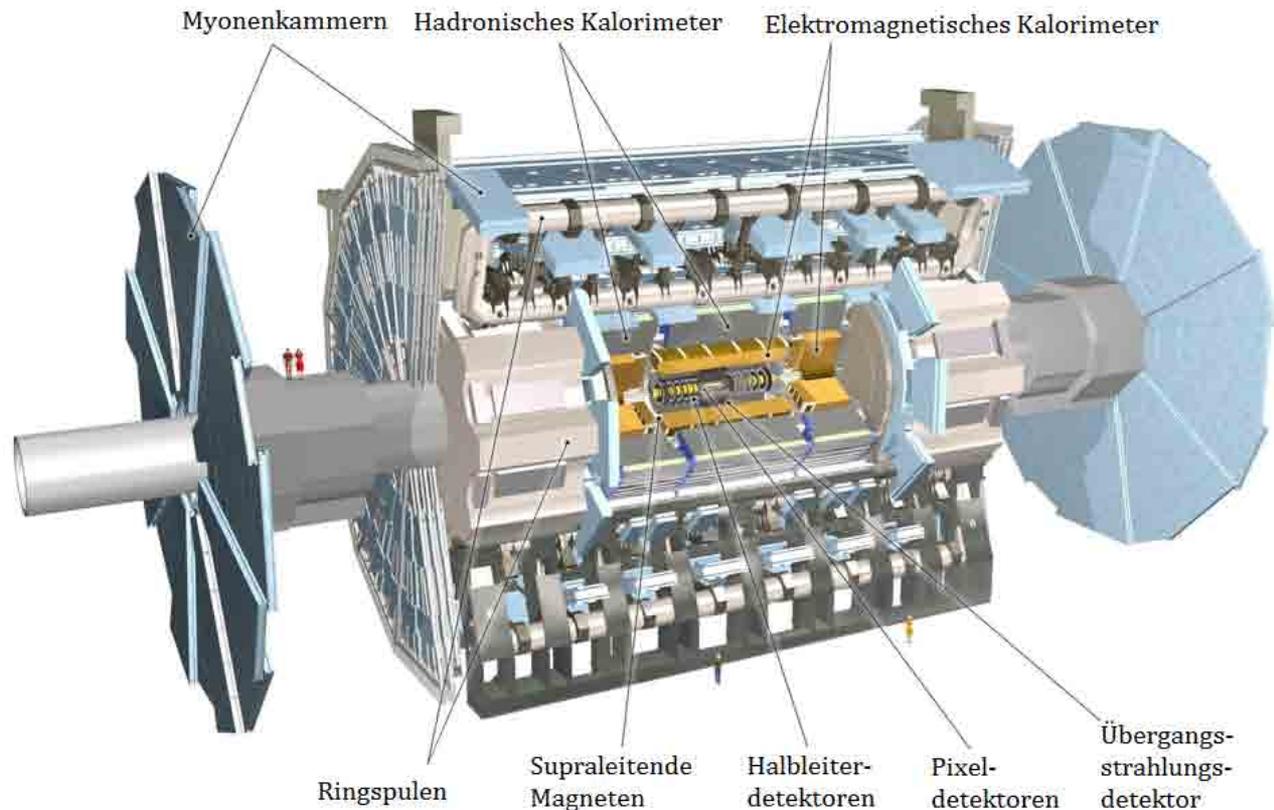


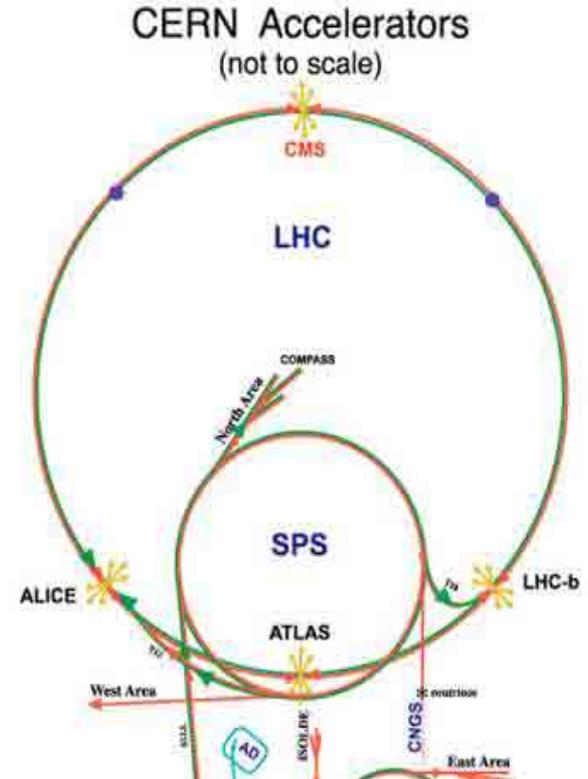
Einführung in die Teilchenphysik

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



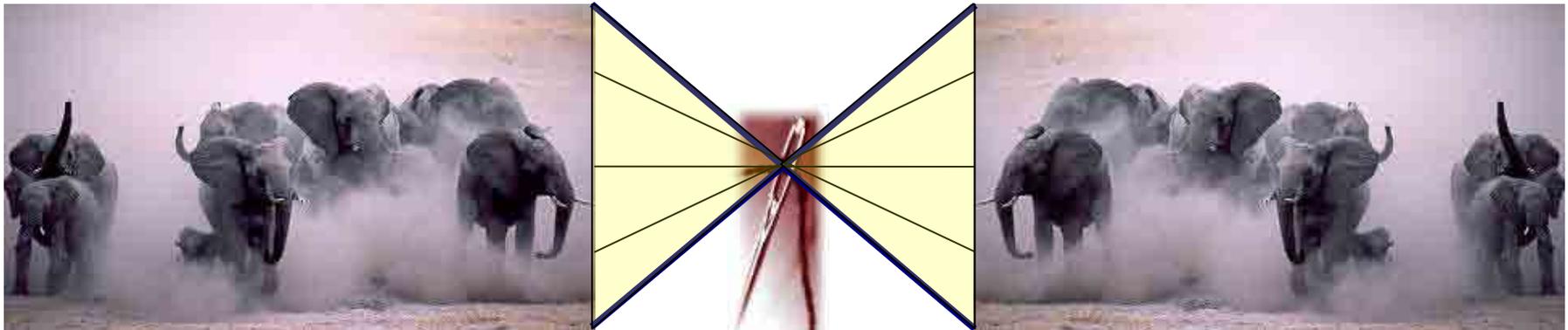
LHC: Large Hadron Collider
 SPS: Super Proton Synchrotron
 AD: Antiproton Decelerator
 ISOLDE: Isotope Separator OnLine DEvice
 PSB: Proton Synchrotron Booster
 PS: Proton Synchrotron
 LINAC: LINear ACcelerator
 LEIR: Low Energy Ion Ring
 CNGS: Cern Neutrinos to Gran Sasso

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

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

- Einheit: $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$ (1 GeV: 10^9 eV , 1 TeV: 10^{12} 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



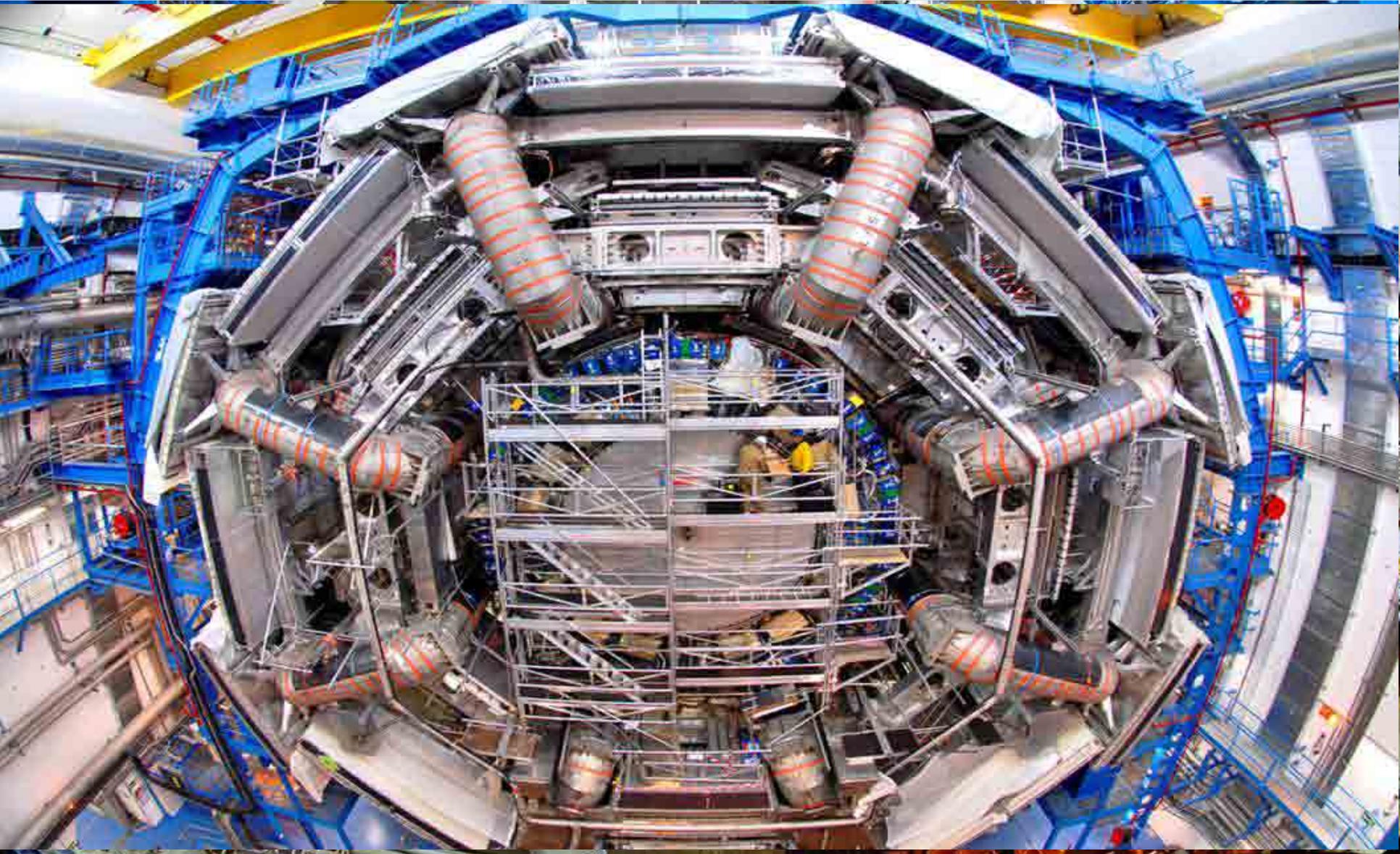
Die Energie eines einzelnen Protons entspricht der einer Mücke im Anflug

