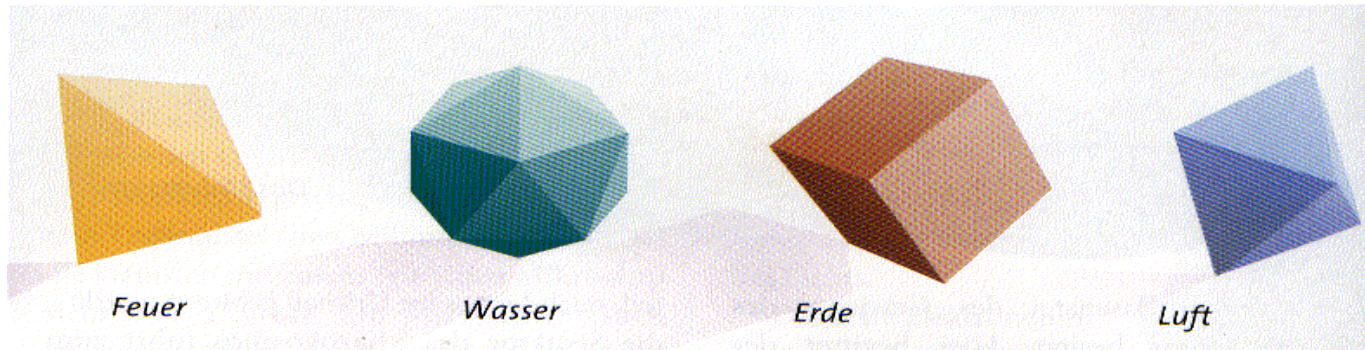
Mikrokosmos



1. Beschleuniger und Detektoren am CERN
2. Warum Teilchenphysik?
- 3. DAS THEORIEGEBÄUDE:  
STANDARDMODELL DER  
TEILCHENPHYSIK**
4. Identifikation von Teilchen und Ereignissen
5. Suche nach dem Higgs Teilchen



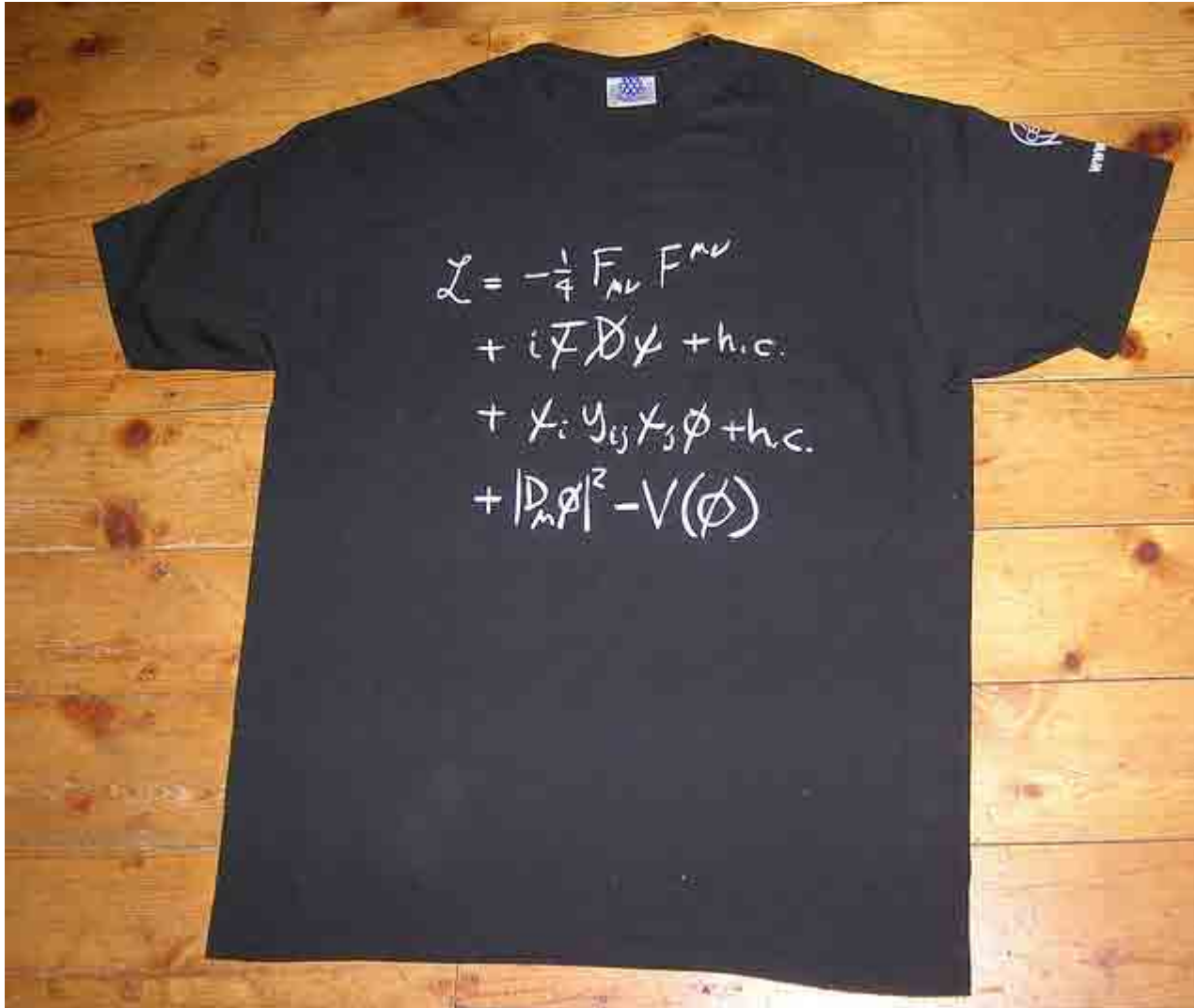
- ▶ **Elemente und Kräfte:** 500-430 v.Chr. Empedokles
  - ▶ **Vier Elemente:** Feuer, Wasser, Erde, Luft
  - ▶ **Zwei Urkräfte:** Liebe , Haß  $\hat{=}$  Mischung , Trennung
- ▶ **Symmetrien:** 427-347 v.Chr. Platon
  - ▶ **Symmetrische Körper:** Schönheit der Gesetze



- ▶ **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!
- **Elementare Bausteine der Welt**
  - Träger von Ladungen
  - „Spielfeld“ der entsprechenden Wechselwirkungen
- **Massenmechanismus**
  - Herkunft der Teilchenmassen noch unbekannt
  - Hypothese: Überall im Universum vorhandenes Hintergrundfeld
  - Nachweis: Higgs-Teilchen (Anregung dieses Feldes)
- **Errungenschaft des Standardmodells**
  - beschreibt \*alle\* bekannten Prozesse
  - Ist (derzeit) DIE grundlegende Theorie der Physik



- auf CERN  
T-shirt und  
Mouse Pad







- **Bedeutung der Formel:**

- Alle Prozesse unserer Welt lassen sich prinzipiell mit Hilfe dieser Formel beschreiben (z.B. alle Kräfte, Licht, Magnetismus, Elektromotor, Radiowellen, Kernzerfälle, Brennen von Sternen...)
- Jedem Term entspricht in dieser Reihenfolge
  - à kinetische Energie freier Teilchen
  - à Wechselwirkung zwischen Teilchen
  - à Massen und Mischungen der Teilchen (durch Hintergrundfeld)
  - à Energie und Anregungen des Hintergrundfeldes (Higgs-Teilchen)
- Die Aufstellung der Formel ist eindeutig, wenn man annimmt, dass die Natur 3 bestimmte (sehr abstrakte) Symmetrien erfüllt
- Ohne Wechselwirkungen (2. Zeile) lassen sich die Symmetrien nicht erfüllen -> Wir haben die „Ursache“ der Existenz von Wechselwirkungen verstanden!

# Zentraler Begriff: Wechselwirkung

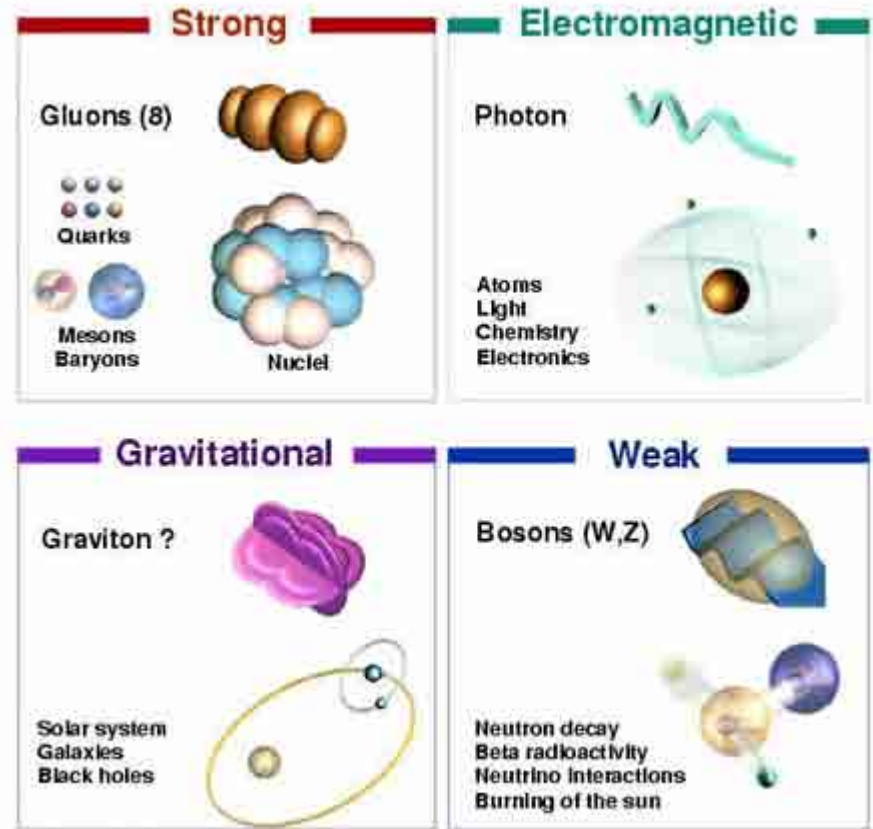
- Pierers Universallexikon:
  - **Wechselwirkung**, das Verhältnis zweier gleichzeitig vorhandener Gegenstände, vermöge dessen sie füreinander in gewissen Beziehungen zugleich als Ursache und als Wirkung aufgefasst werden.



- 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
  - Wechselwirkungen rufen nicht nur Kräfte hervor, sondern auch Phänomene wie Teilchenentstehung oder Teilchenzerfall

# Wechselwirkungen (WW) und Kräfte

- 1. Starke WW, 2. Schwache WW, 3. Elektromagnetische WW, 4. Gravitation
- Welche Kräfte gehören zu welcher fundamentalen Wechselwirkung?
  - Schwerkraft
  - Kernkraft
  - Coulomb-Kraft
  - Reibungskraft
  - Muskelkraft
  - Motorkraft
  - ...
- Welche WWen spüren wir direkt?
  - Gravitation
  - Elektromagnetische WW
- Welche der beiden ist stärker?
- Woran könnte es liegen, dass wir von den beiden anderen WW im Alltag nichts „merken“?

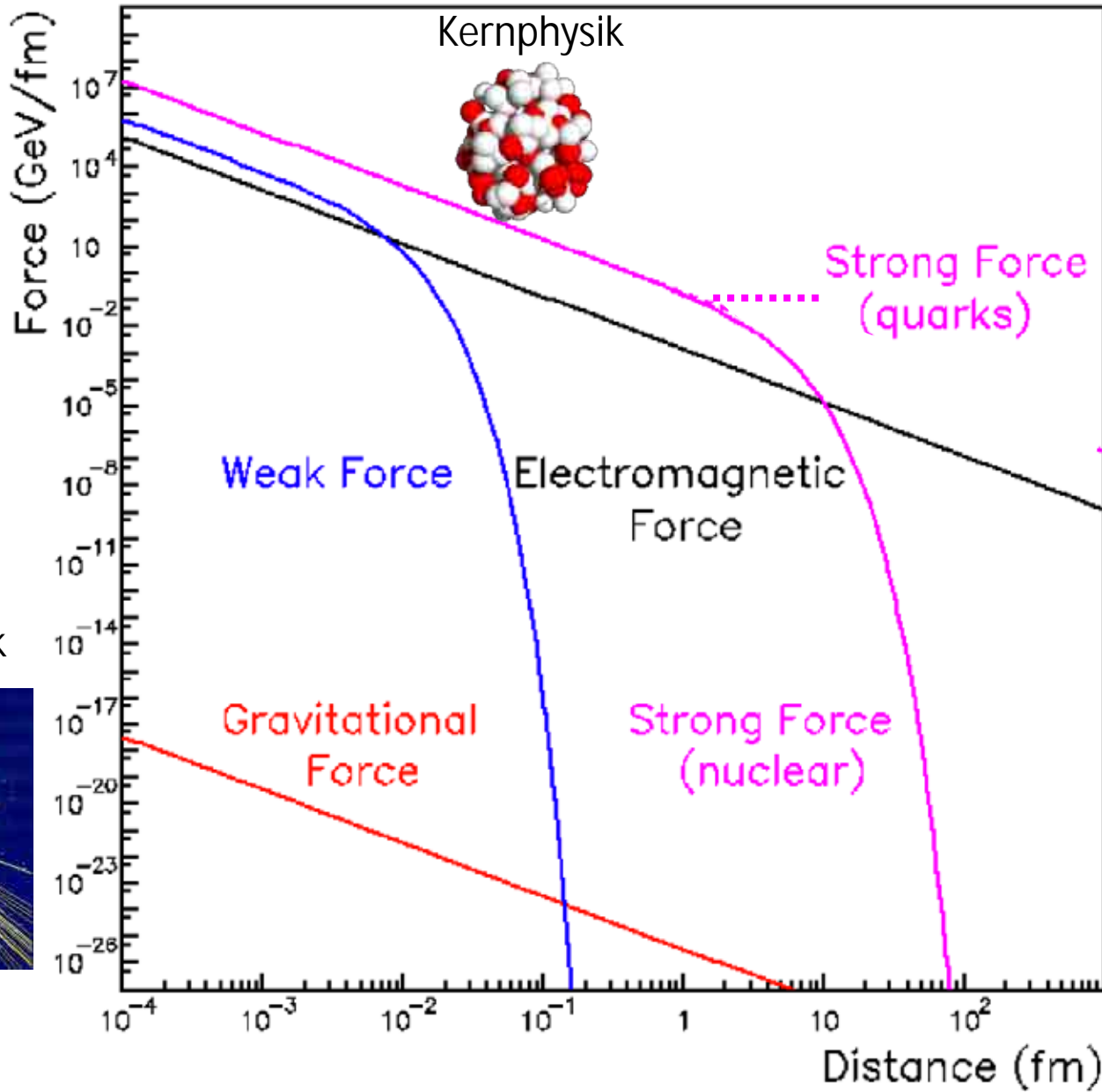


*The particle drawings are simple artistic representations*





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



Kernphysik



Strong Force (quarks)

Weak Force

Electromagnetic Force

Gravitational Force

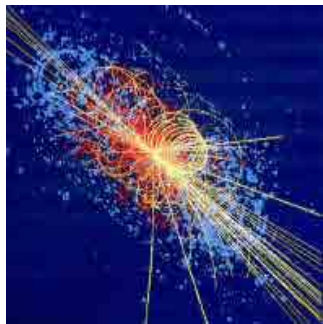
Strong Force (nuclear)

„Wir“

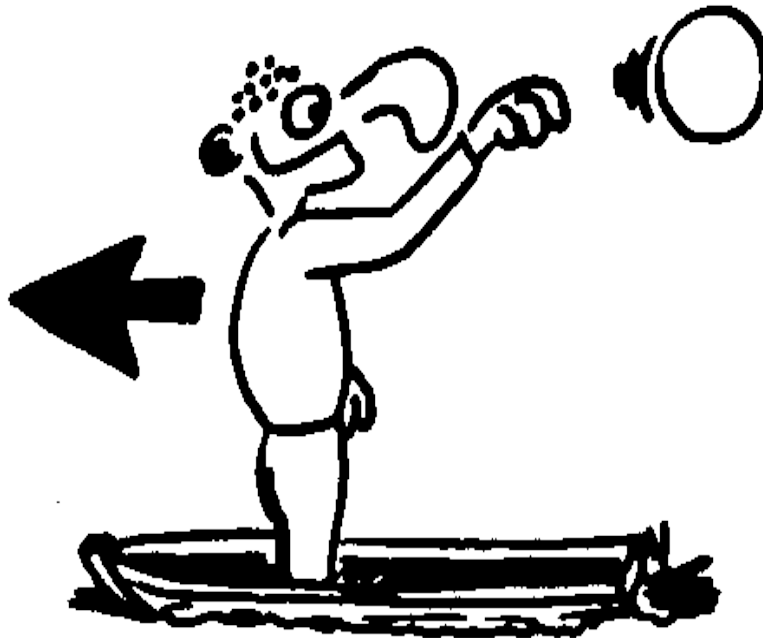


[www.schmunzelmal.de](http://www.schmunzelmal.de)

Teilchenphysik



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



Abstoßend





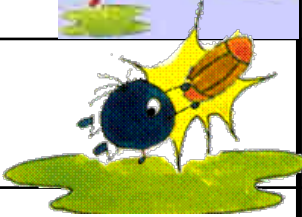
Anziehend

[www.physicsmasterclasses.org/exercises/unischule/baust/bs\\_6fram\\_lv123.html](http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/unischule/baust/bs_6fram_lv123.html)

(nur in internet explorer abspielbar)



- Jede Wechselwirkung hat eigene Botenteilchen

Wechselwirkung	Botenteilchen	
Starke WW (z.B. Kernkraft)	Gluonen $g$	
Schwache WW (z.B. Kernreaktionen)	„Weakonen“ (W und Z)	
Elektromagnetismus	Photonen $\gamma$	
Schwerkraft	Gravitonen ?	