Nadelöhr:
0.3 mm Durchmesser

Protonenstrahlen am Kollisionspunkt:
0.03 mm Durchmesser

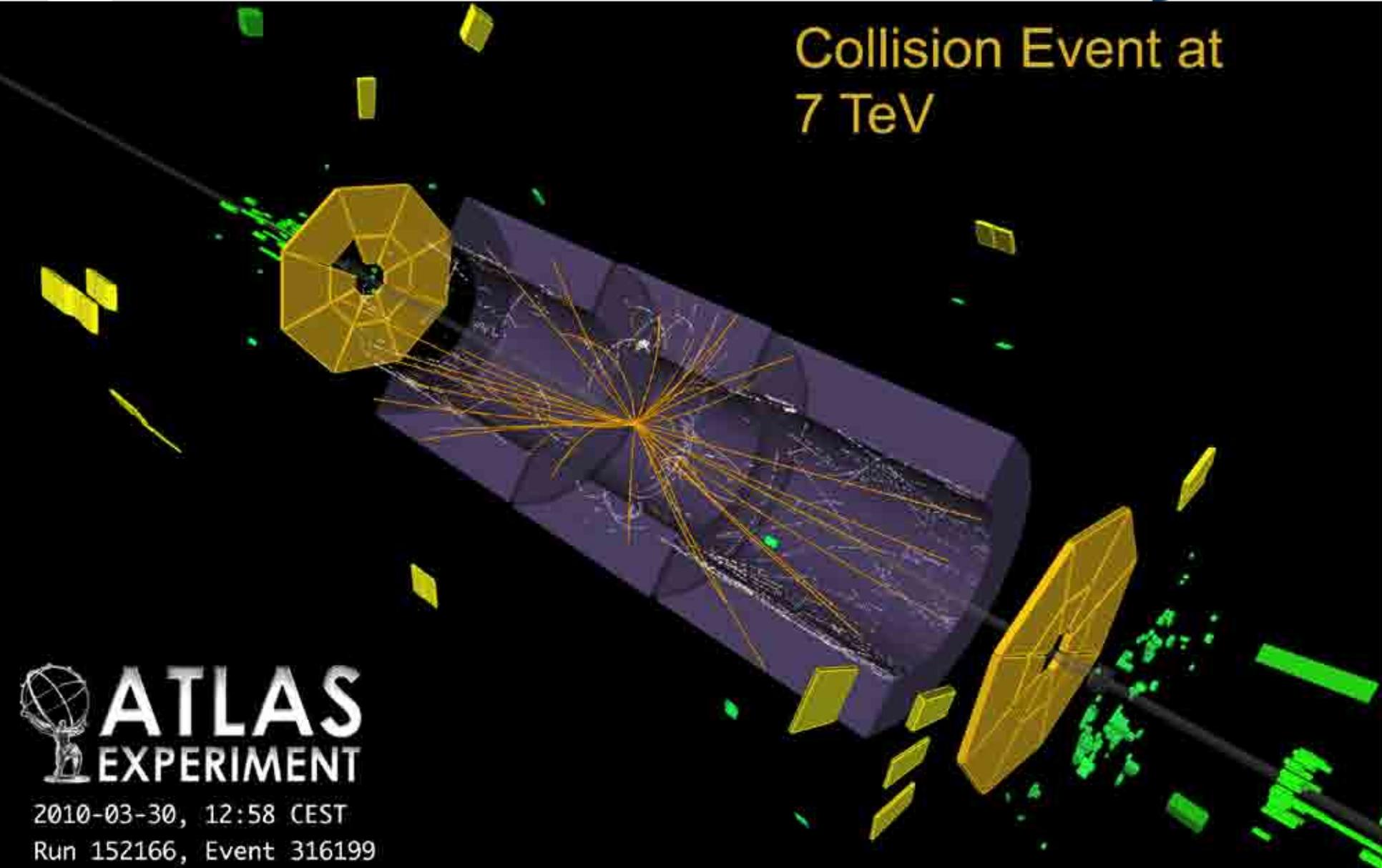


CERN visit - *Introduction*





Collision Event at 7 TeV



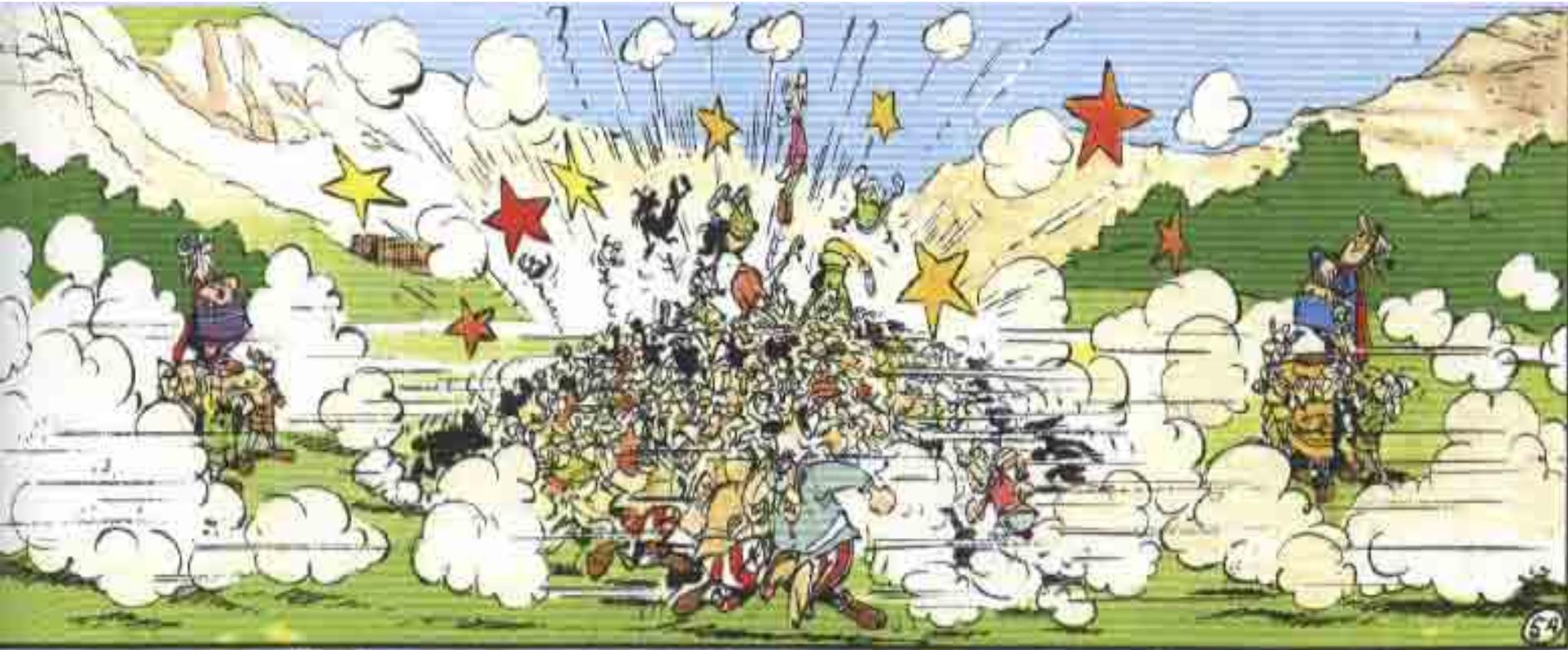
 **ATLAS**
EXPERIMENT

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?



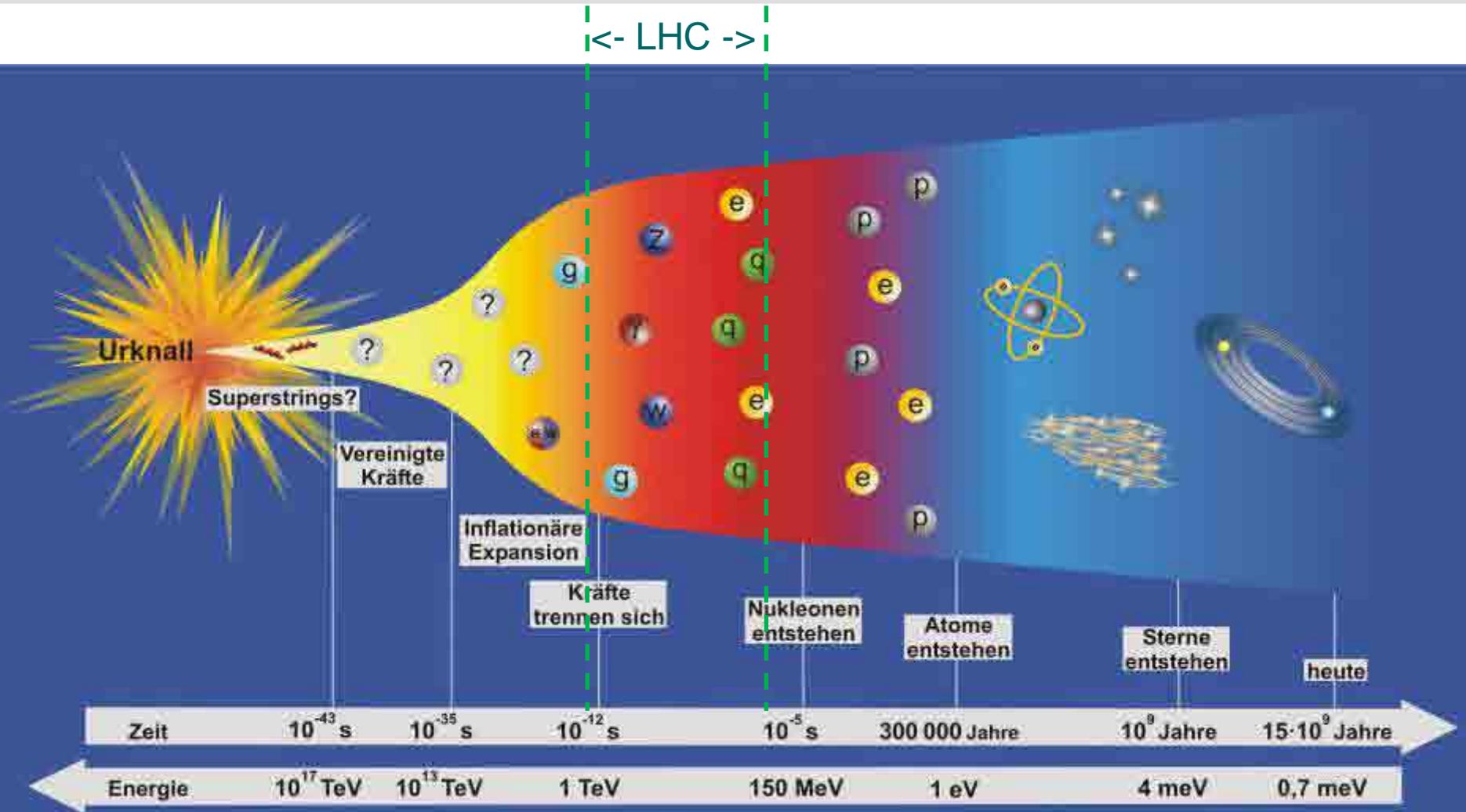
Raum



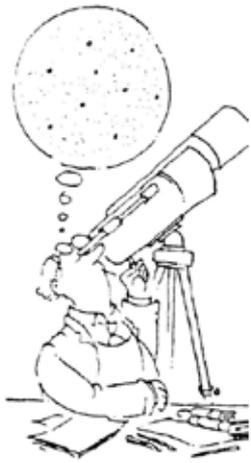
Zeit



Materie



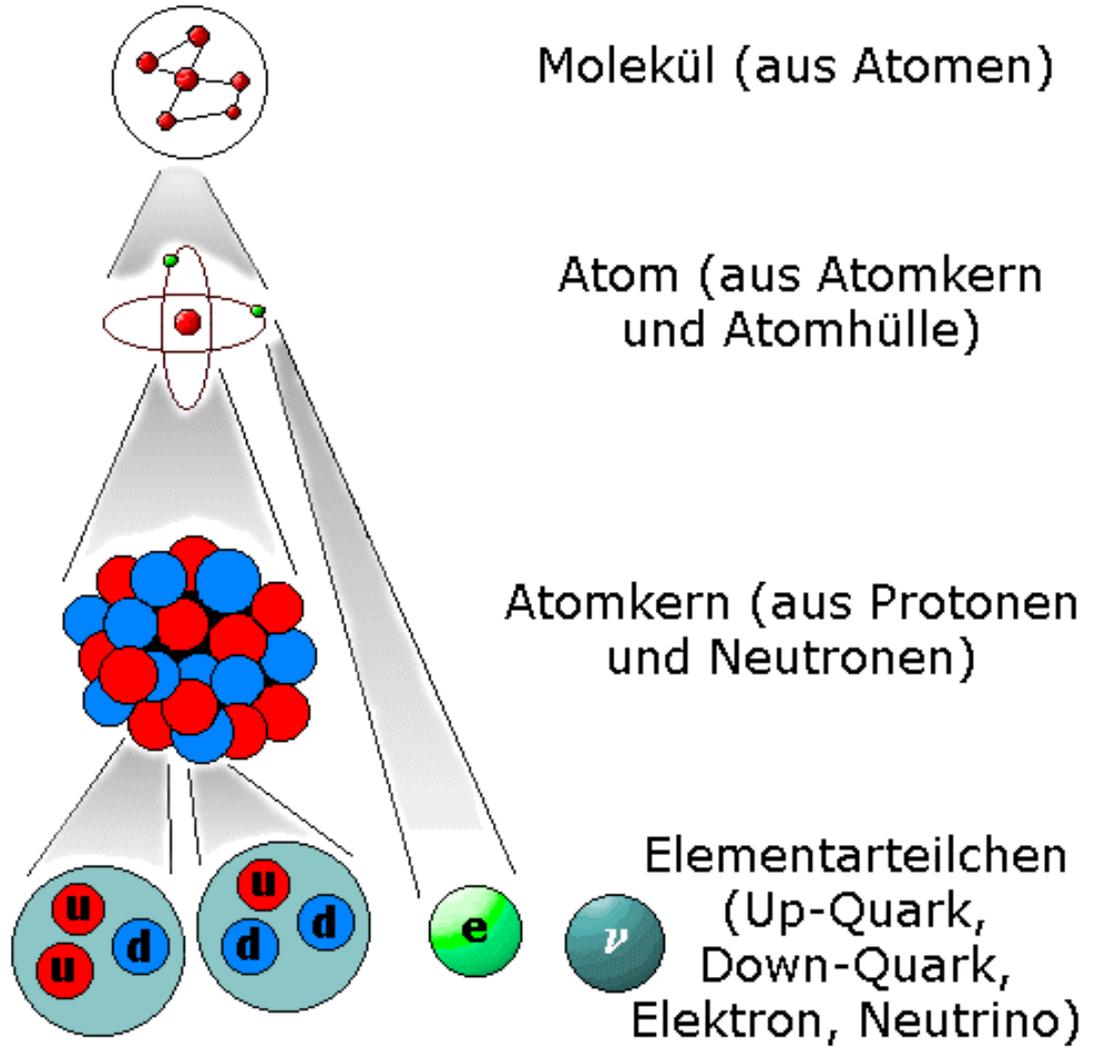
Energie 1 TeV = mittlere Bewegungsenergie bei Temperatur von 10^{13} K = 1 Million mal heißer als in der Sonne



Makrokosmos

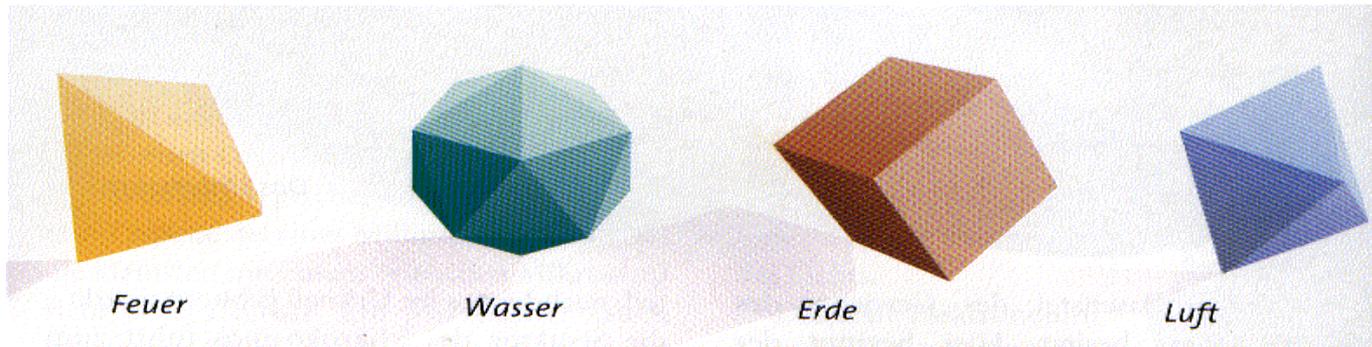


Mikrokosmos



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

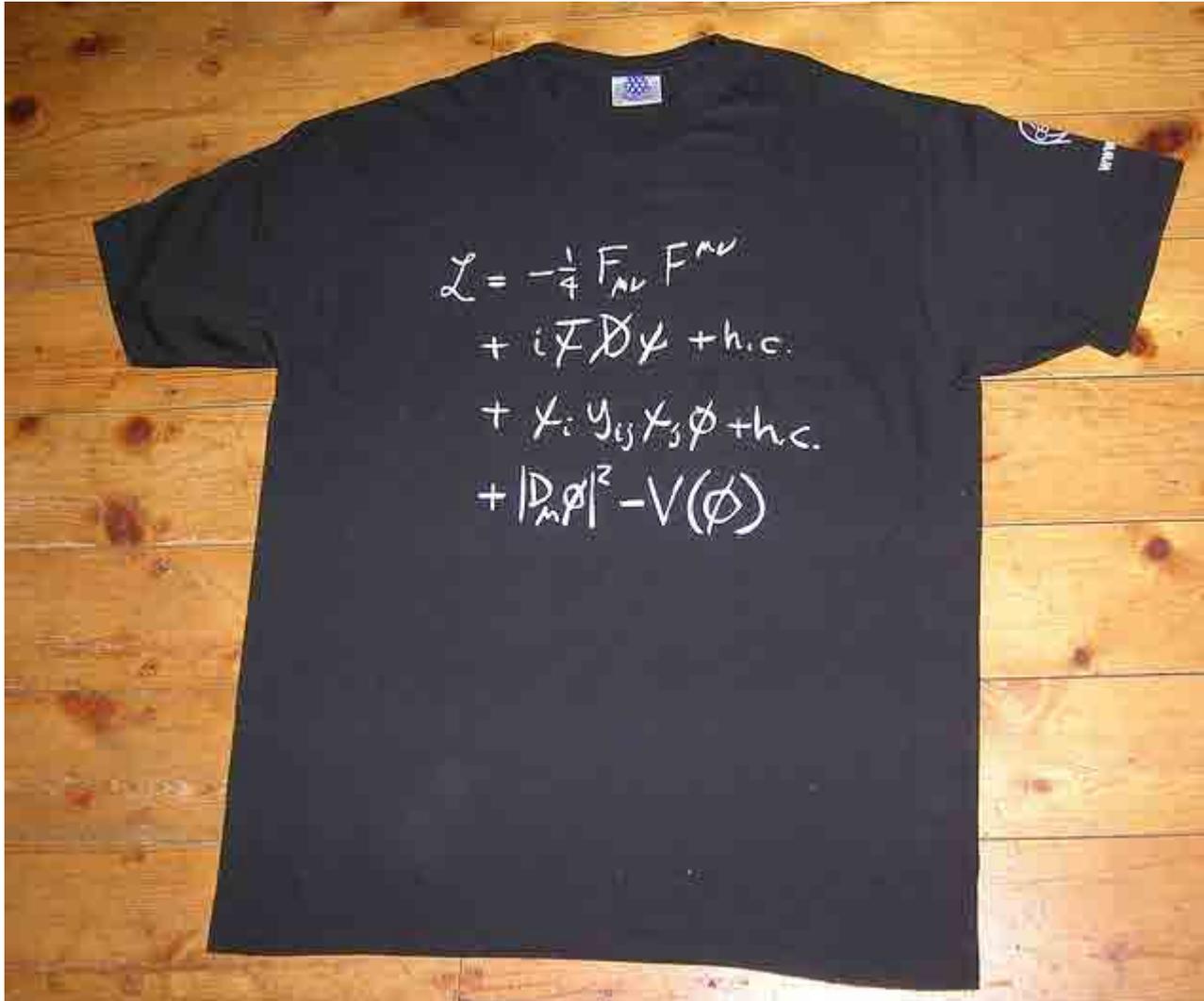
- ▶ **Elemente und Kräfte:** 500-430 v.Chr. Empedokles
 - ▶ **Vier Elemente:** Feuer, Wasser, Erde, Luft
 - ▶ **Zwei Urkräfte:** Liebe , Haß $\hat{=}$ Mischung , Trennung
- ▶ **Symmetrien:** 427-347 v.Chr. Platon
 - ▶ **Symmetrische Körper:** Schönheit der Gesetze



- ▶ **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

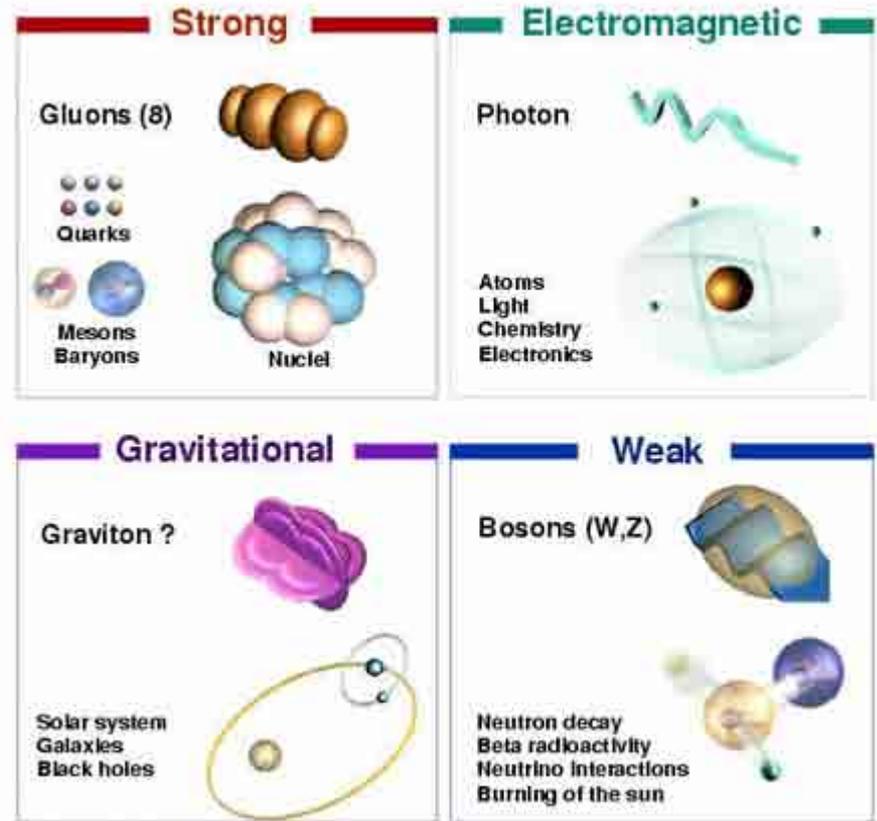
- Pierers Universallexikon:
 - **Wechselwirkung**, das Verhältnis zweier gleichzeitig vorhandener Gegenstände, vermöge dessen sie füreinander in gewissen Beziehungen zugleich als Ursache und als Wirkung aufgefasst werden.