- Wechselwirkung nur mit Teilchen, die entsprechende Ladung tragen



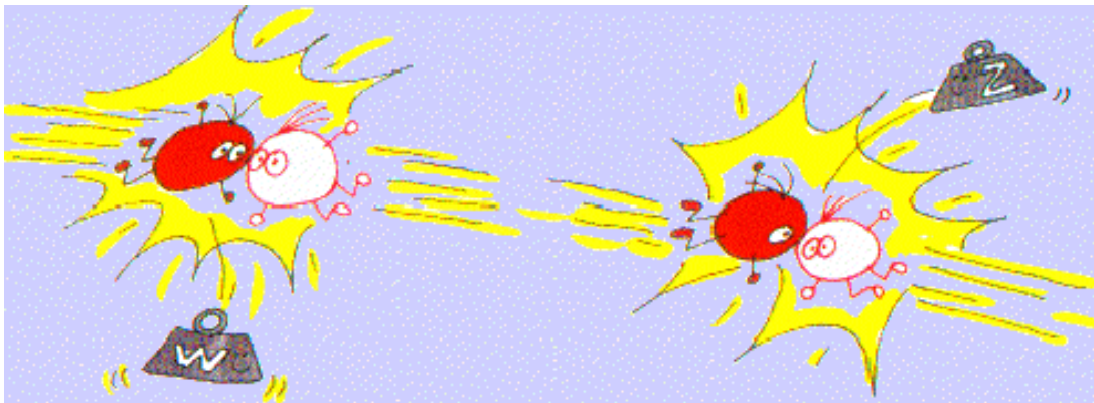
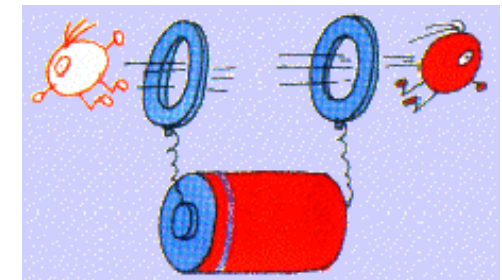
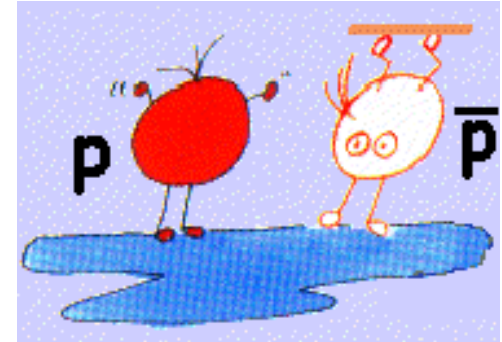
Ladung ...

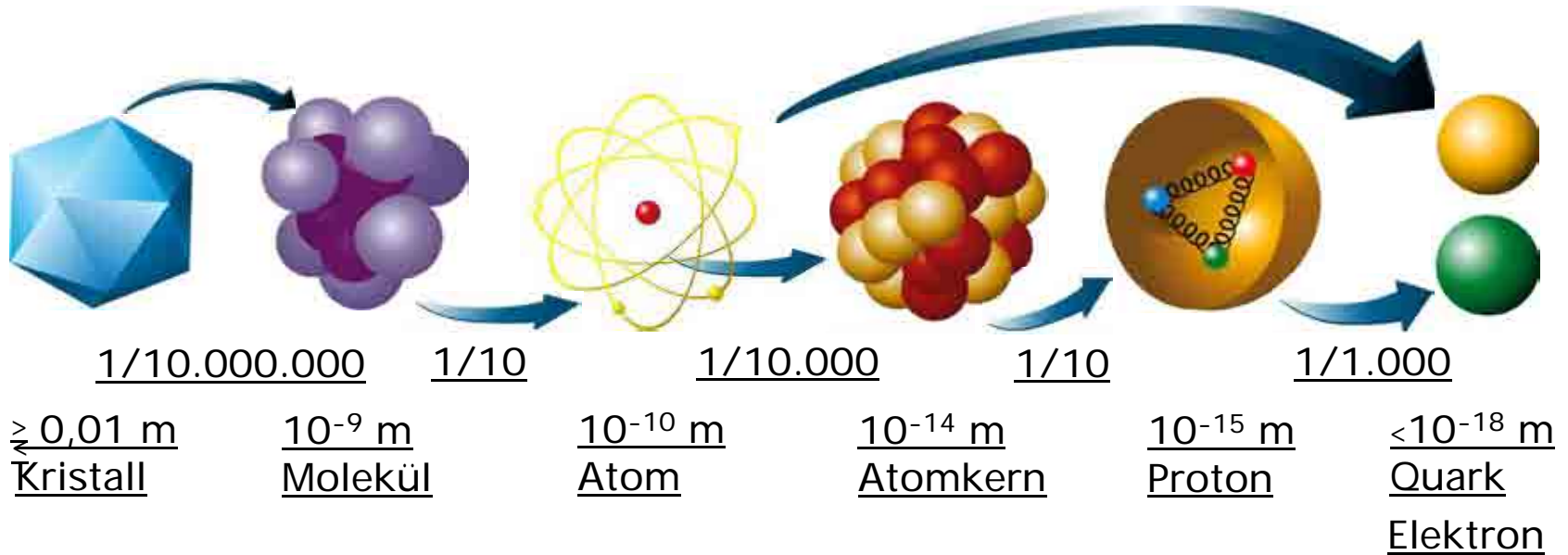
- ... ist **kein Stoff** !
- ... beschreibt die **Sensitivität** von Teilchen **bezüglich der jeweiligen Wechselwirkung**

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

- 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 („Energie“) **vernichten**





## 4 Fundamentale Bausteine der Materie (punktförmig)

- Zwei „Quarks“: zu Protonen und Neutronen gebunden

- Down: d (Q=  $-1/3$ ), Masse  $\sim 5 \text{ MeV}/c^2$
- Up: u (Q=  $+2/3$ ), Masse  $\sim 2 \text{ MeV}/c^2$

**Proton**



**Neutron**



1 fm

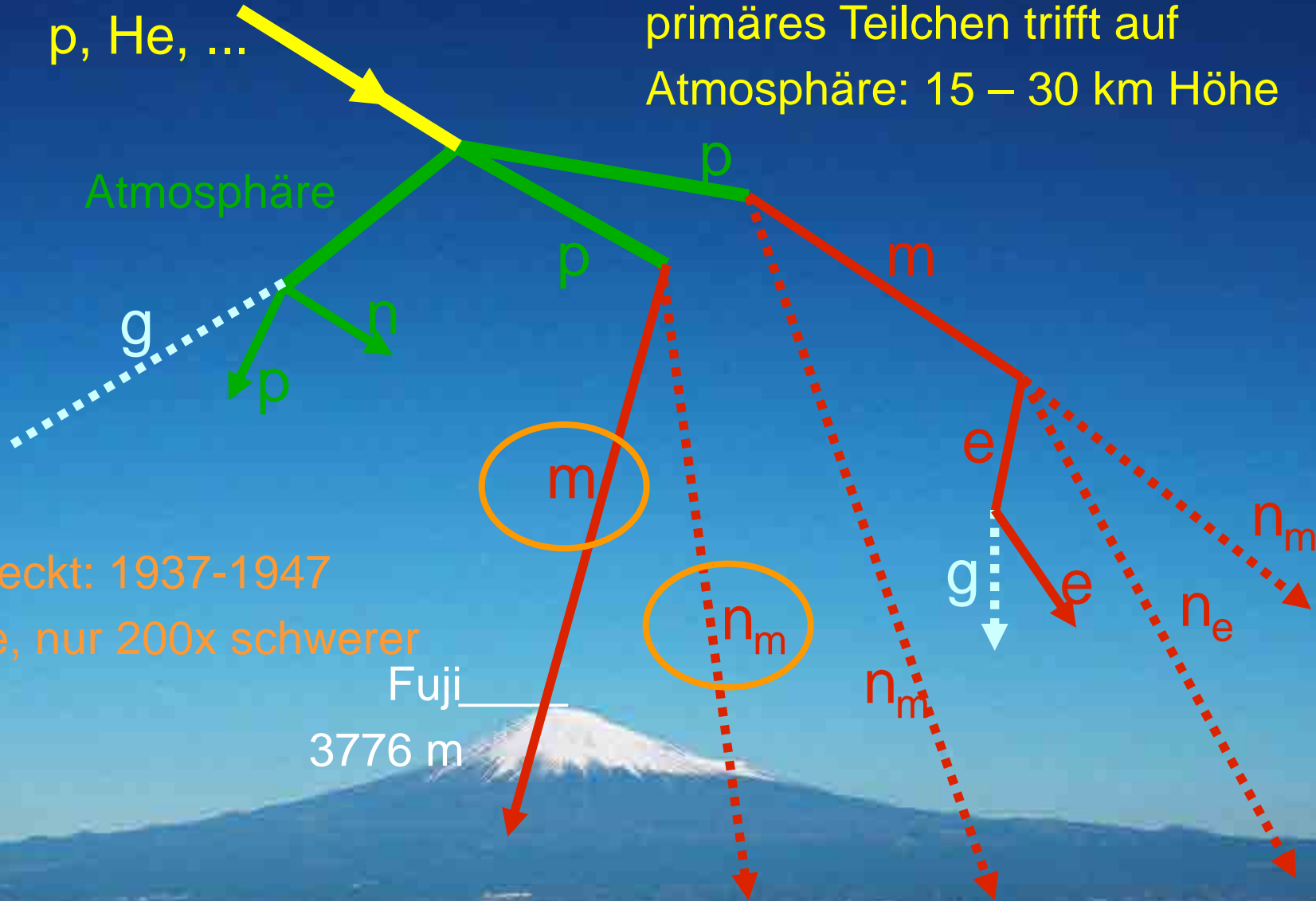
- Zwei „Leptonen“:

- Elektron e: (Q =  $-1$ ), Masse =  $0,5 \text{ MeV}/c^2$
- Neutrino n: (Q = 0), Masse  $\sim 0,000000003 - 0,00000003 \text{ MeV}/c^2$   
ungebunden, entsteht in Kernprozessen (Sonne, Radioakt.)



$p, He, \dots$

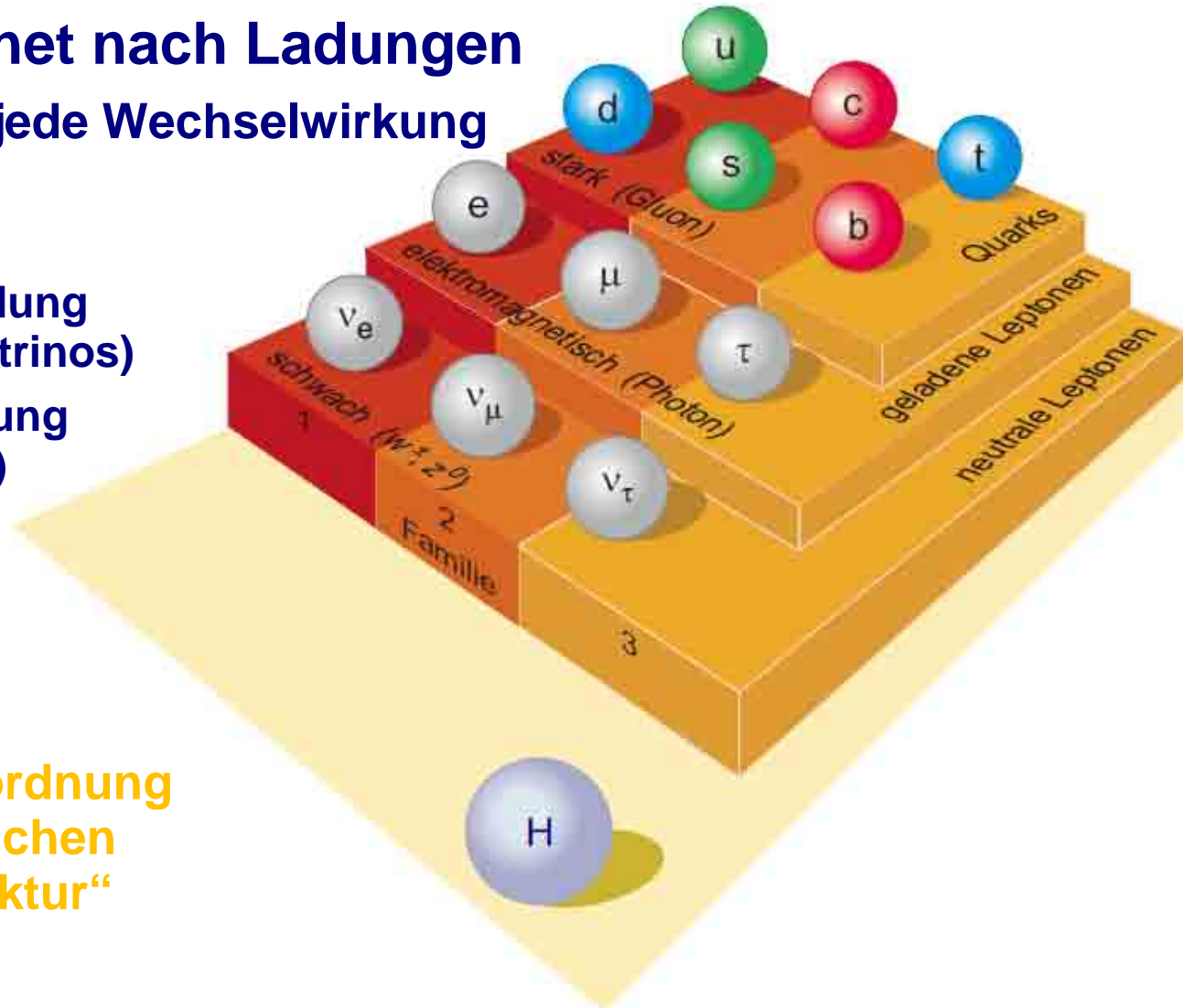
primäres Teilchen trifft auf Atmosphäre: 15 – 30 km Höhe