- 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

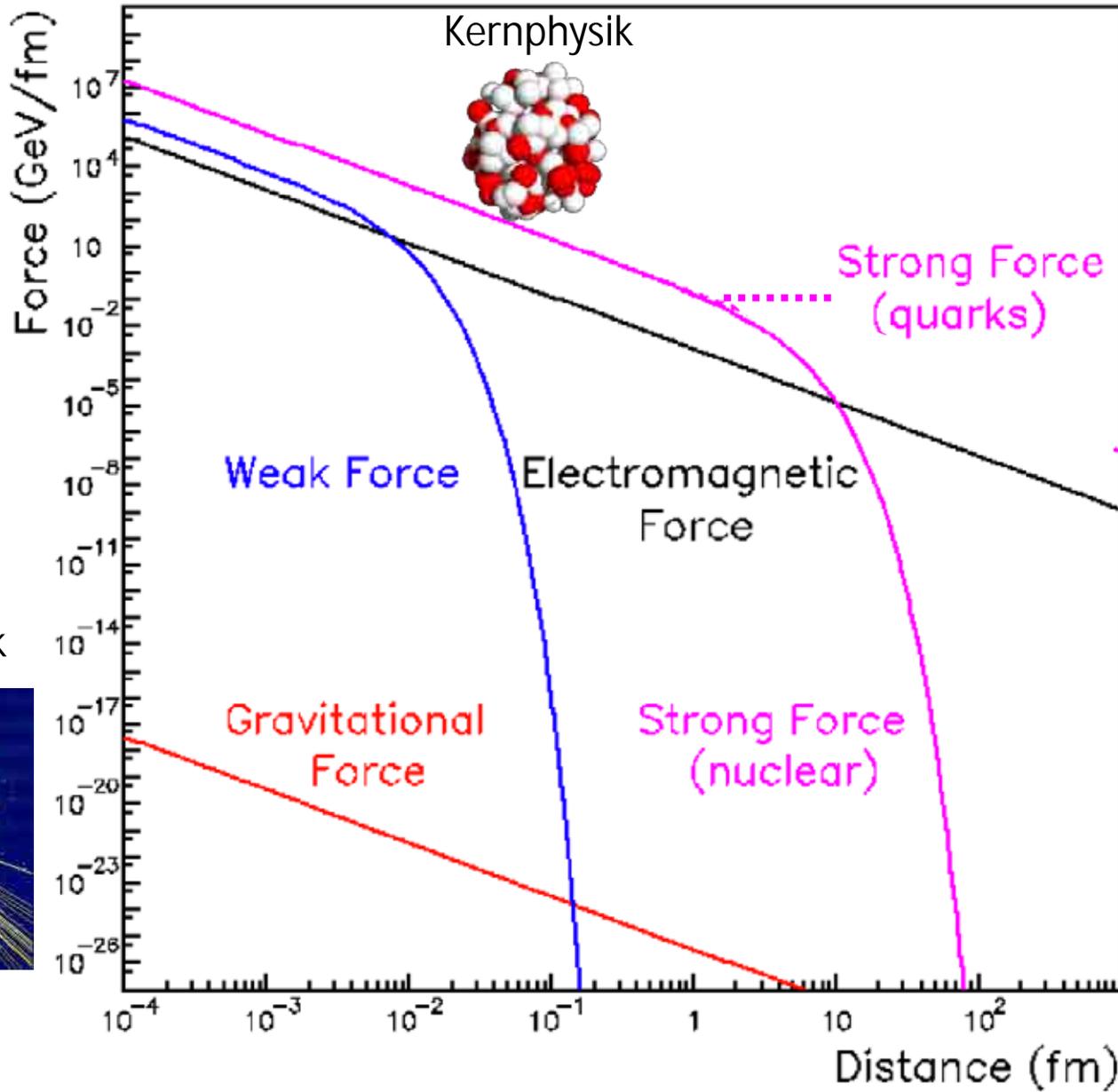
Wechselwirkungen (WW) und Kräfte

- 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

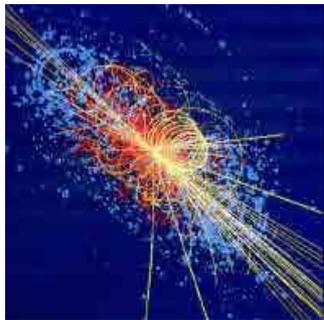
Strong Force (nuclear)

„Wir“

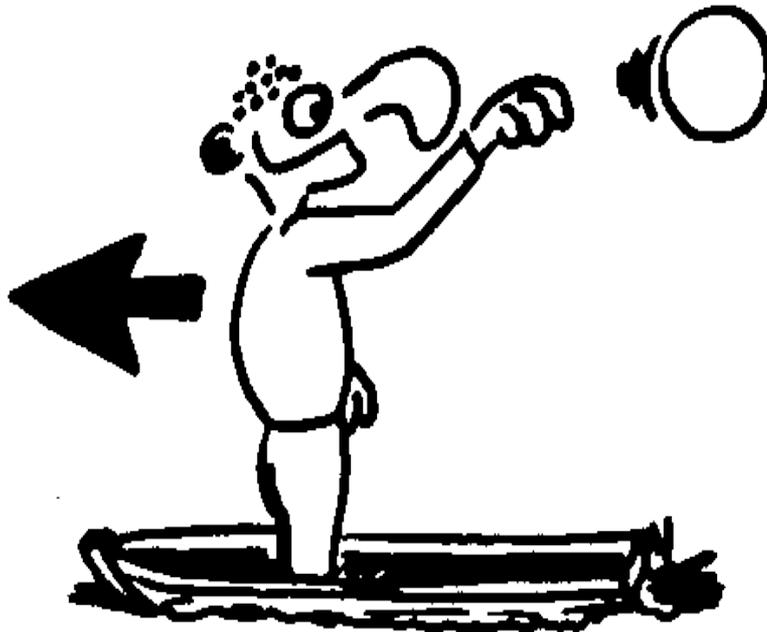


www.schmunzelmal.de

Teilchenphysik



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



Abstoßend

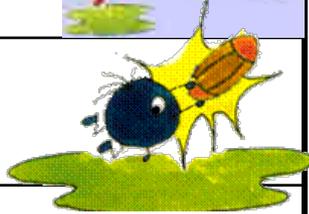


Anziehend

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

(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 γ  |
| Schwerkraft | Gravitonen ? |

- Wechselwirkung nur mit Teilchen, die entsprechende Ladung tragen



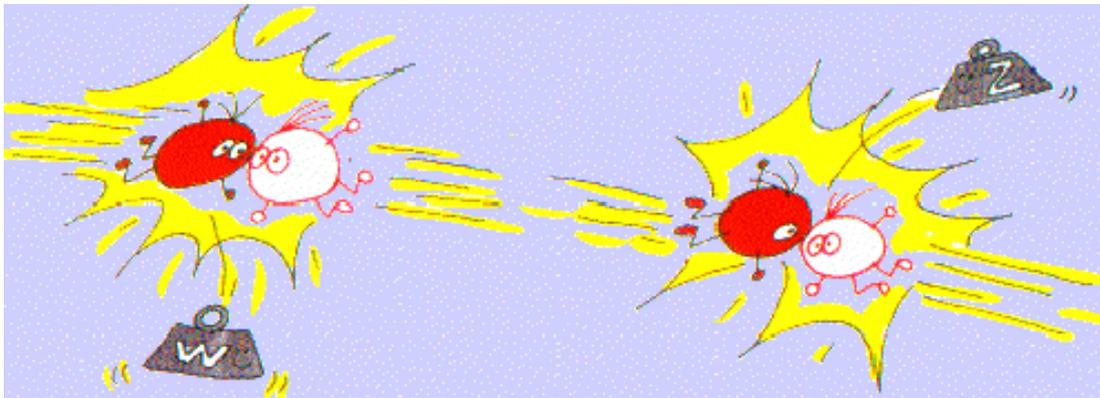
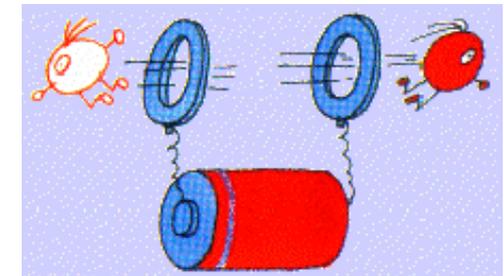
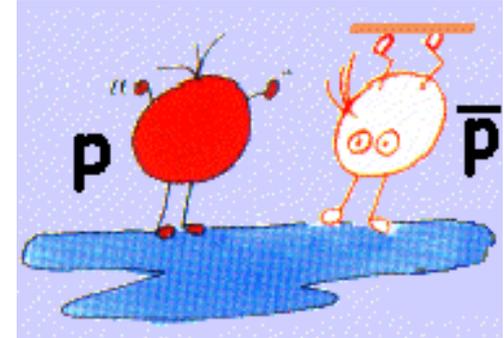
Ladung ...

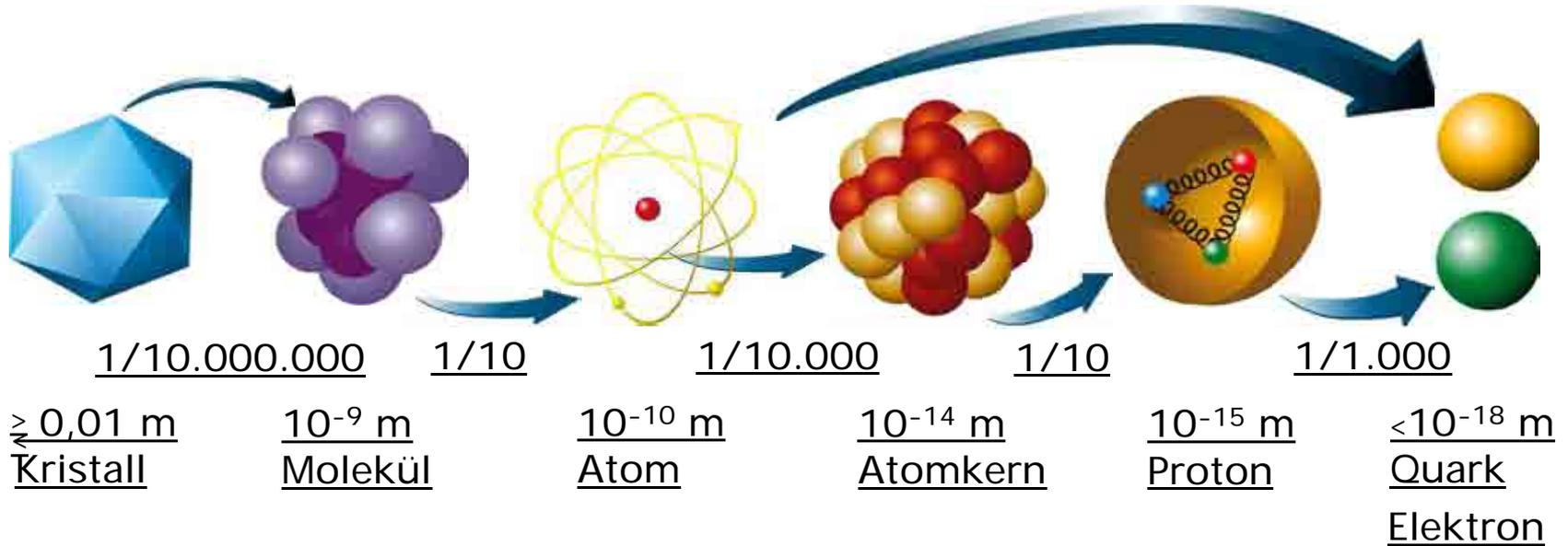
- ... ist **kein Stoff** !
- ... beschreibt die **Sensitivität** von Teilchen **bezüglich der jeweiligen Wechselwirkung**