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

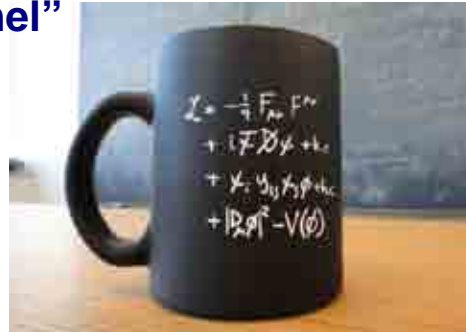
Fuji  
3776 m

- Bausteine geordnet nach Ladungen
  - Eine Ladung für jede Wechselwirkung
    - Starke Ladung (nur Quarks)
    - Elektrische Ladung (alle außer Neutrinos)
    - Schwache Ladung (alle Bausteine)

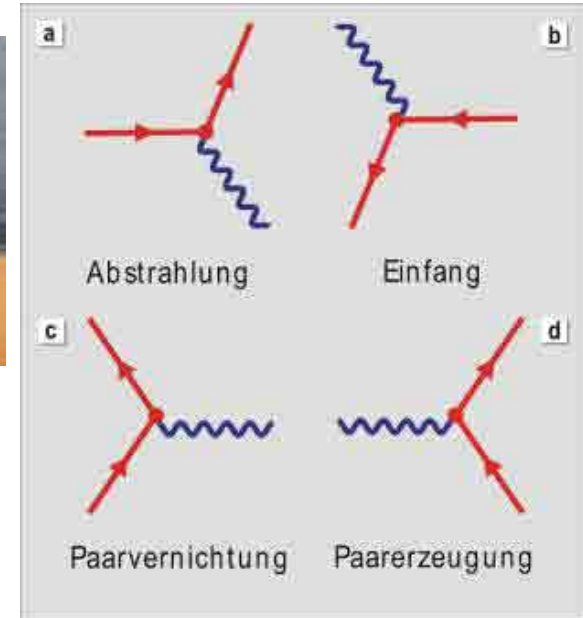
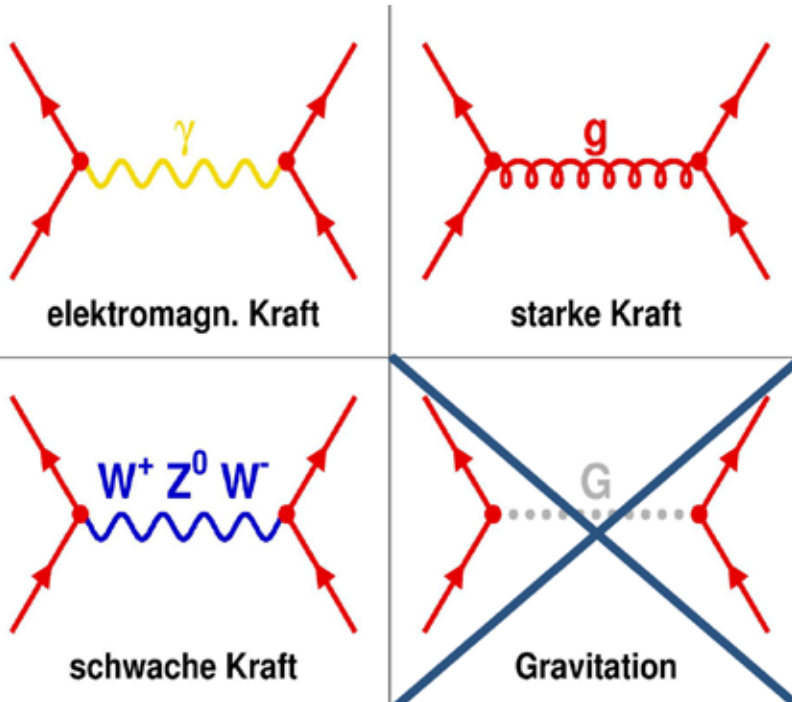


- Herkunft der Anordnung der Baustein-Teilchen in „Multipllettstruktur“ unverständlich!

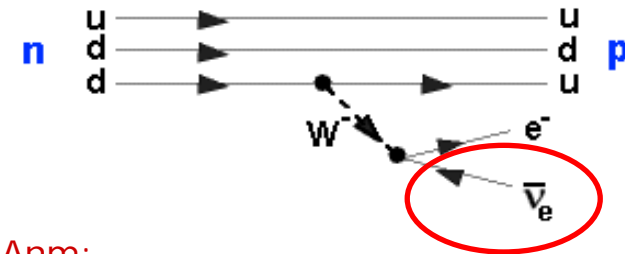
- Interpretation der "Weltformel" ergibt eindeutiges Set fundamentaler "Vertices"



- Alle Prozesse sind Kombinationen solcher Vertices



- 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 Beta-minus- oder Beta-pluszerfall mit Halbwertszeit von 1,28 Mrd. Jahren
- für den menschlichen Körper lebensnotwendig:
  - Regelt als Mineralstoff Wassergehalt in den Zellen
  - Wichtiger Elektrolyt der Körperflüssigkeit.
  - Ca jedes 9000ste Kaliumatom der ca. 100-150g Kalium in unserem Körper ist Kalium-40.



potassium.swf

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

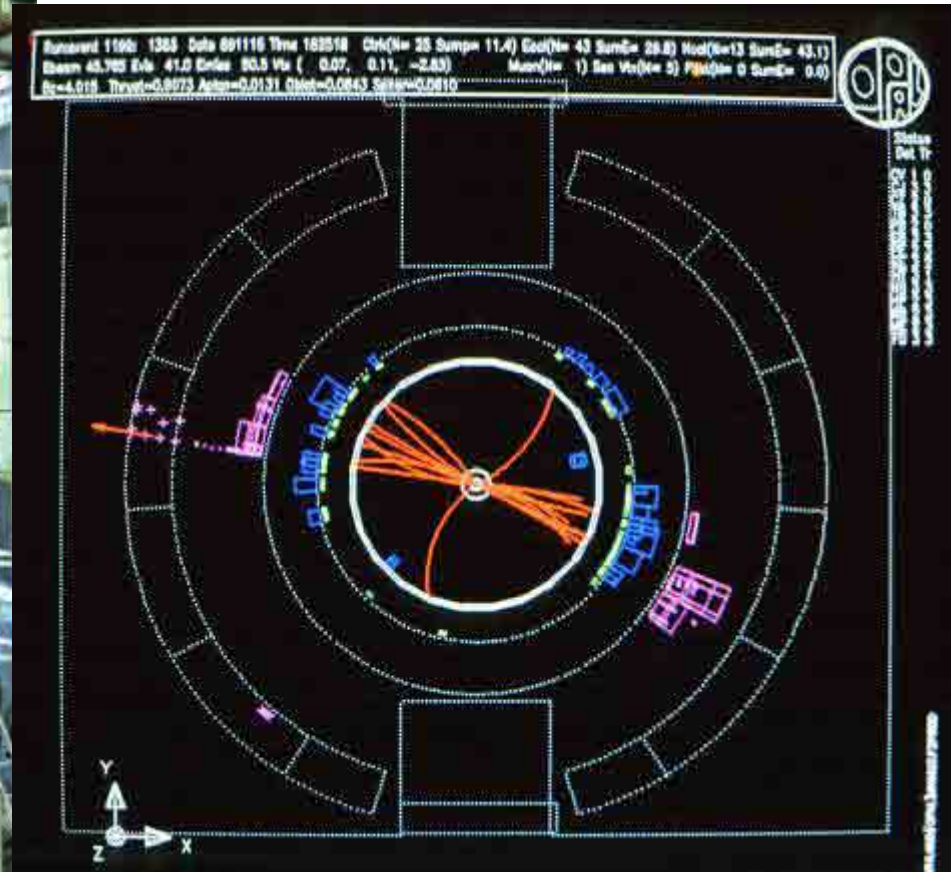
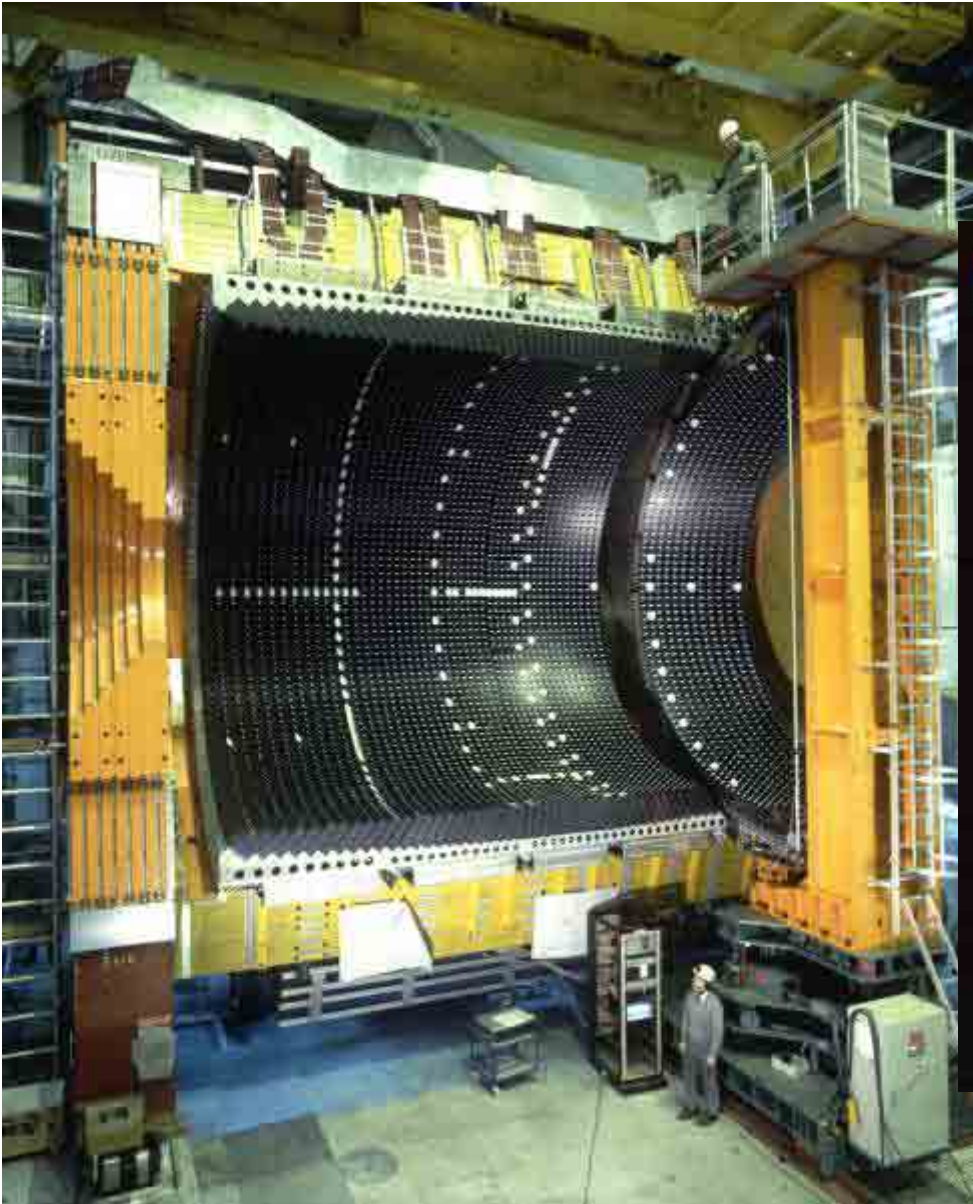


1. Beschleuniger und Detektoren am CERN
2. Warum Teilchenphysik?
3. Das Theoriegebäude: Standardmodell der Teilchenphysik
- 4. IDENTIFIKATION VON TEILCHEN UND EREIGNISSEN**
5. Teilchenmassen und Suche nach dem Higgs Teilchen

# Die Augen der Teilchenphysik: Detektoren



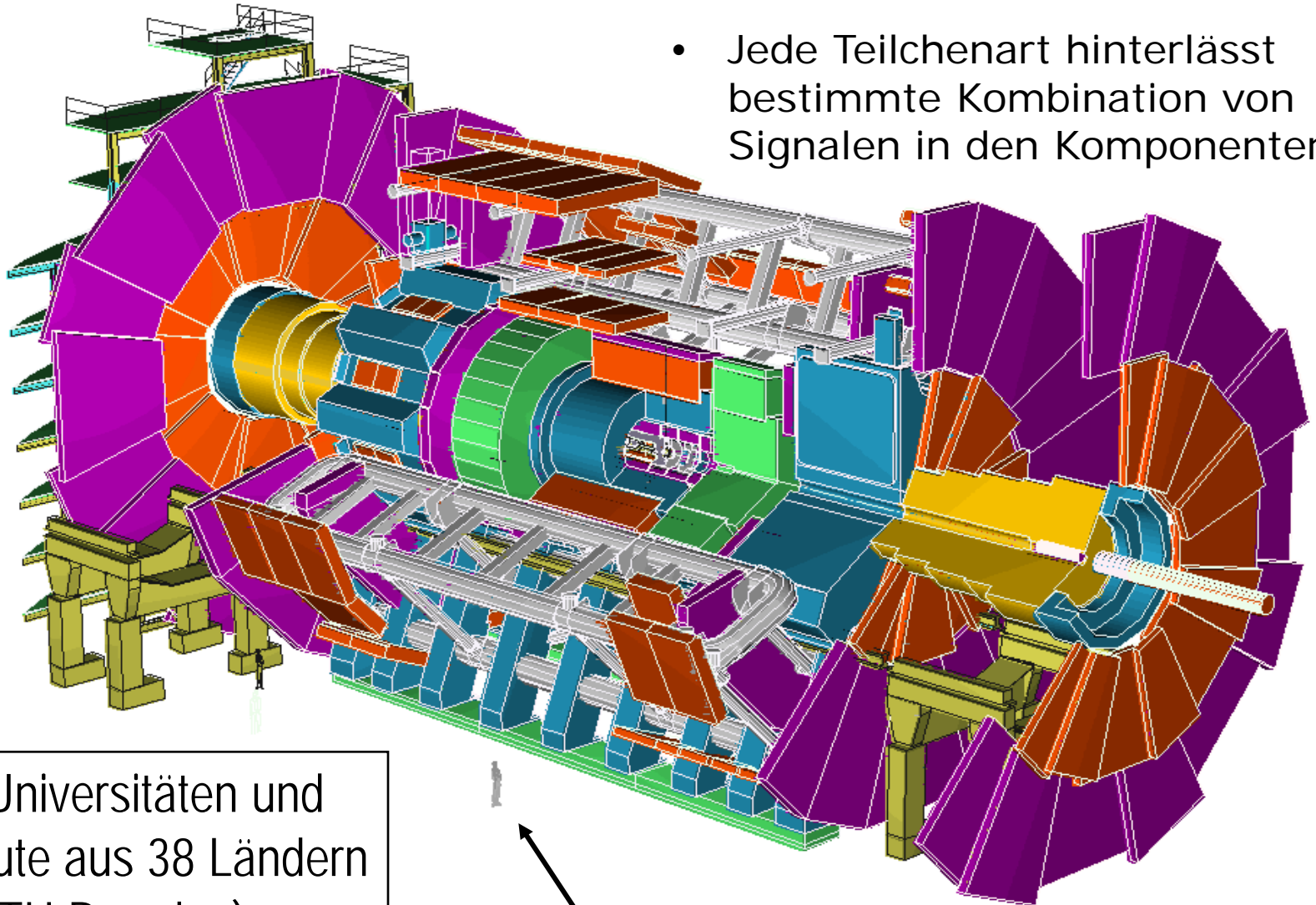
CERN, Genf,  
bis 2000



Elektronische Bilder

# heute : ATLAS Experiment, LHC

- Jede Teilchenart hinterlässt bestimmte Kombination von Signalen in den Komponenten



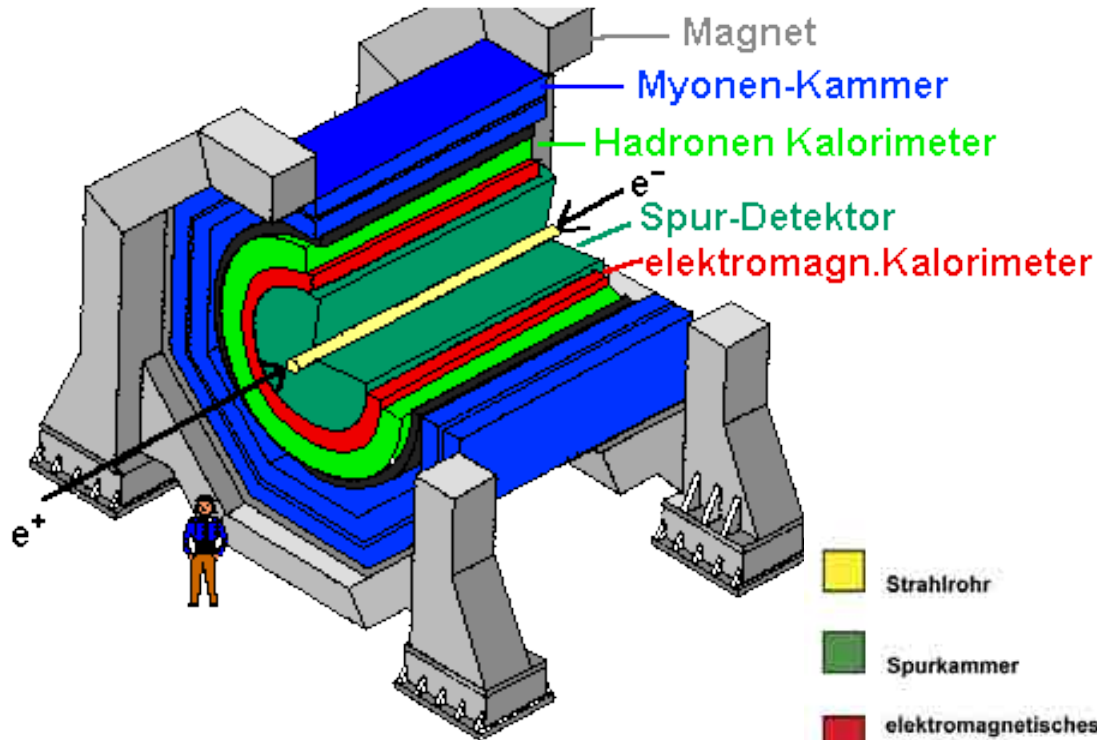
174 Universitäten und Institute aus 38 Ländern (u.a. TU Dresden)

Größenvergleich

- Zwiebelschalenartiger Aufbau verschiedener Komponenten



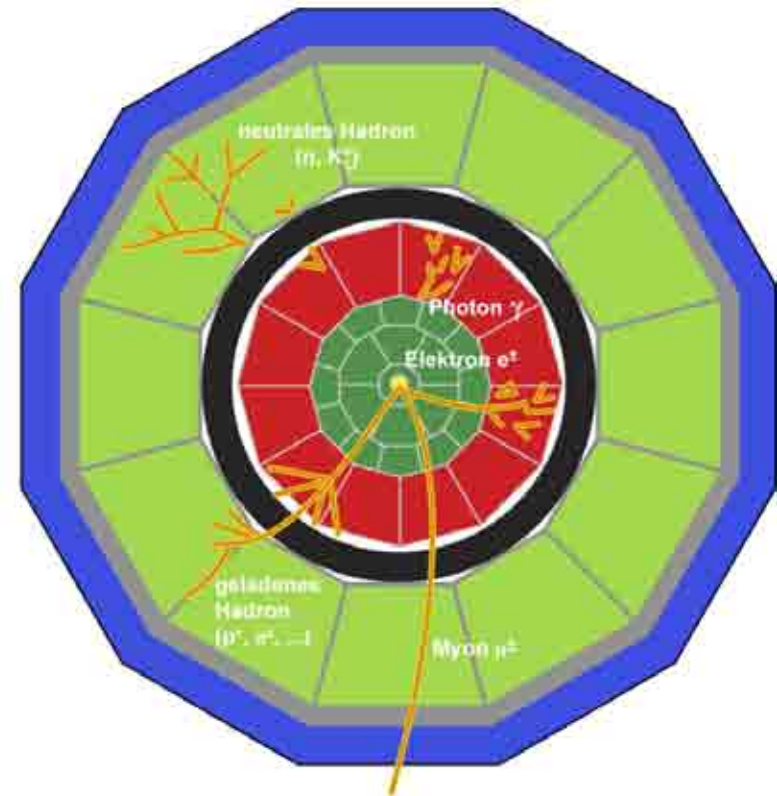
# Teilchenidentifikation



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

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

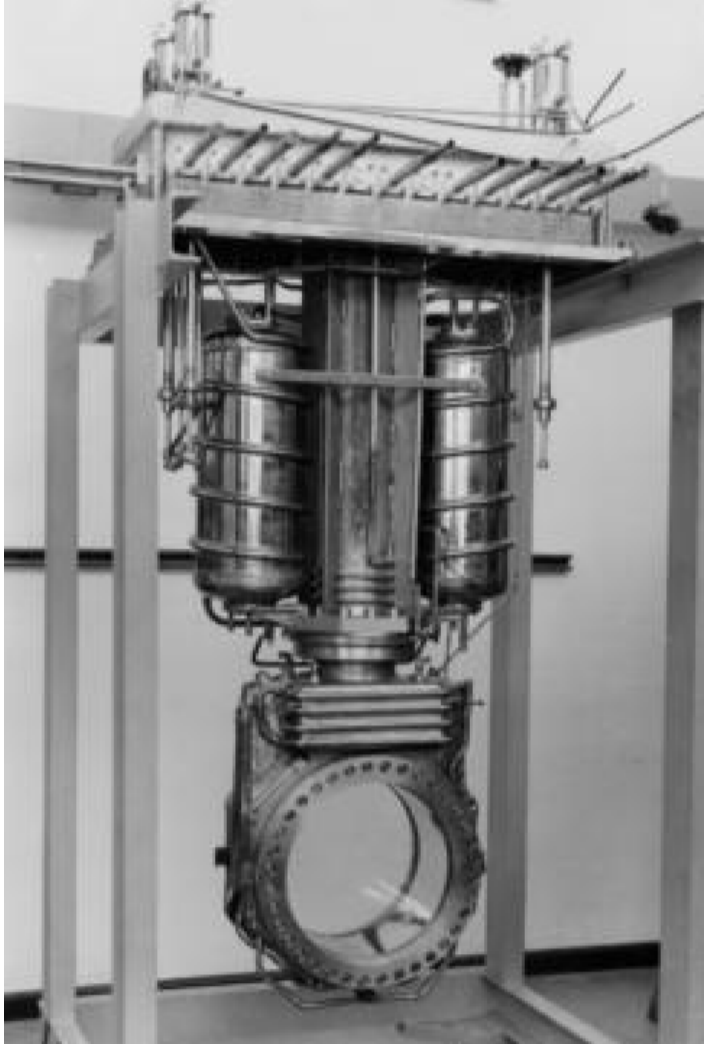
- Zwiebelschalenartiger Aufbau verschiedener Komponenten
- Jede Teilchenart hinterlässt bestimmte Kombination von Signalen in den Komponenten





# Innerste Lage: Spurdetektoren

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

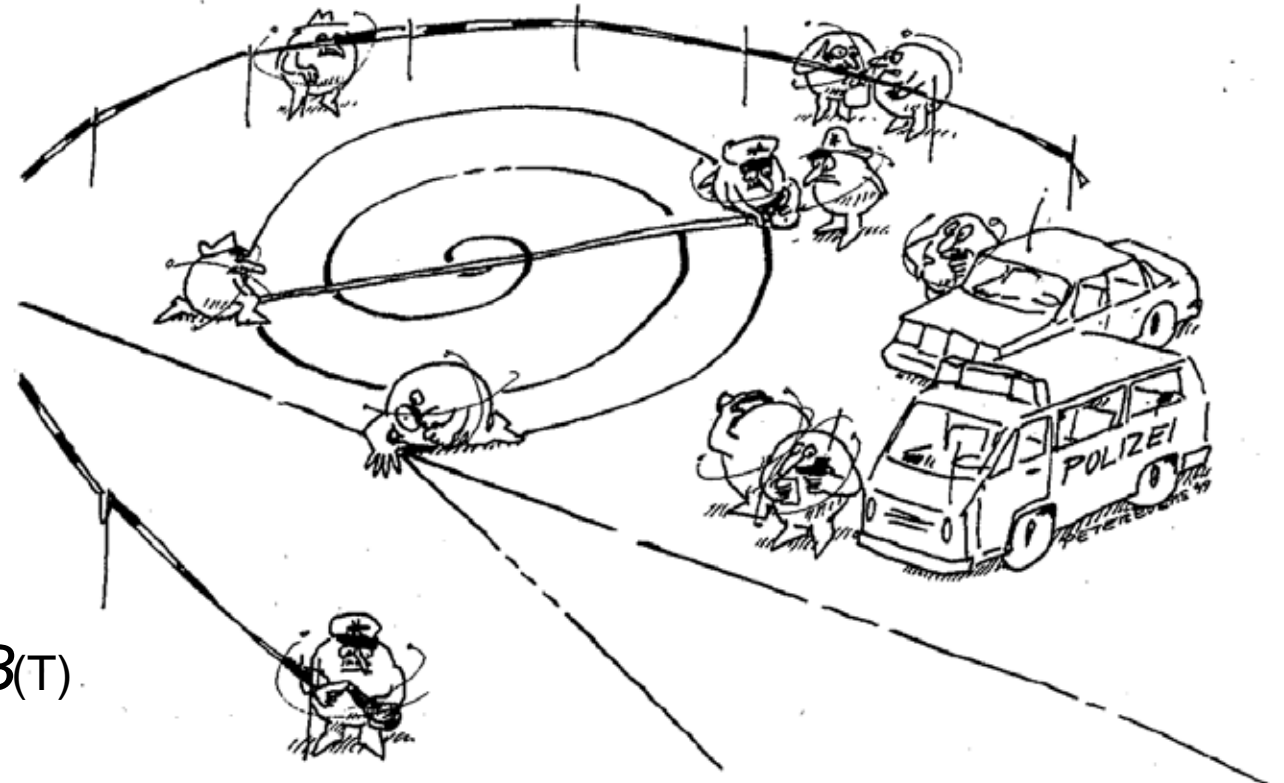


# Impulsrekonstruktion

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

$$p = Q e r B$$

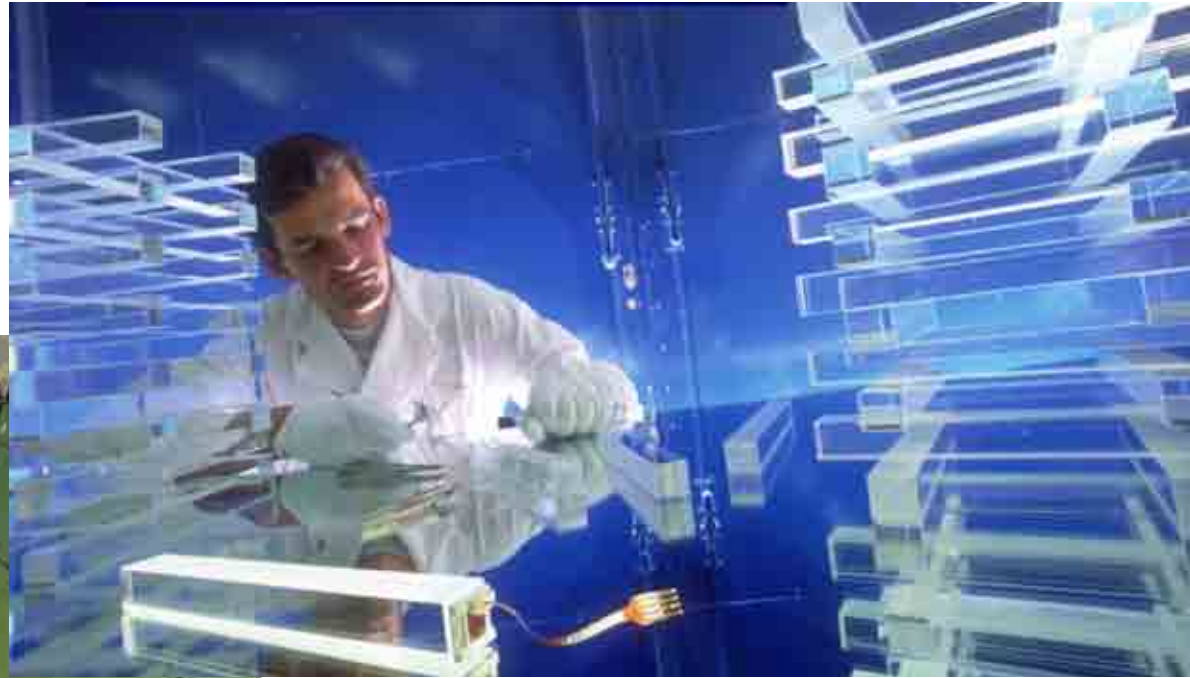
$$p(\text{GeV}) = 0.3 Q r(\text{m}) B(\text{T})$$



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

# Nächste Lage: Elektromagnetisches Kalorimeter

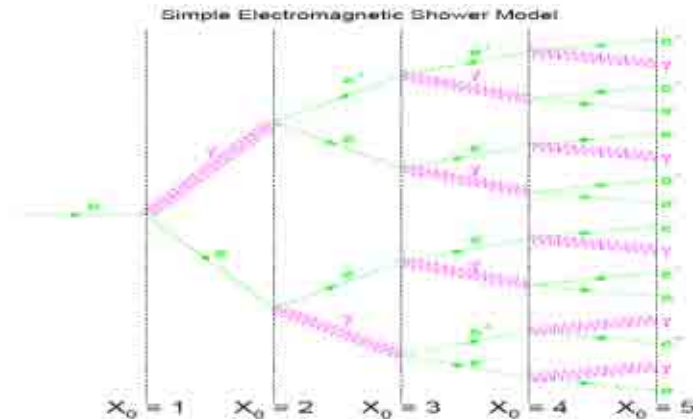
- CMS:  $\text{PbWO}_4$  Kristalle
- Hier deponieren e und g ihre gesamte Energie