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

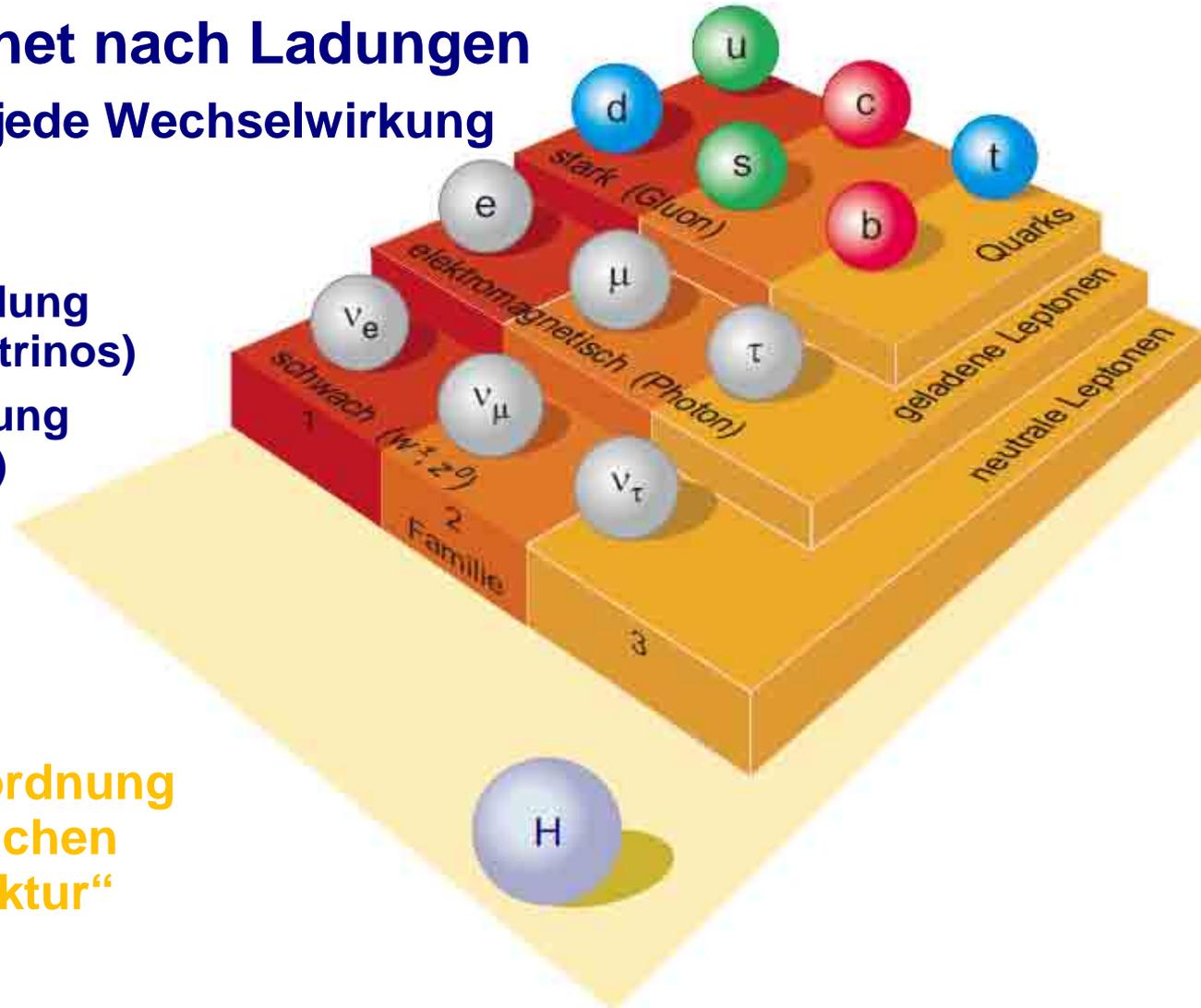
- Zwei „Leptonen“:

- 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.)

- **Bausteine geordnet nach Ladungen**

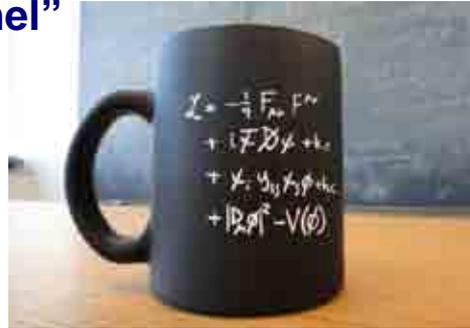
- Eine Ladung für jede Wechselwirkung

- Starke Ladung (nur Quarks)
 - Elektrische Ladung (alle außer Neutrinos)
 - Schwache Ladung (alle Bausteine)

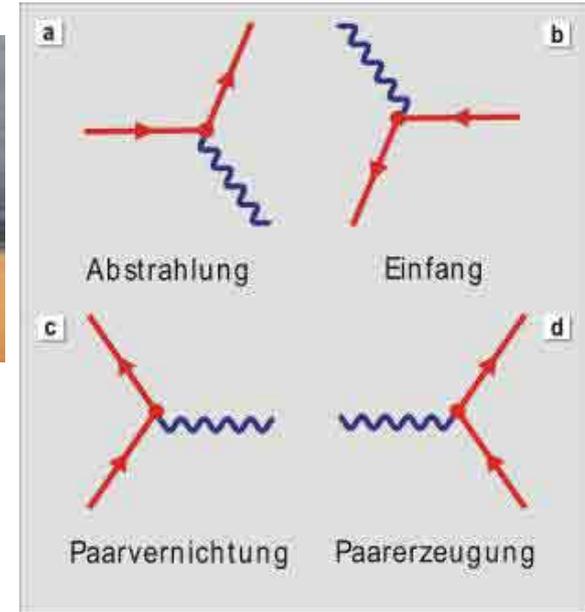
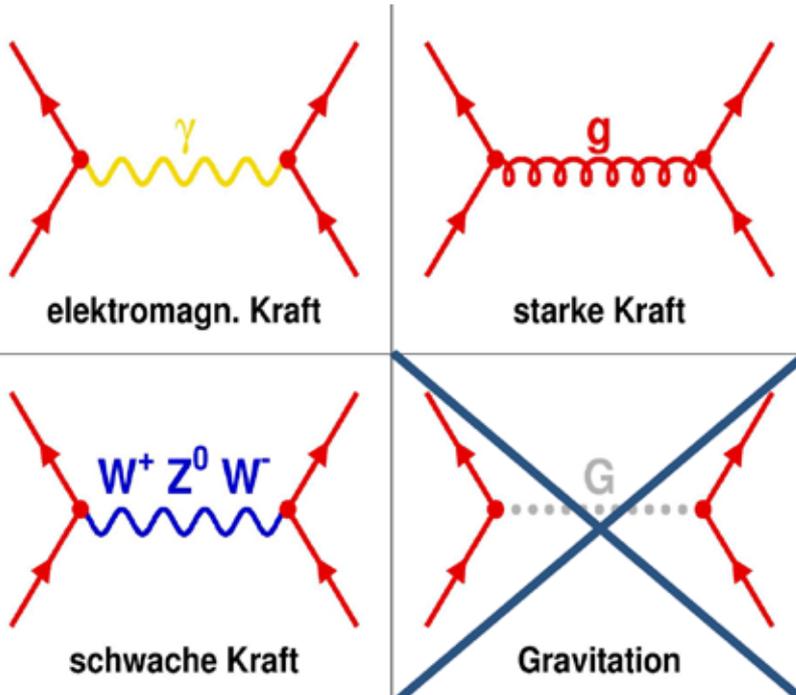


- **Herkunft der Anordnung der Baustein-Teilchen in „Multipllettstruktur“ unverständlich!**

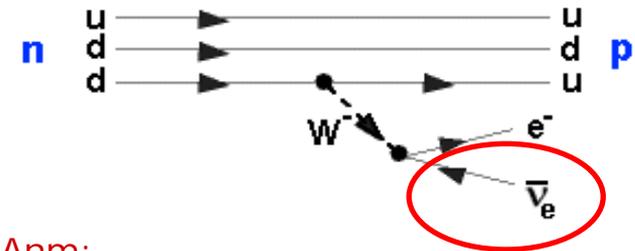
- Interpretation der "Weltformel" ergibt eindeutiges Set fundamentaler "Vertices"



- Alle Prozesse sind Kombinationen solcher Vertices



- z.B. Beta"zerfall" des Neutrons



- Anm: Pfeilrichtung β 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

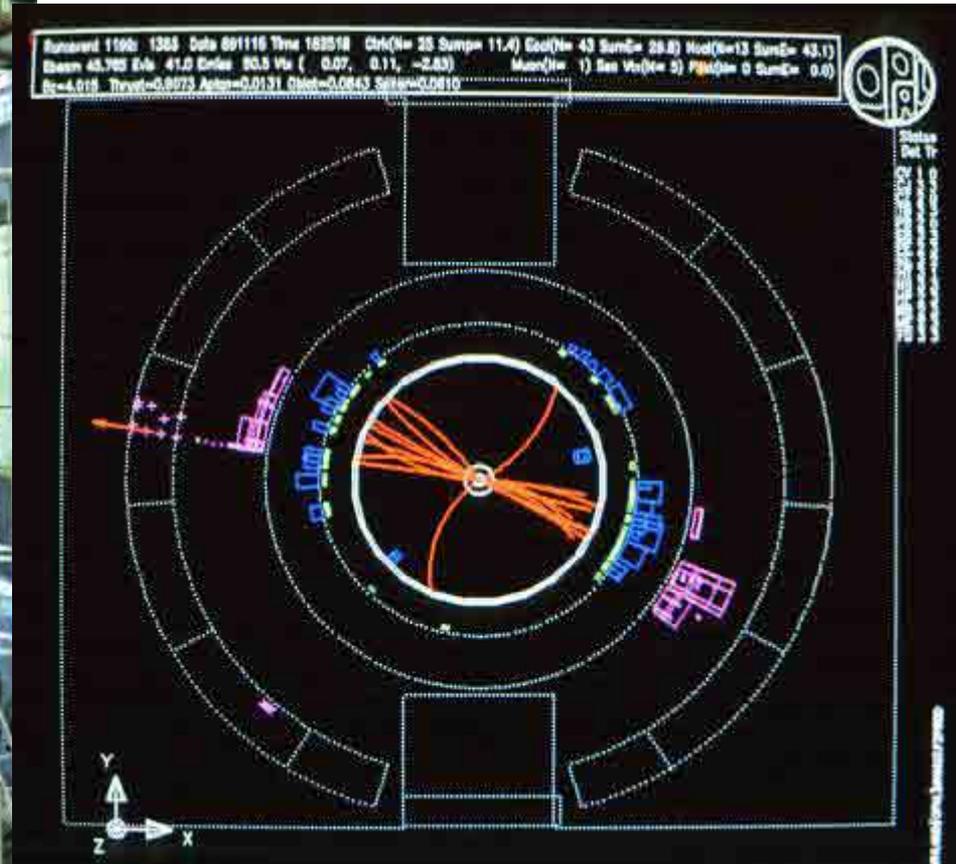
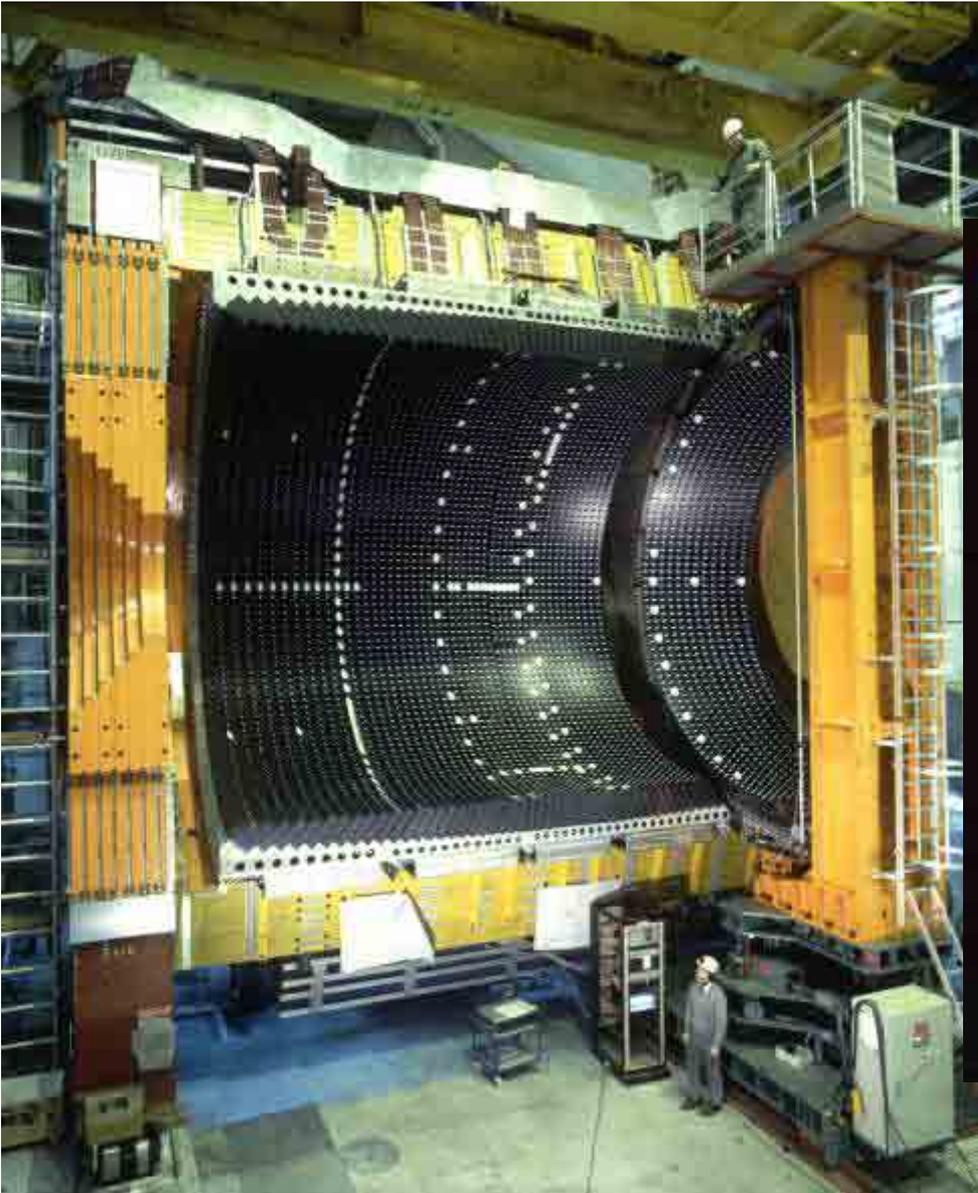
<https://kjende.web.cern.ch/kjende/de/wpath.htm>

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



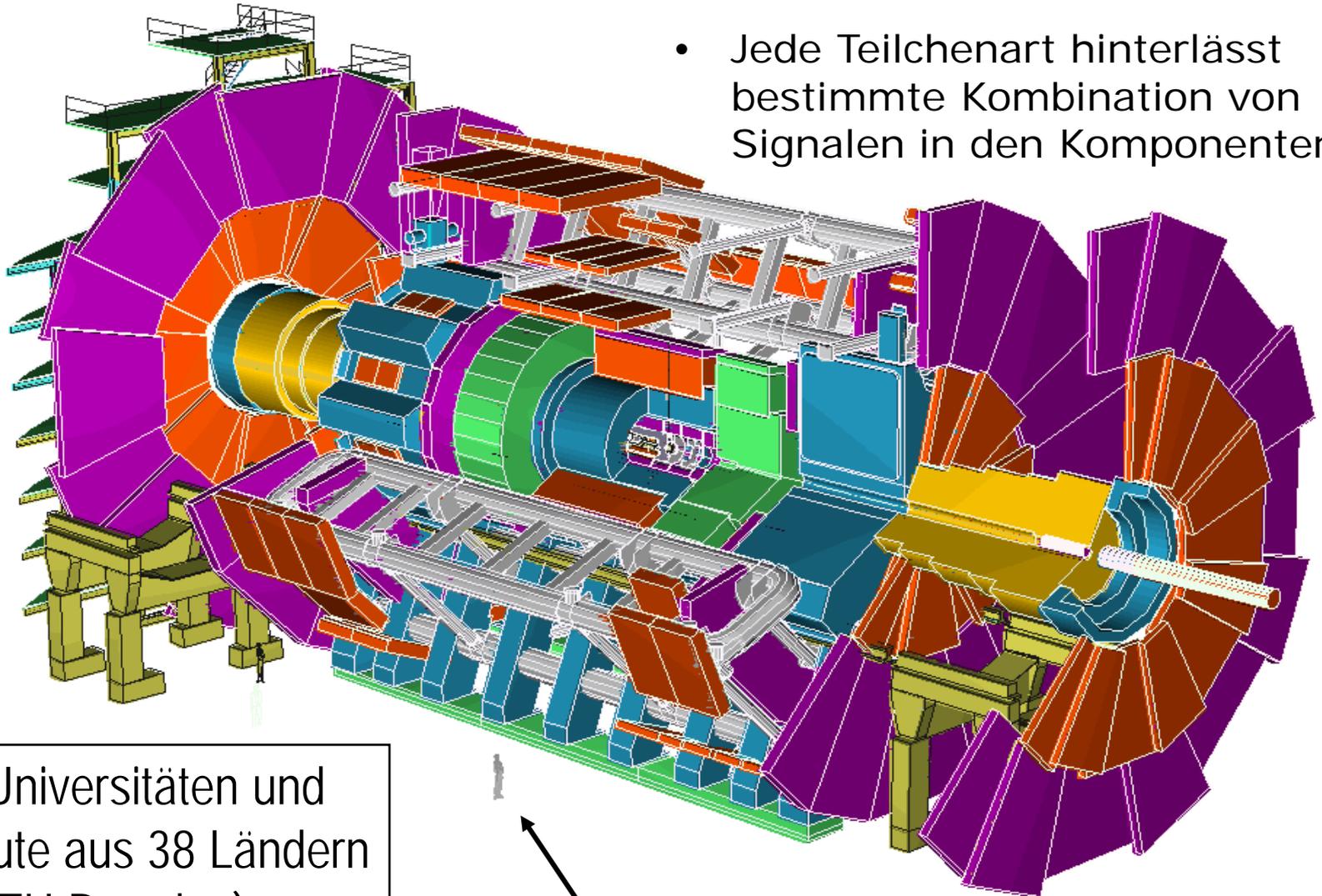
CERN, Genf,
bis 2000



Elektronische Bilder

heute : ATLAS Experiment, LHC

- Jede Teilchenart hinterlässt bestimmte Kombination von Signalen in den Komponenten

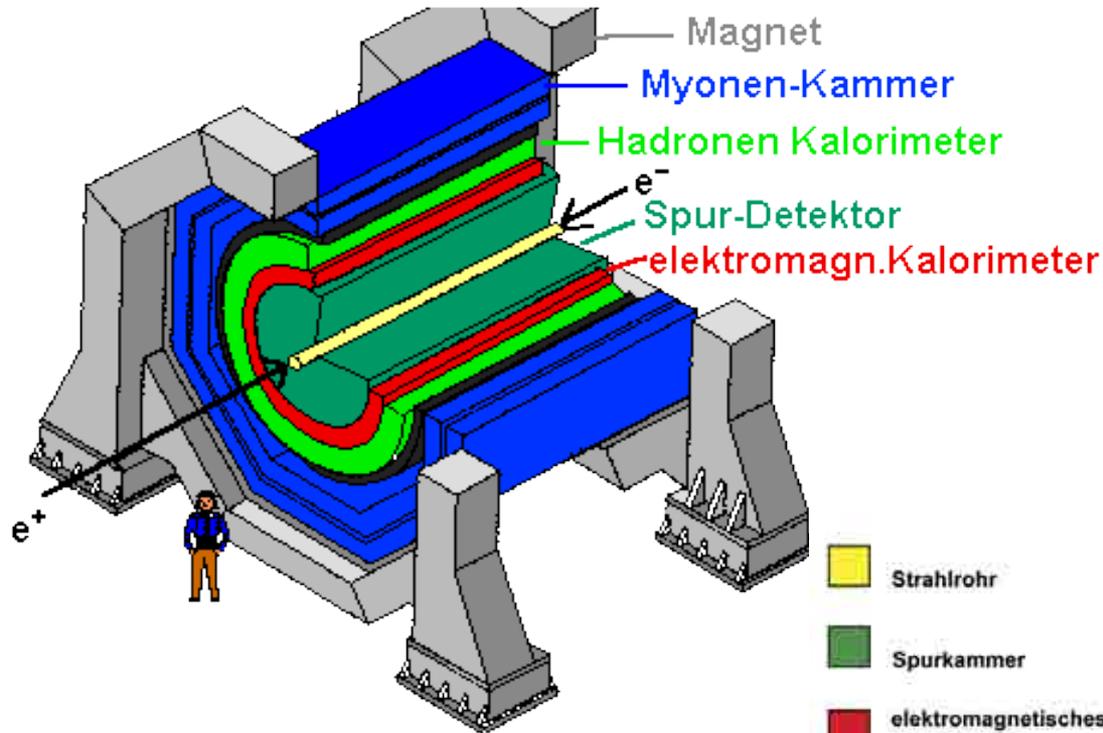


174 Universitäten und Institute aus 38 Ländern (u.a. TU Dresden)

Größenvergleich

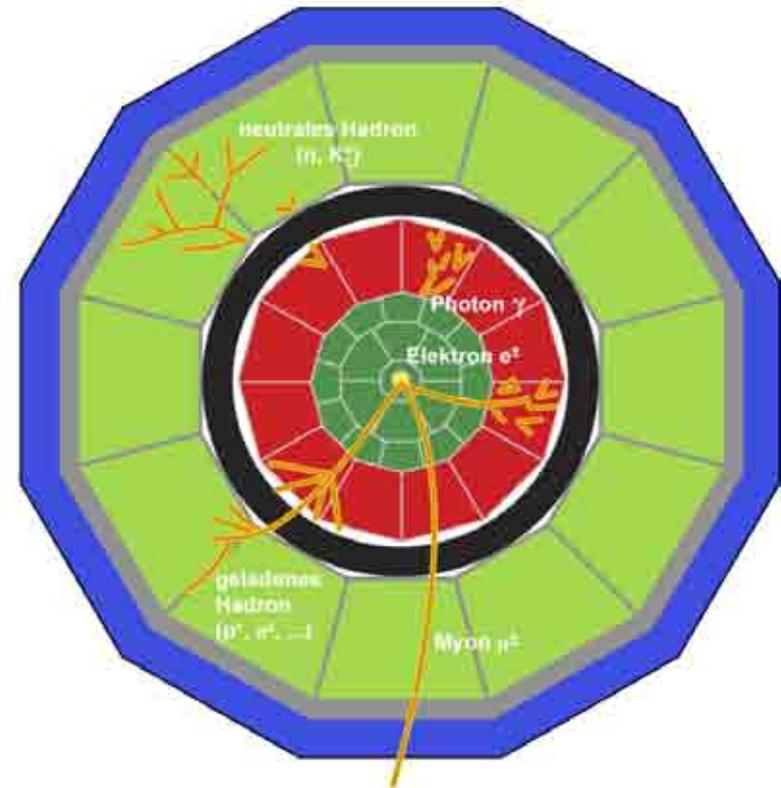
- Zwiebelschalenartiger Aufbau verschiedener Komponenten

Teilchenidentifikation



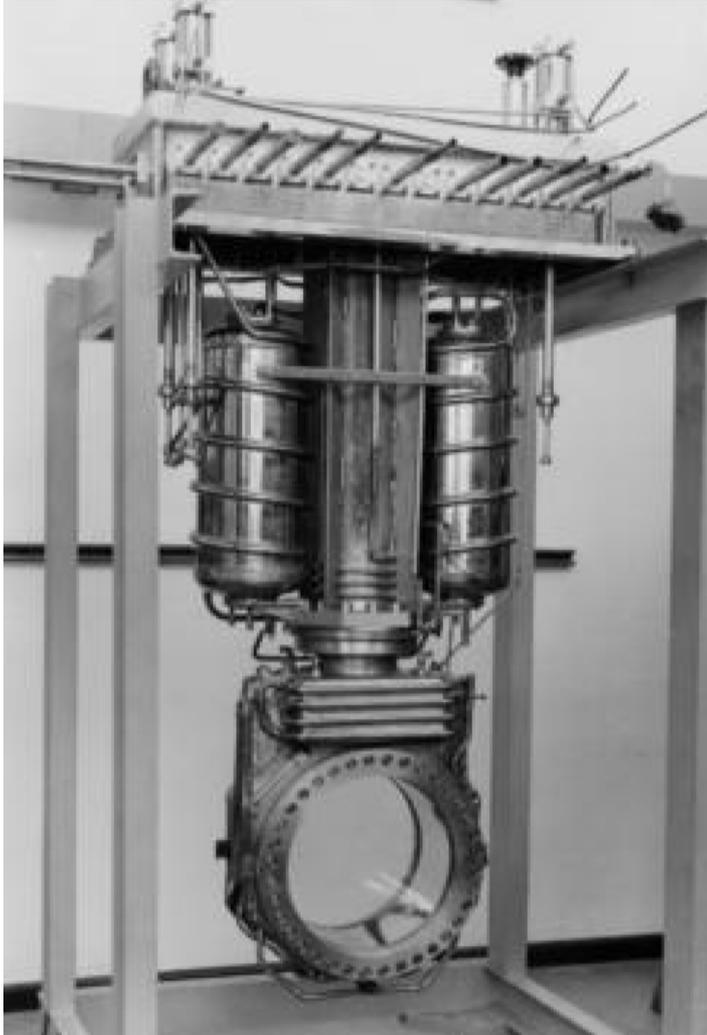
- Zwiebelschalenartiger Aufbau verschiedener Komponenten
- Jede Teilchenart hinterlässt bestimmte Kombination von Signalen in den Komponenten