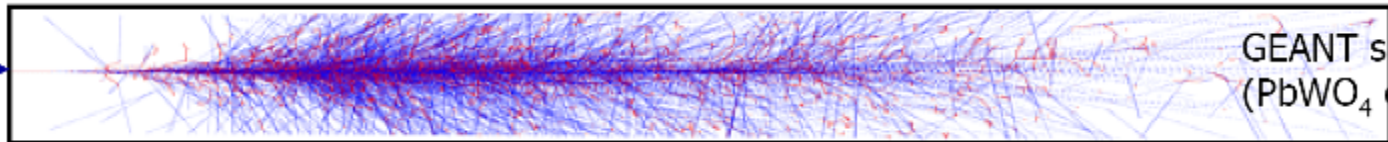
107

Wolfgang Funk - CERN CMS

8



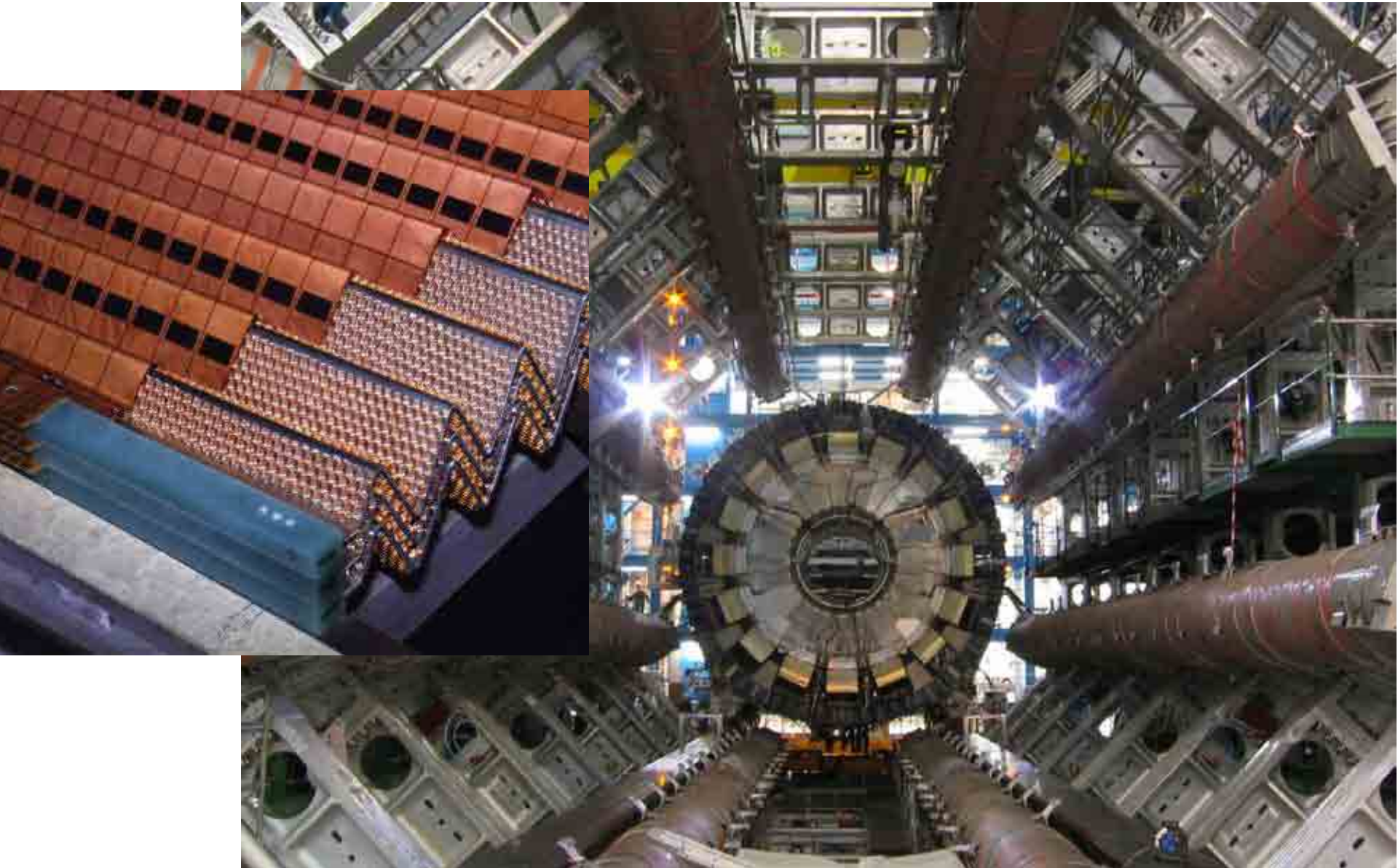
e



GEANT shower  
( $\text{PbWO}_4$  crystal)



- Das ATLAS Flüssig-Argon Calorimeter: "Akkordeon"

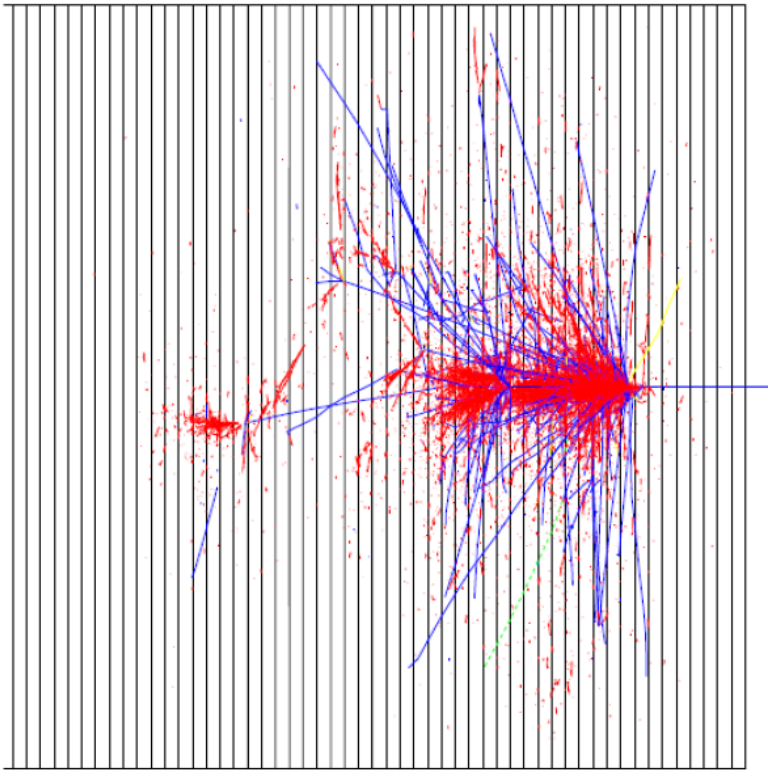




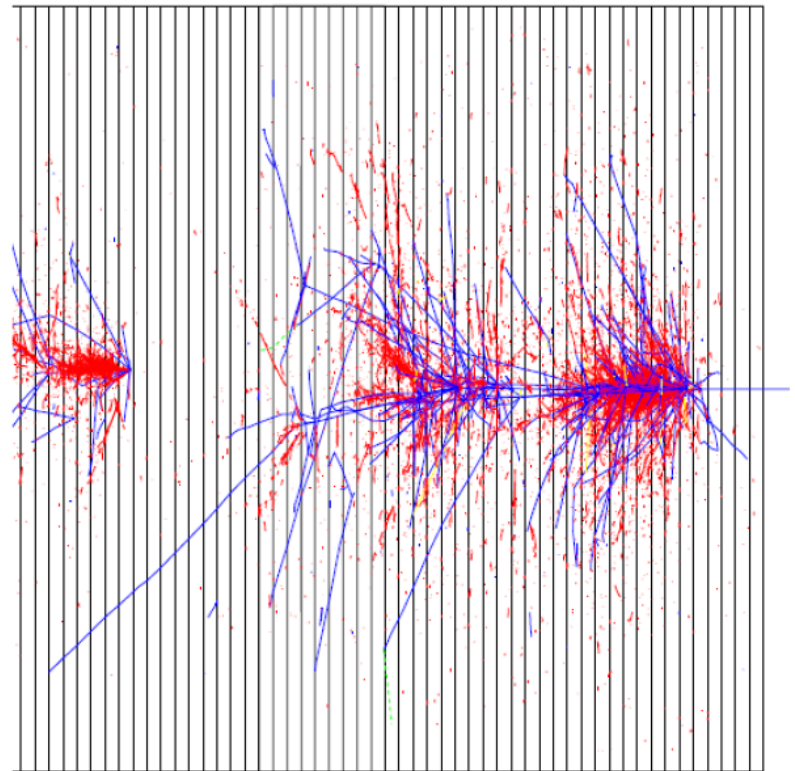
# Nächste Lage: Hadronische Kalorimeter

- Spätestens hier wechselwirken Teilchen, die aus Quarks aufgebaut sind (“Hadronen”) , wie Protonen, Neutronen, Pionen, ...
- Hadronische Schauer sind wesentlich unregelmäßiger als reine elektromagnetische Schauer

1.

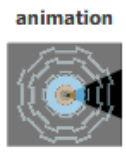


2.

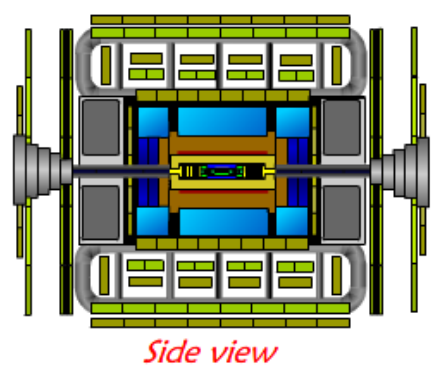
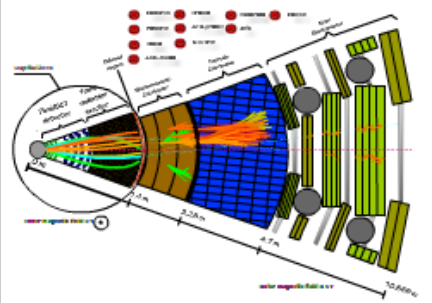
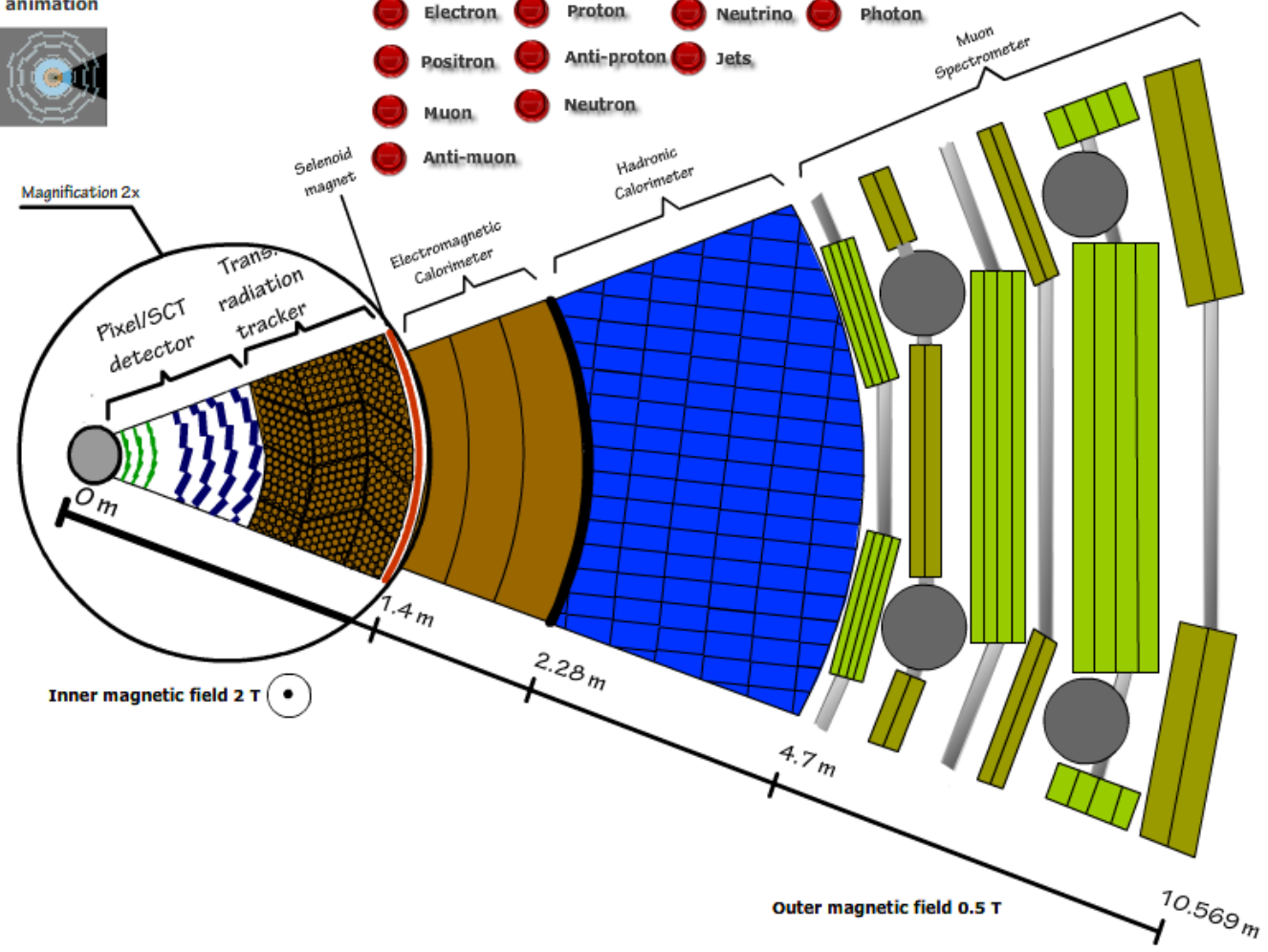


red - e.m. component  
blue - charged hadrons

# ATLAS



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



Created by Jeřábek, Jende 2010



Atlas\_9.swf

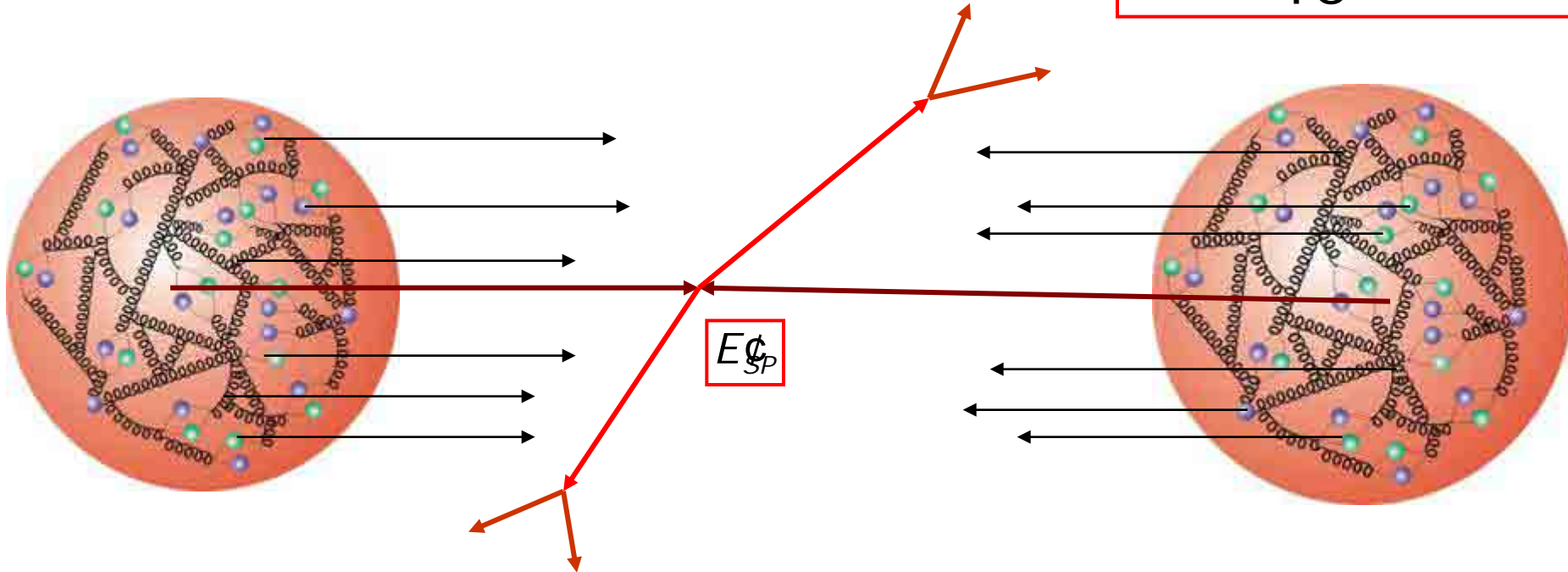
[https://kjende.web.cern.ch/kjende/de/wpath\\_teilchenid1.htm](https://kjende.web.cern.ch/kjende/de/wpath_teilchenid1.htm)