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



Innerste Lage: Spurdetektoren

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

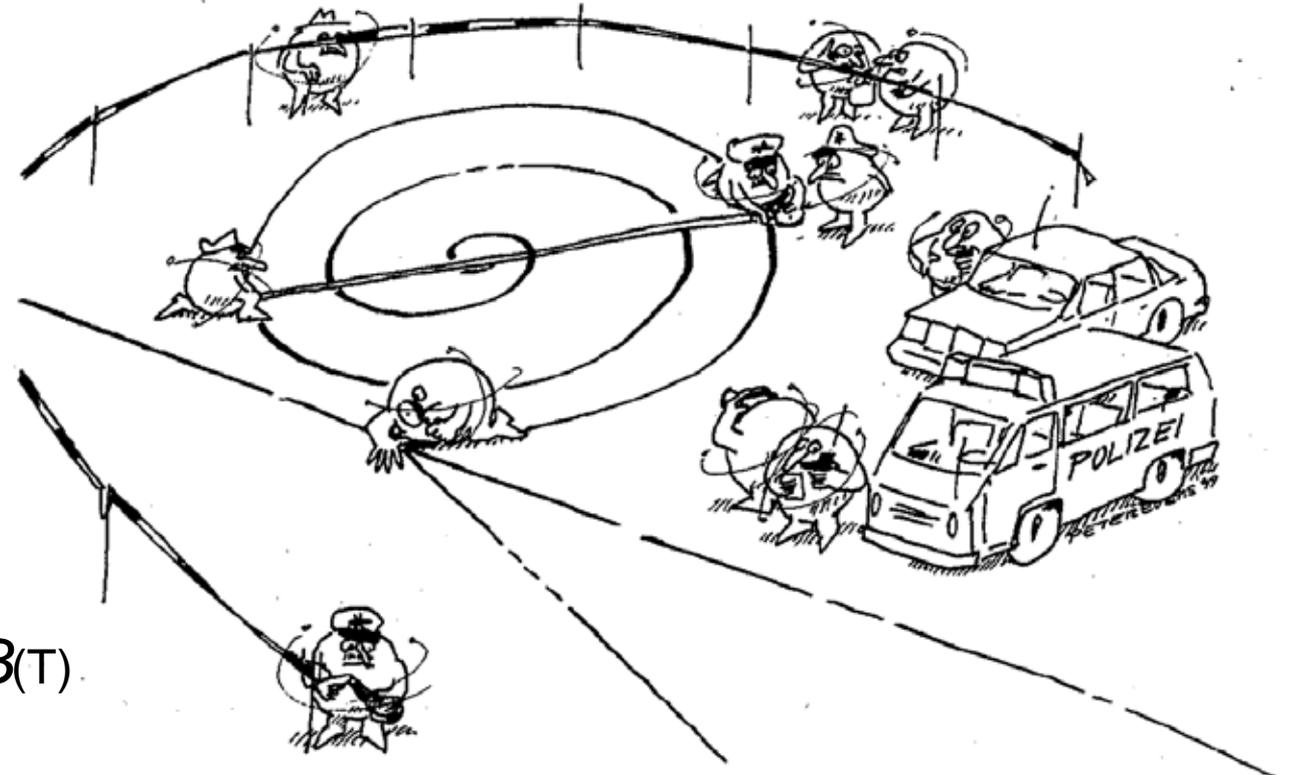


Impulsrekonstruktion

- Messung des Impulses über Spurkrümmung r im B-Feld

$$p = Qe r B$$

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



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

Nächste Lage: Elektromagnetisches Kalorimeter

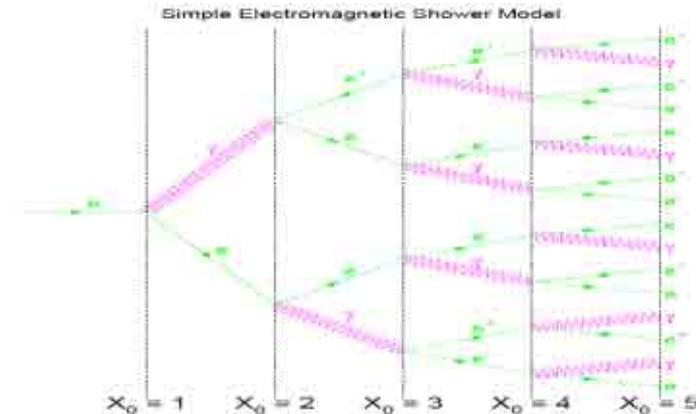
- CMS: PbWO_4 Kristalle
- Hier deponieren e und g ihre gesamte Energie



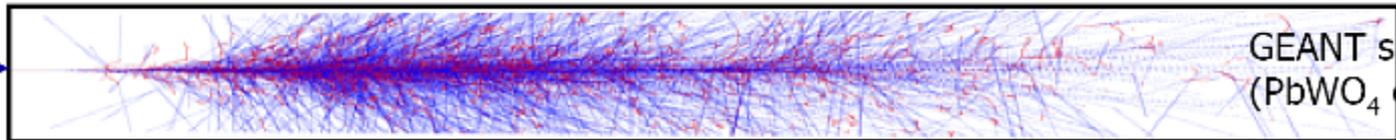
107

Wolfgang Funk - CERN CMS

8

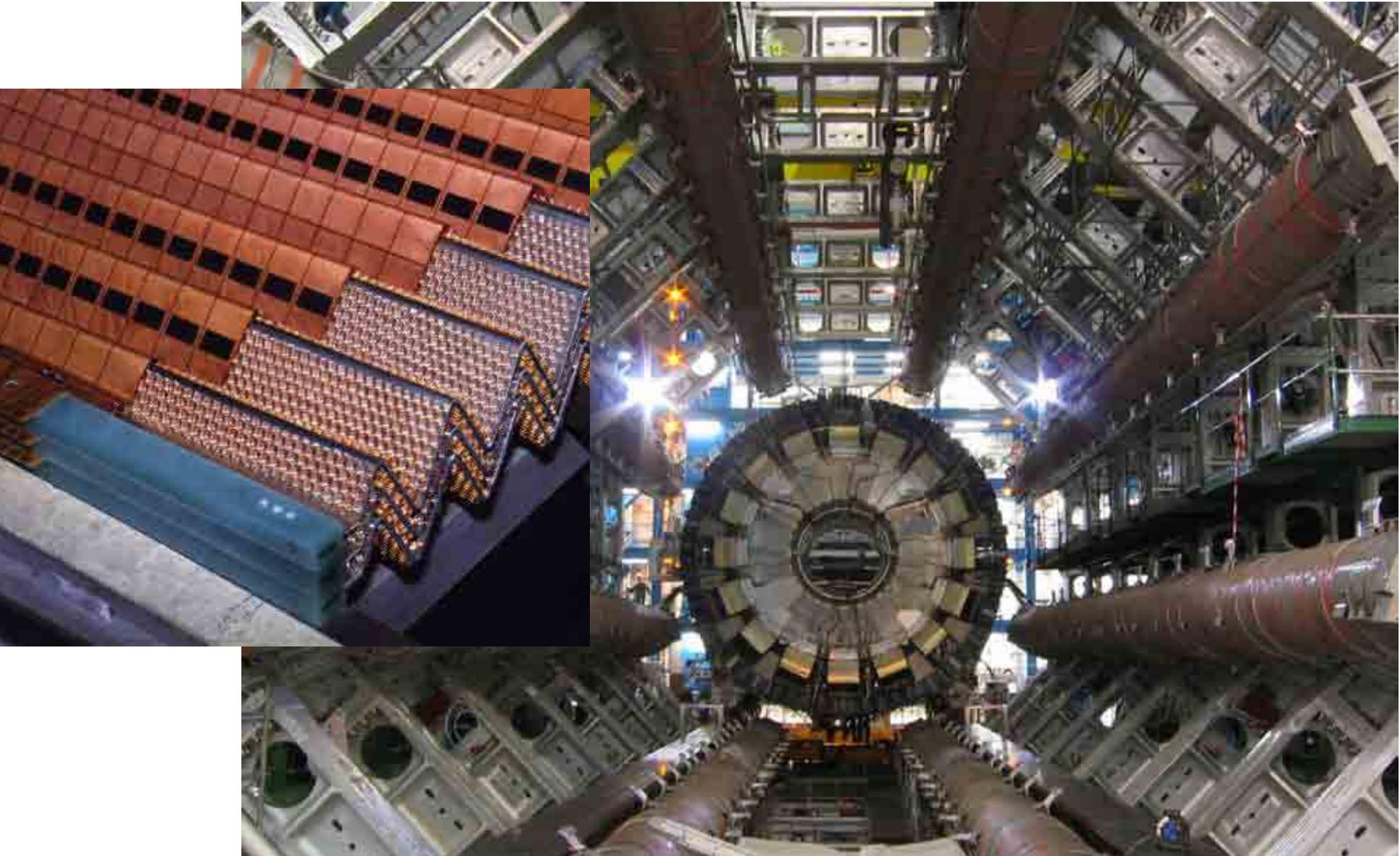


e



GEANT shower
(PbWO_4 crystal)

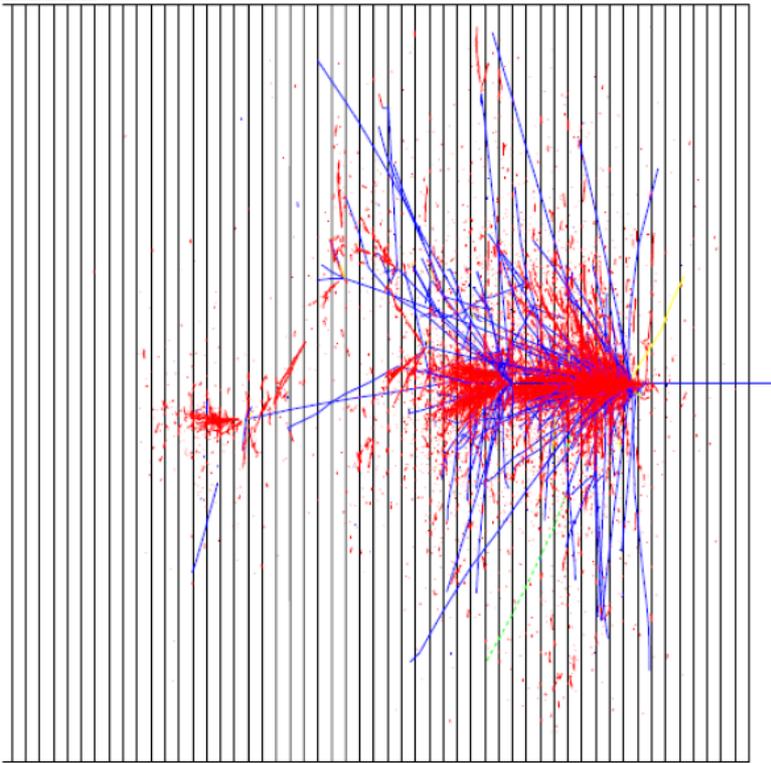
- Das ATLAS Flüssig-Argon Calorimeter: "Akkordeon"



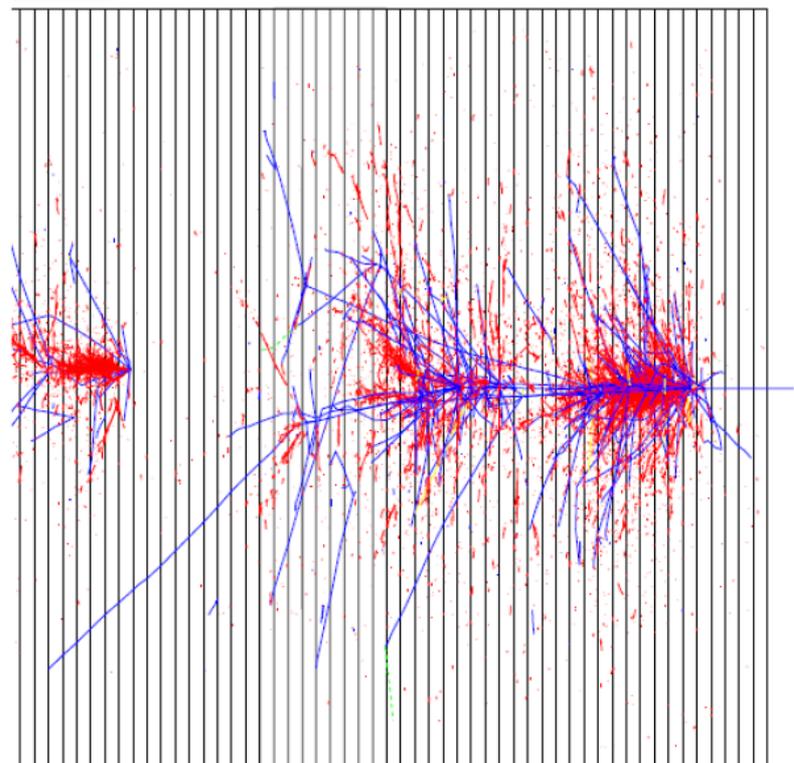
Nächste Lage: Hadronische Kalorimeter

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

1.