# Was kollidiert da eigentlich?

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

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

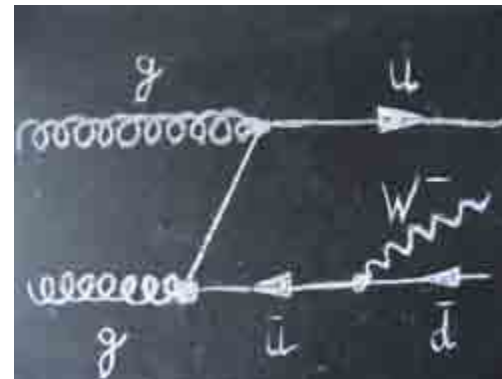
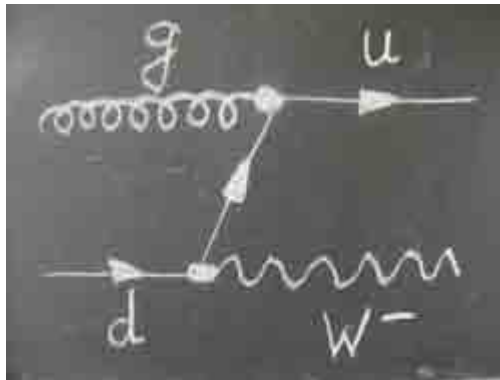
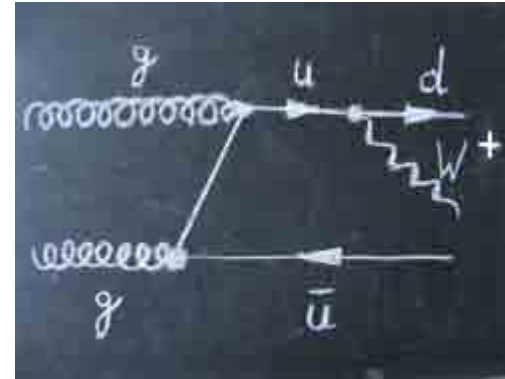
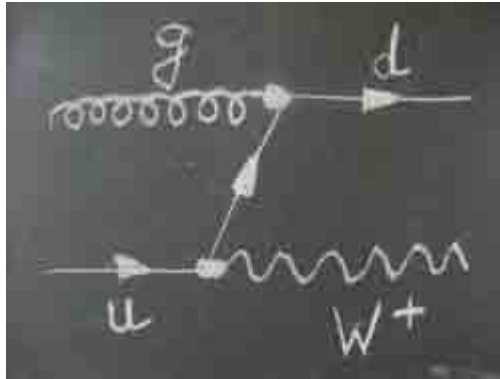
$$E_{SP} \gg \frac{1}{10} E_{SP}(pp)$$



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

# Mögliche Herstellung des Wam LHC

- Entweder durch Gluon-Quark oder Gluon-Gluon



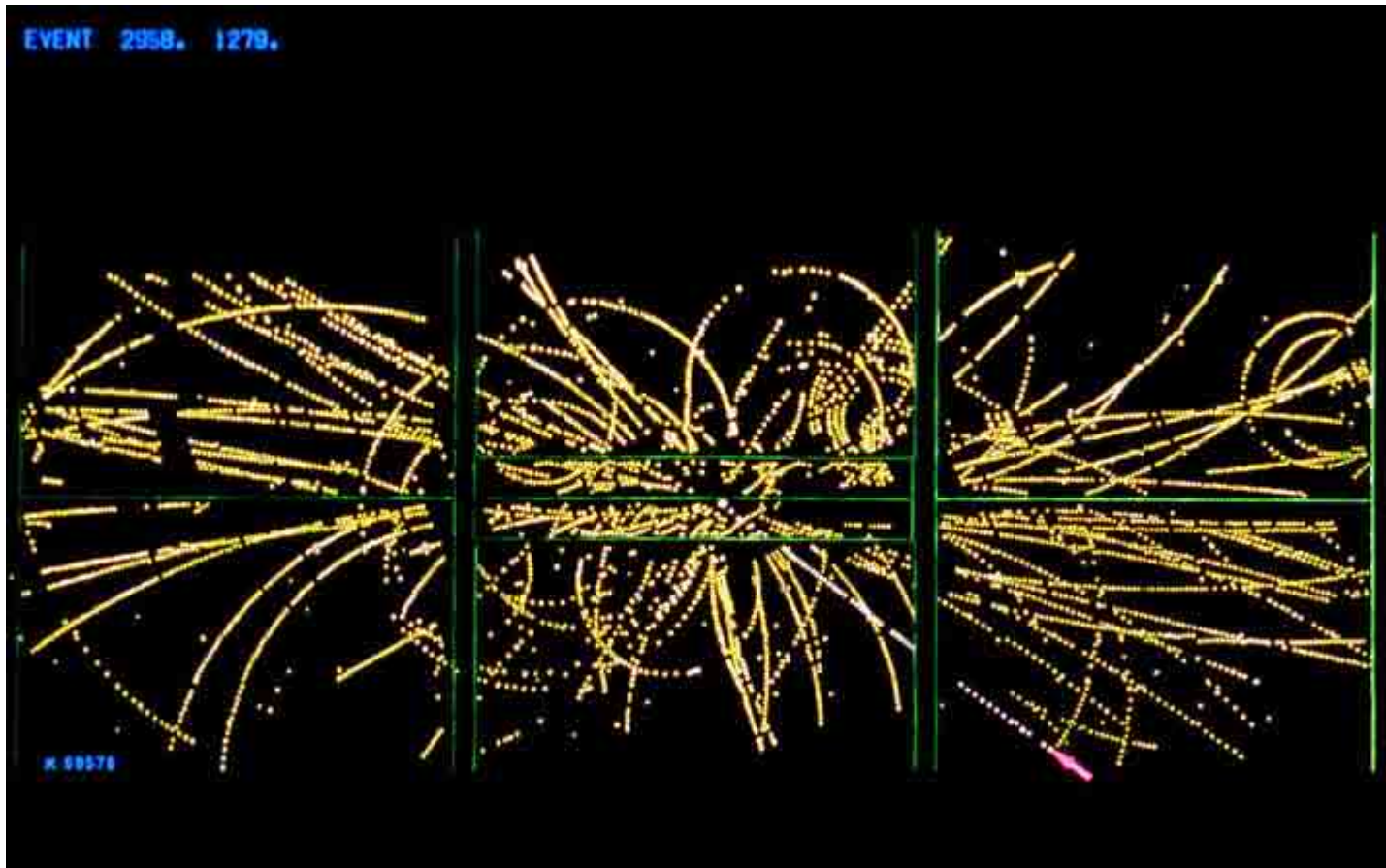
- Auslaufende Quarks binden sich zu neuen Teilchen  
à Bündel von Hadronen („Jets“)

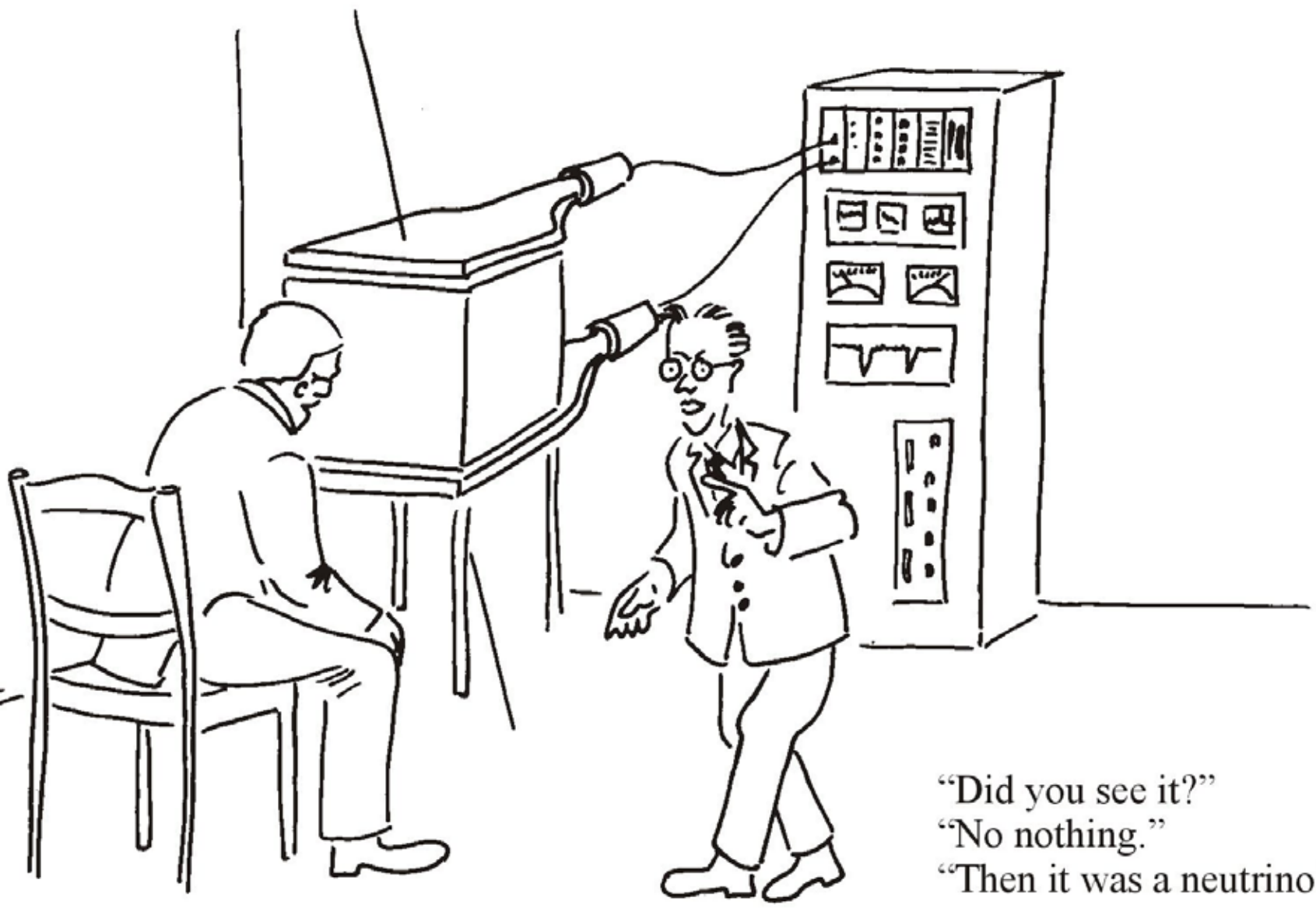


# Historische Entdeckung des W

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



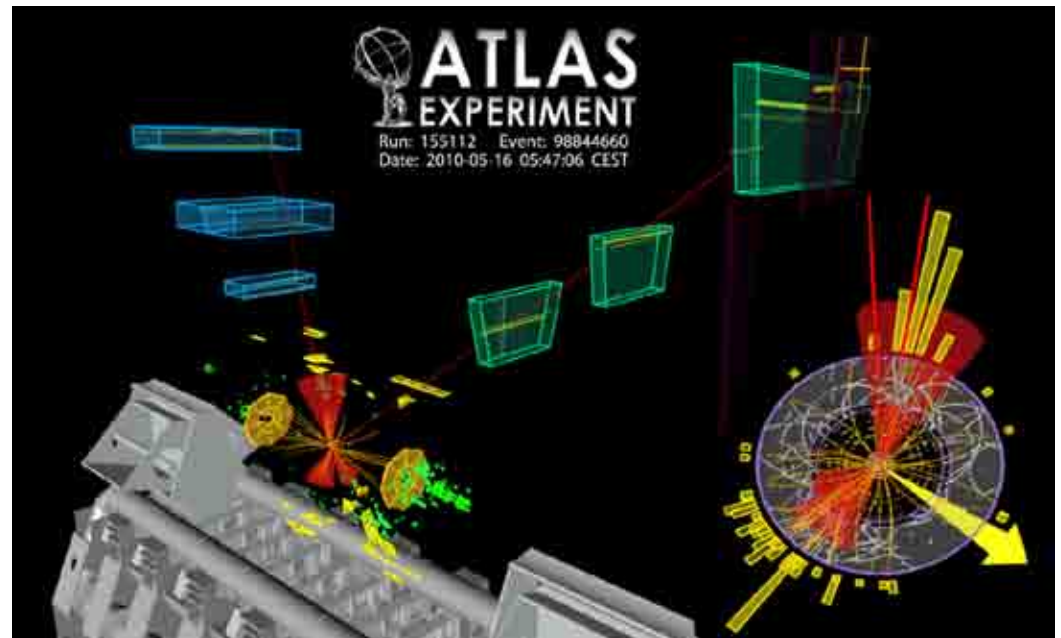
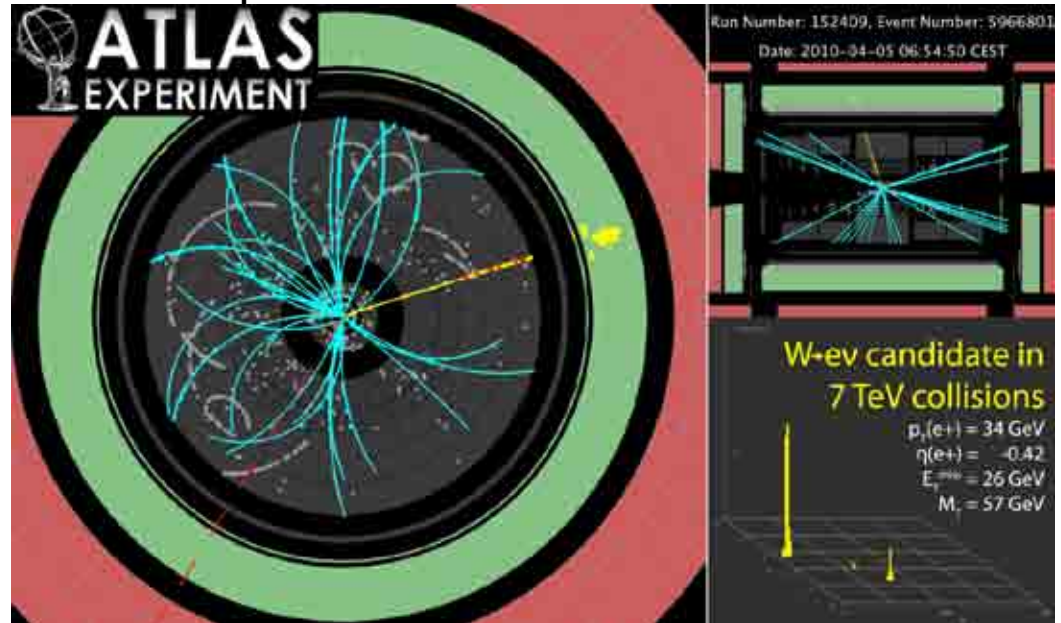
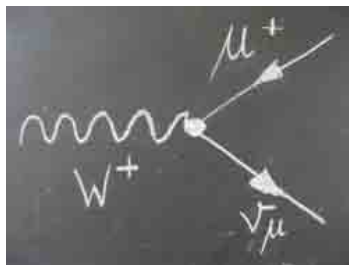
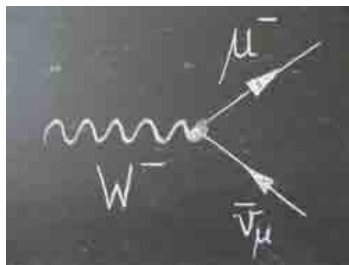
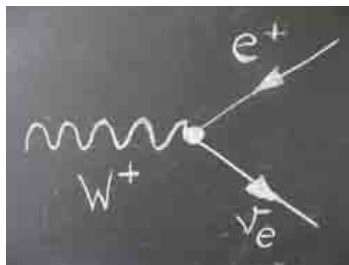
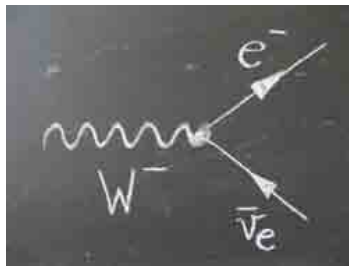


C. G. Grier

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

# Signaturen des W-Teilchens

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



1. Beschleuniger und Detektoren am CERN
2. Warum Teilchenphysik?
3. Das Theoriegebäude: Standardmodell der Teilchenphysik
4. Identifikation von Teilchen und Ereignissen
- 5. TEILCHENMASSEN UND SUCHE NACH DEM HIGGS TEILCHEN**



✓ ...decken 14(!) Größenordnungen ab

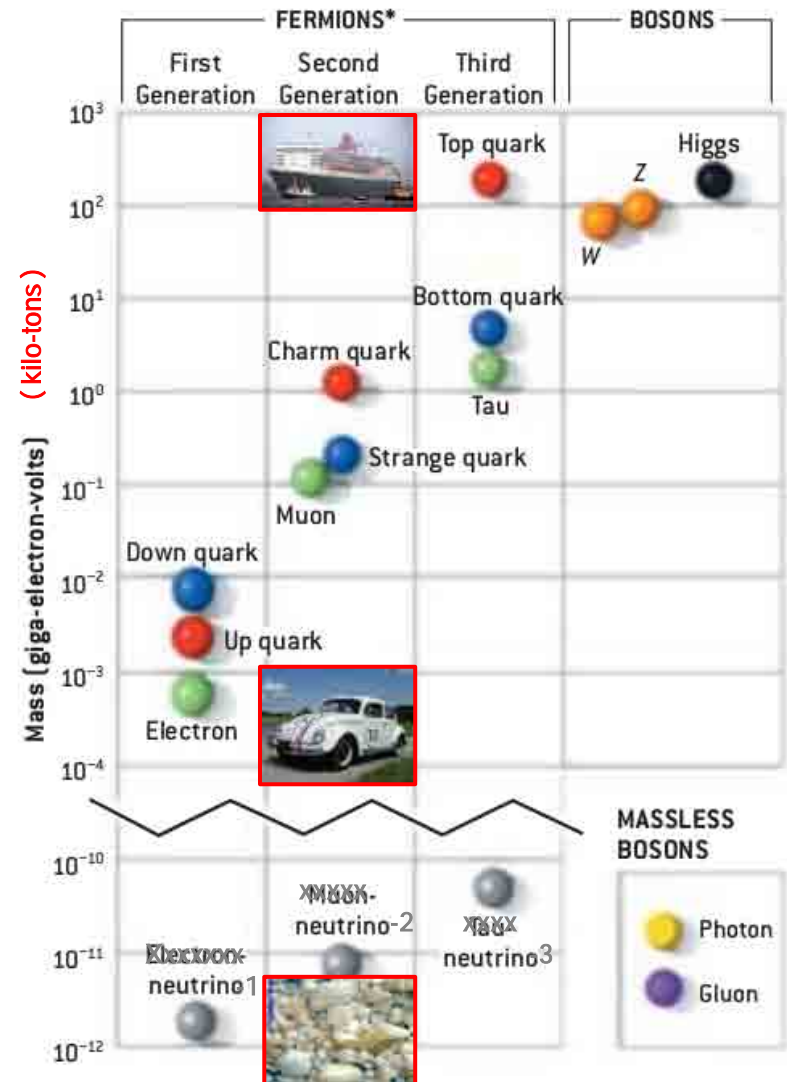
- n ~ Sandkorn
- e ~ Auto
- t ~ Ozeandampfer

✓ ... ist eine Eigenschaft der Teilchen und nicht eine Frage der Größe (alle „gleich groß“ = ohne Unterstruktur !)

✓ ... ergibt charakteristische Muster

- bzgl. Teilchen-Generationen
- bzgl. leichter Neutrinos ( $\sim 10^{10}$  leichter als ihre Partner)

✓ Offene Frage: Warum?



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

- ✓ Einfluss auf Größen- und Energieskala der Atome (Moleküle, Festkörper, Lebewesen, ...)
- ✓ Beispiel: Elektronmasse regiert atomare Energien und Radien zusammen mit Stärkeparameter  $a_{em} = \frac{1}{137,0359991}$  der Wechselwirkung

- 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  $1 / m_e$

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



View Online: <http://www.tricklabor.com/de/portfolio/was-waere-wenn>

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

- ✓ Massen von Elementarteilchen bestimmen den Ablauf der Kosmologie
- ✓ **Symmetrien des Standardmodells erfordern, dass alle Teilchen masselos sind !**
- ✓ Wissenschaftler müssen zunächst verstehen, wodurch Masse entsteht, um danach zu versuchen, die Werte der Massen zu verstehen

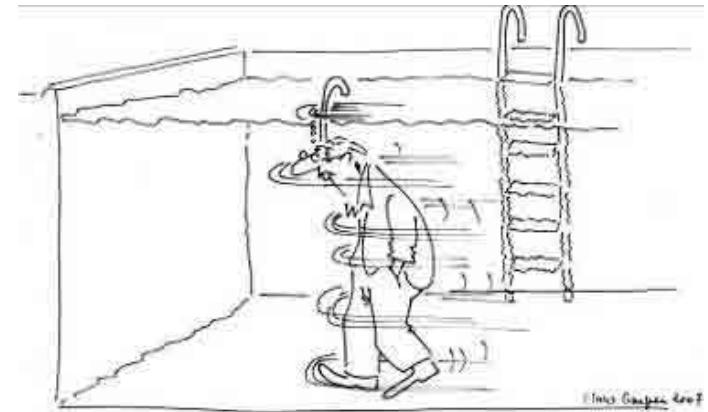
✓ “Leeres” Vakuum (ohne Hintergrundfeld)

- alle Teilchen sind masselos
- Bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit



✓ Mit Hintergrundfeld

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



✓ Higgs-Teilchen

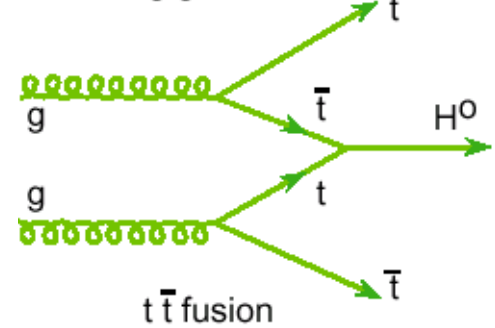
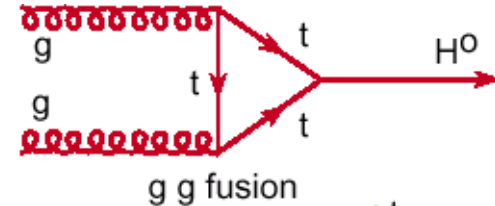
- Quantenmechanische Anregung des Hintergrundfeldes
- **Notwendige Konsequenz des Konzepts!**





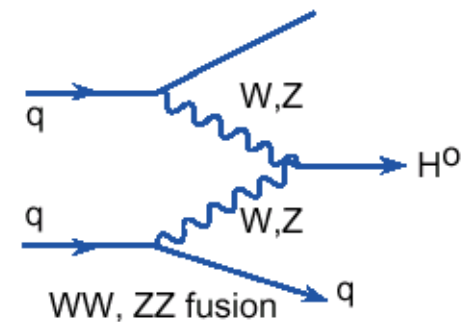
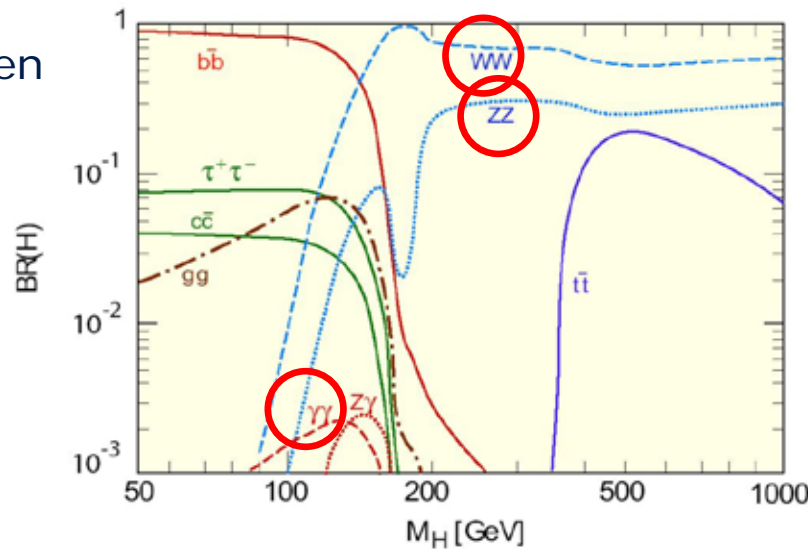
## ✓ Entdecke Hintergrundfeld d. Higgs-Boson Erzeugung

- Higgs Boson ~ Anregung des Hintergrundfelds (wie Wirbel ~ Anregung der Luft)
- Schwere Teilchen mit hoher Energie erzeugen Anregung = Higgs-Teilchen im Hintergrundfeld



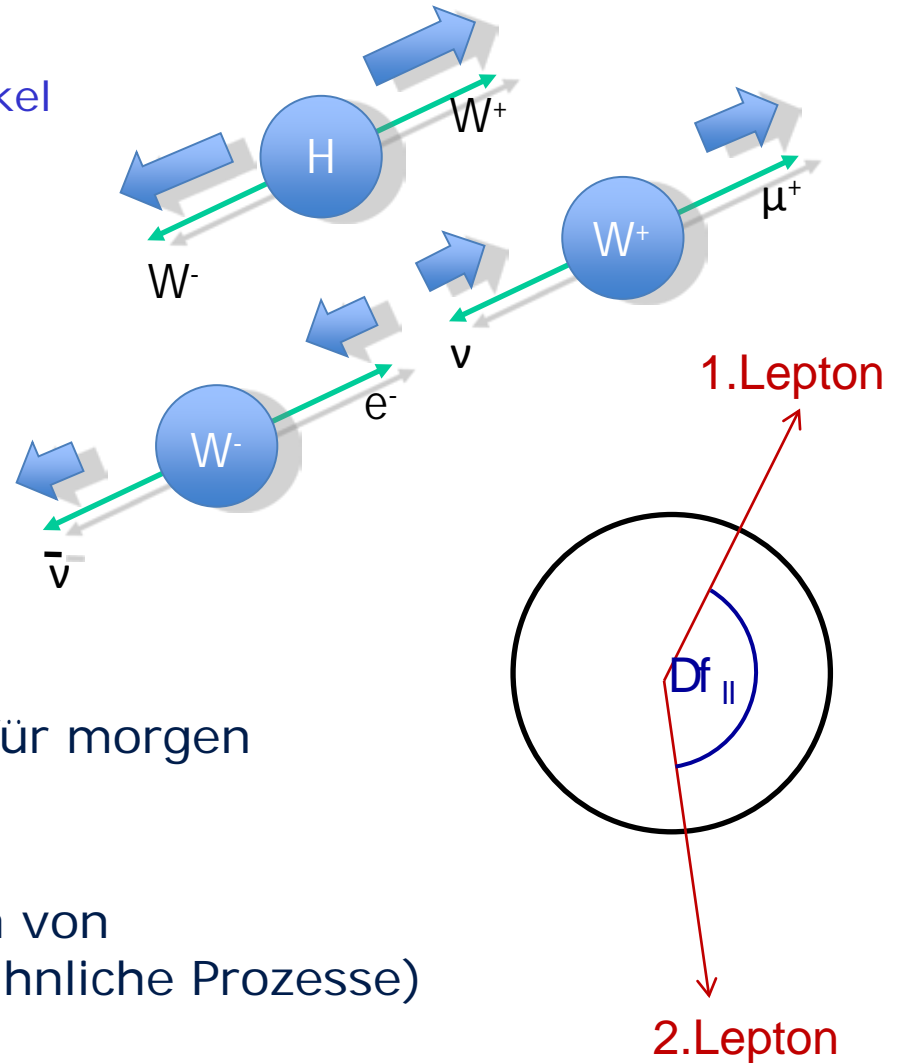
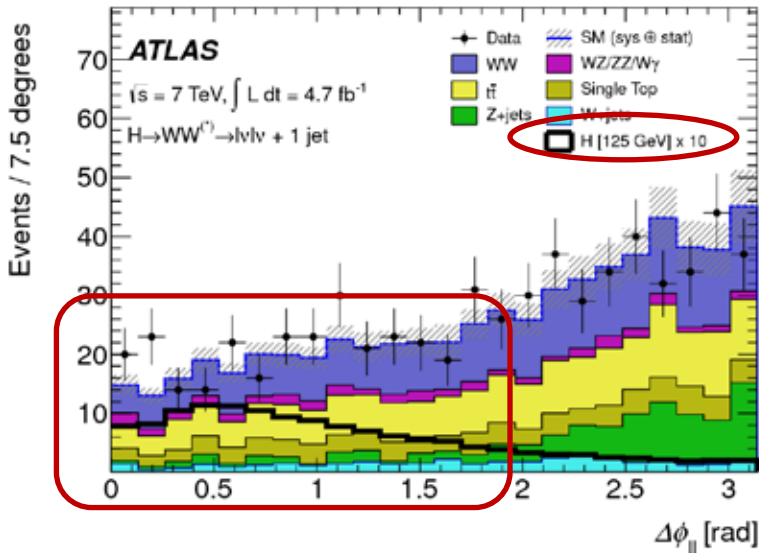
## ✓ Higgs Boson Zerfälle vorhersagbar

- Viele Möglichkeiten
- Vorhergesagte Häufigkeit nur abhängig von (bisher) unbekanntem  $M_H$



✓ Drehimpulsbetrachtungen:

- Leptonen aus H → W<sup>+</sup>W<sup>-</sup> Zerfall bevorzugen kleine DF Öffnungswinkel



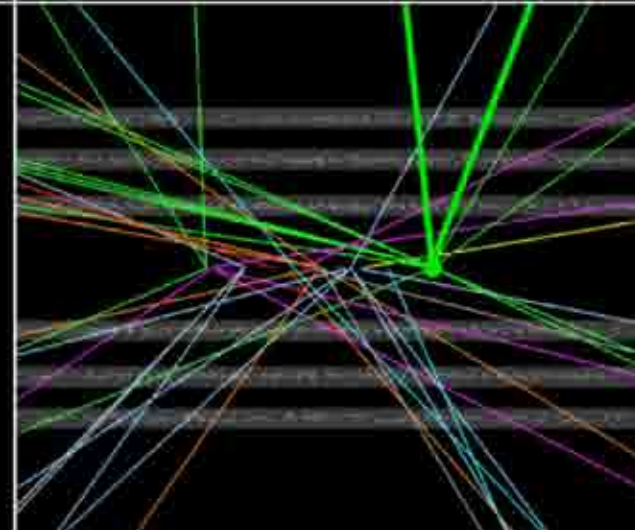
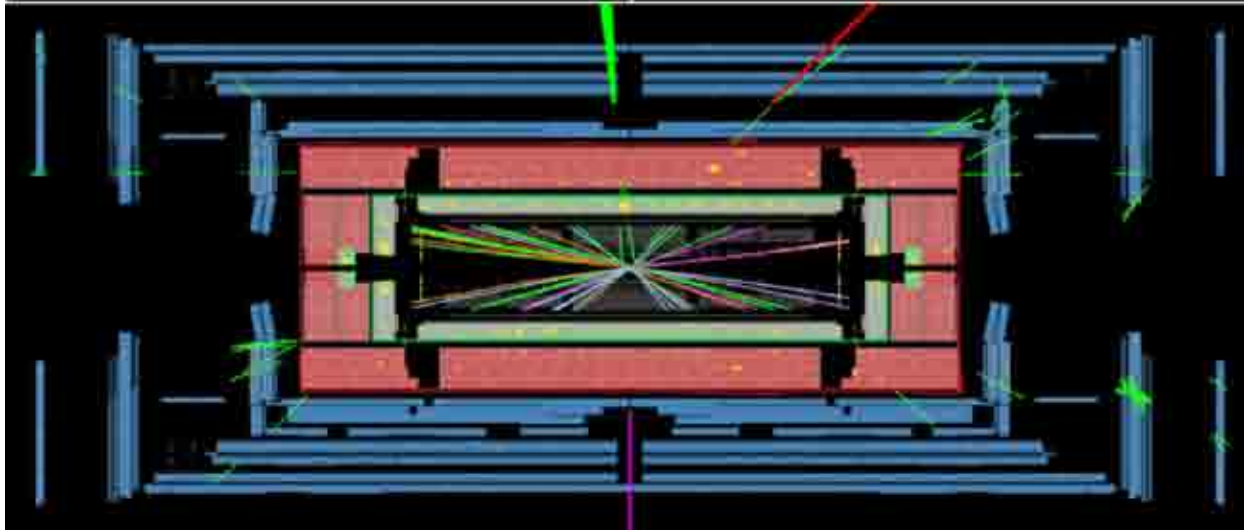
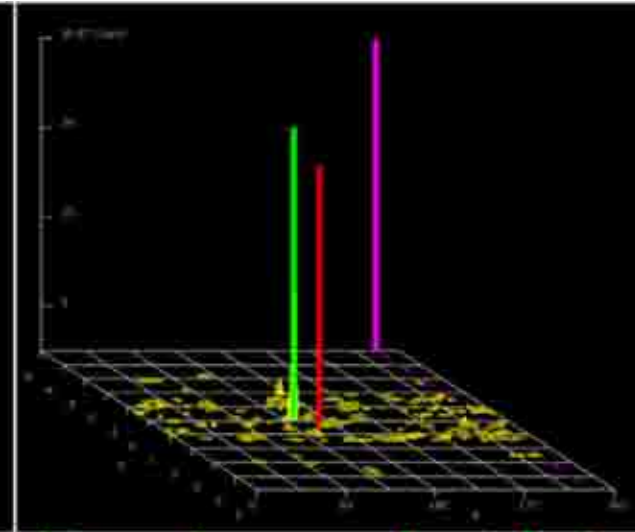
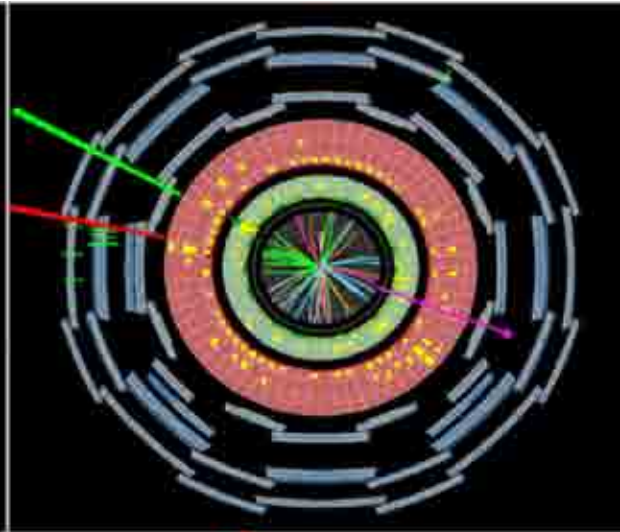
✓ Zweite (wählbare) Messaufgabe für morgen  
 → Finden Sie solche Ereignisse und messen Sie die Winkel

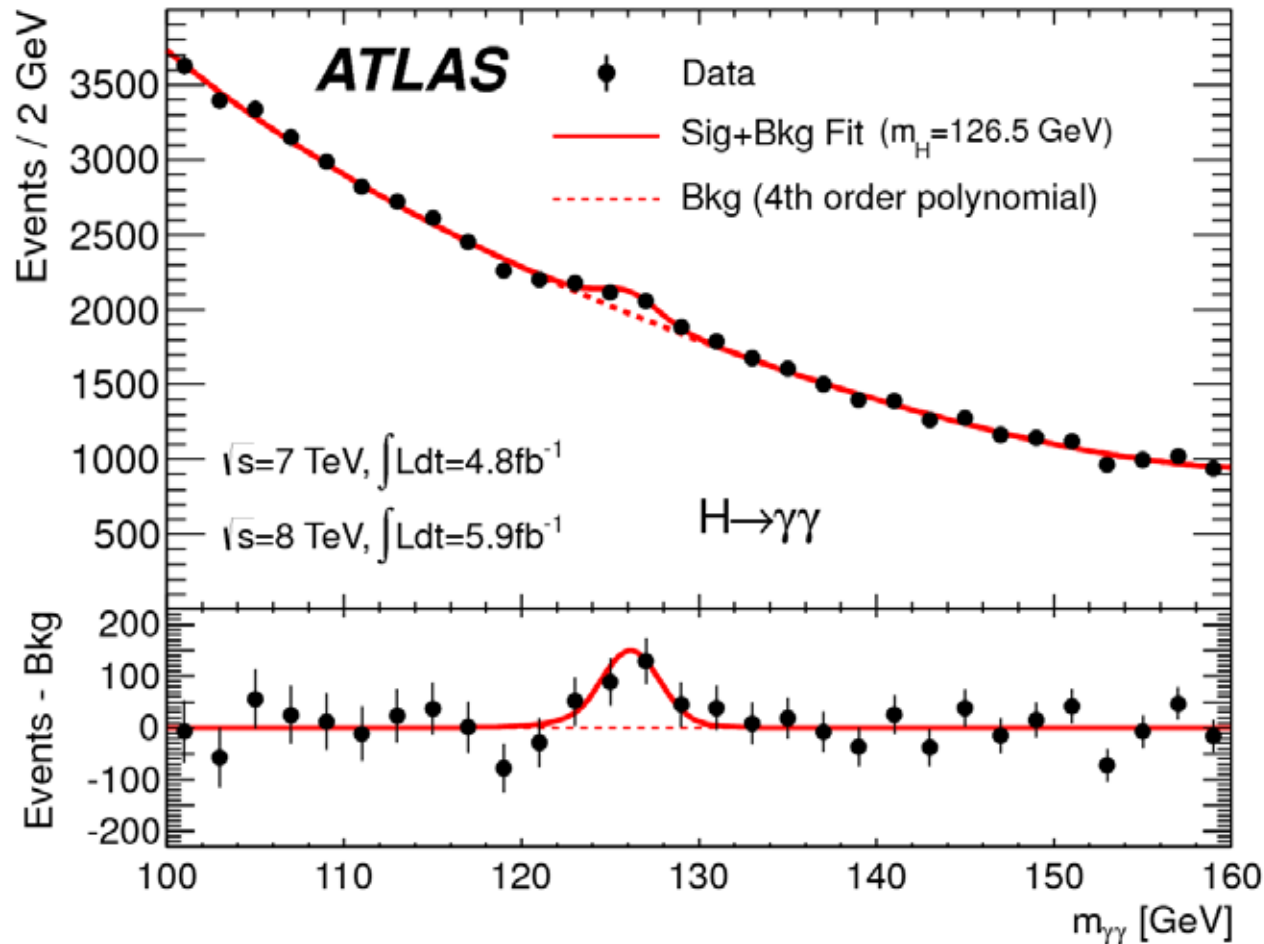
✓ In jedem Fall immer Kombination von Signal (Higgs) und Untergrund (ähnliche Prozesse)



# ATLAS EXPERIMENT

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







# Impressionen vom CERN Seminar (4.Juli 2012)



*There's a collider under Geneva  
 Reaching new energies that we've never achieved before  
 Finally we can see with this machine  
 A brand new data peak at 125 GeV  
 See how gluons and vector bosons fuse  
 Muons and gamma rays emerge from something new  
 There's a collider under Geneva  
 Making one particle that we've never seen before*

*The complex scalar  
 Elusive boson  
 Escaped detection by the LEP and Tevatron  
 The complex scalar  
 What is its purpose?  
 It's got me thinking*

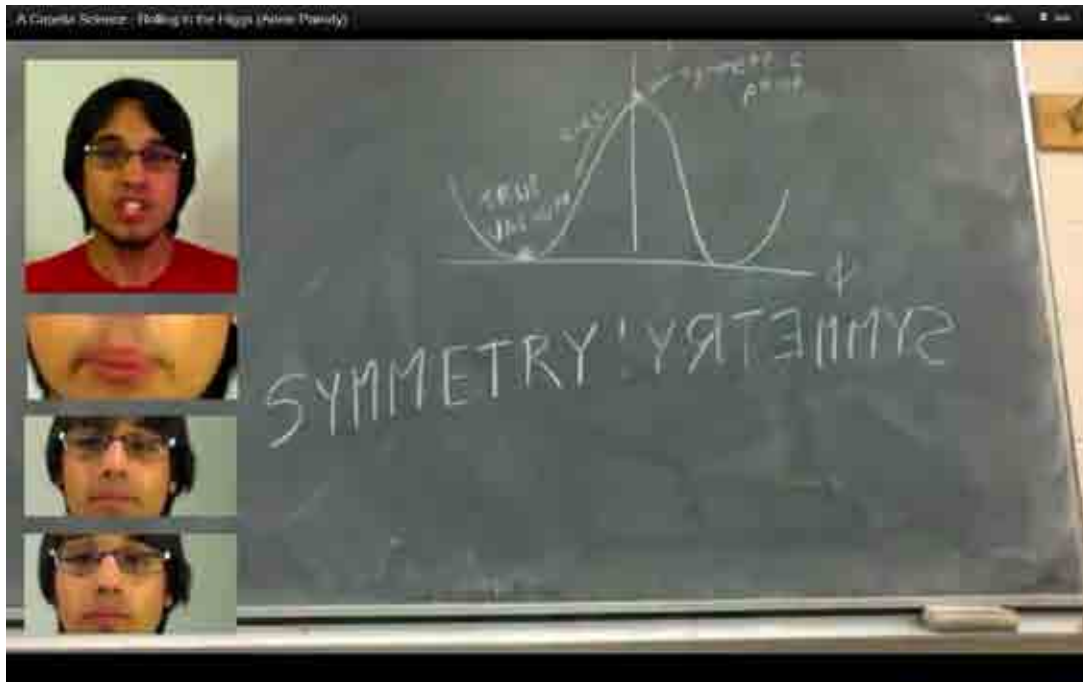
*Chorus:  
 We could have had a model (Particle breakthrough, at the LHC)  
 Without a scalar field (5-sigma result, could it be the Higgs)  
 But symmetry requires no mass (Particle breakthrough, at the LHC)  
 So we break it, with the Higgs (5-sigma result, could it be the Higgs)*

*Baby I have a theory to be told  
 The standard model used to discover our quantum world  
 SU(3), U(1), SU(2)'s our gauge  
 Make a transform and the equations shouldn't change*

*The particles then must all be massless  
 Cause mass terms vary under gauge transformation  
 The one solution is spontaneous  
 Symmetry breaking*

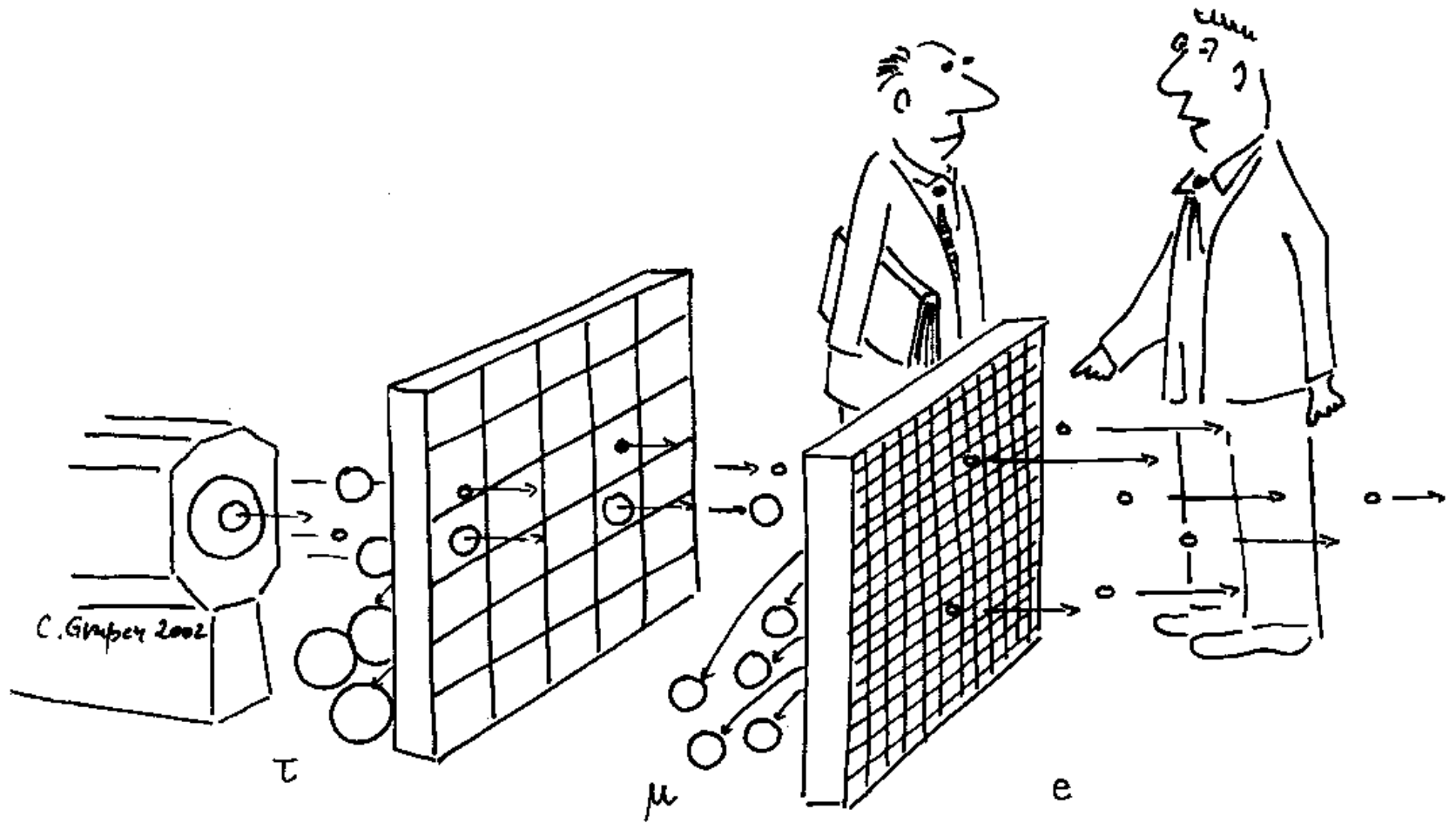
*Roll your vacuum to minimum potential  
 Break your SU(2) down to massless modes  
 Into mass terms of gauge bosons they go  
 Fermions sink in like skiers into snow*

*Lyrics and arrangement by Tim Blais and A Capella Science  
 Original music by Adele*



[www.youtube.com/watch?v=VtltBX1I1VY](http://www.youtube.com/watch?v=VtltBX1I1VY)

# VIEL SPAß BEIM MESSEN!



"Our new lepton identifier!"