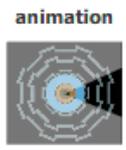


2.

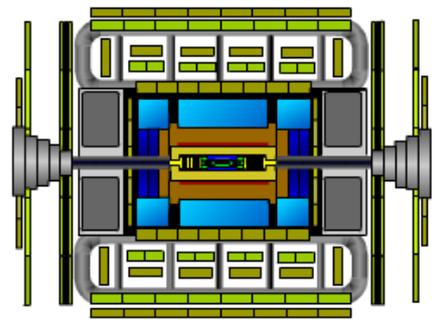
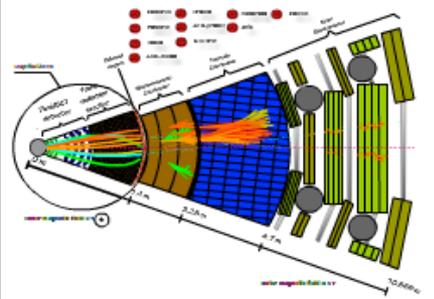
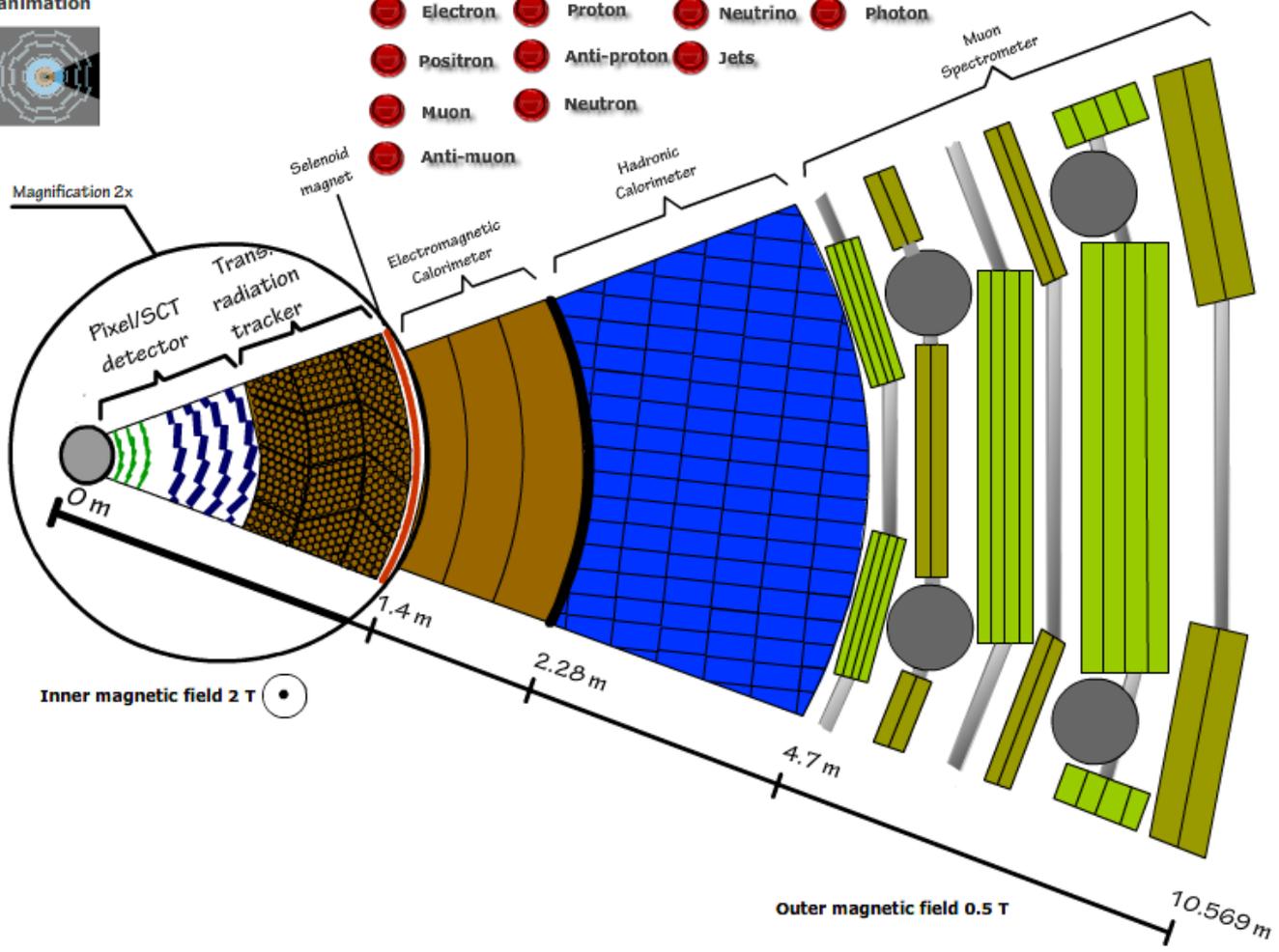


red - e.m. component
blue - charged hadrons

ATLAS



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



Created by Jeřábek, Jende 2010



Atlas_9.swf

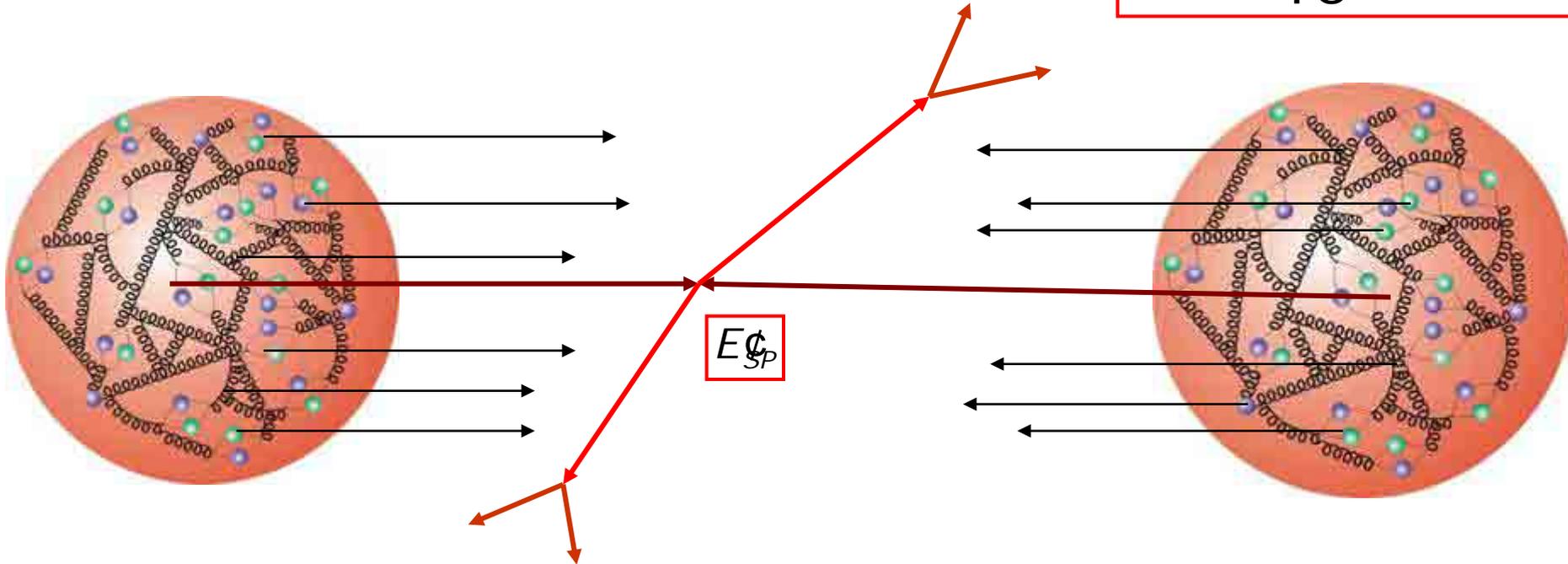
https://kjende.web.cern.ch/kjende/de/wpath_teilchenid1.htm

Was kollidiert da eigentlich?

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

Schwerpunktsenergie der kollidierenden Partonen (q, g)

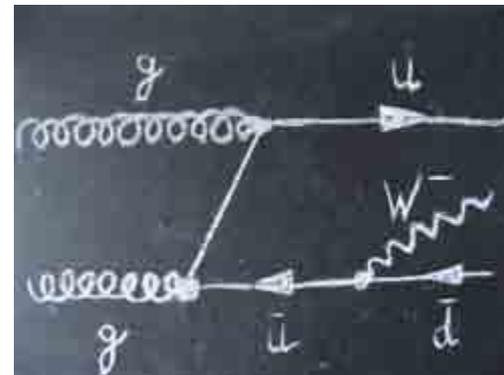
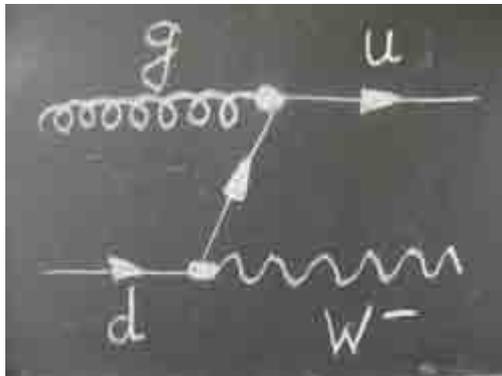
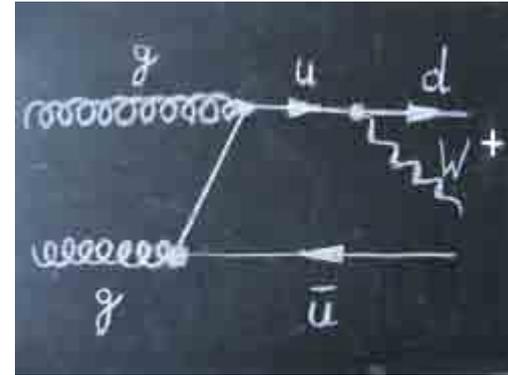
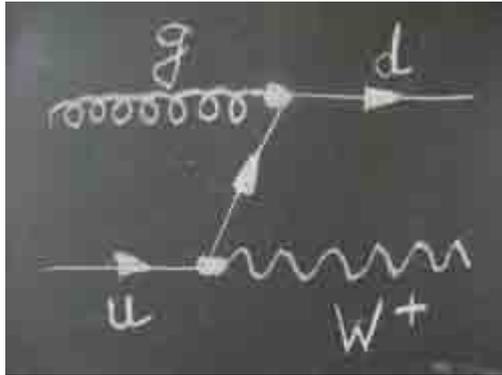
$$E_{SP} \gg \frac{1}{10} E_{SP}(pp)$$



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

Mögliche Herstellung des Wam LHC

- Entweder durch Gluon-Quark oder Gluon-Gluon

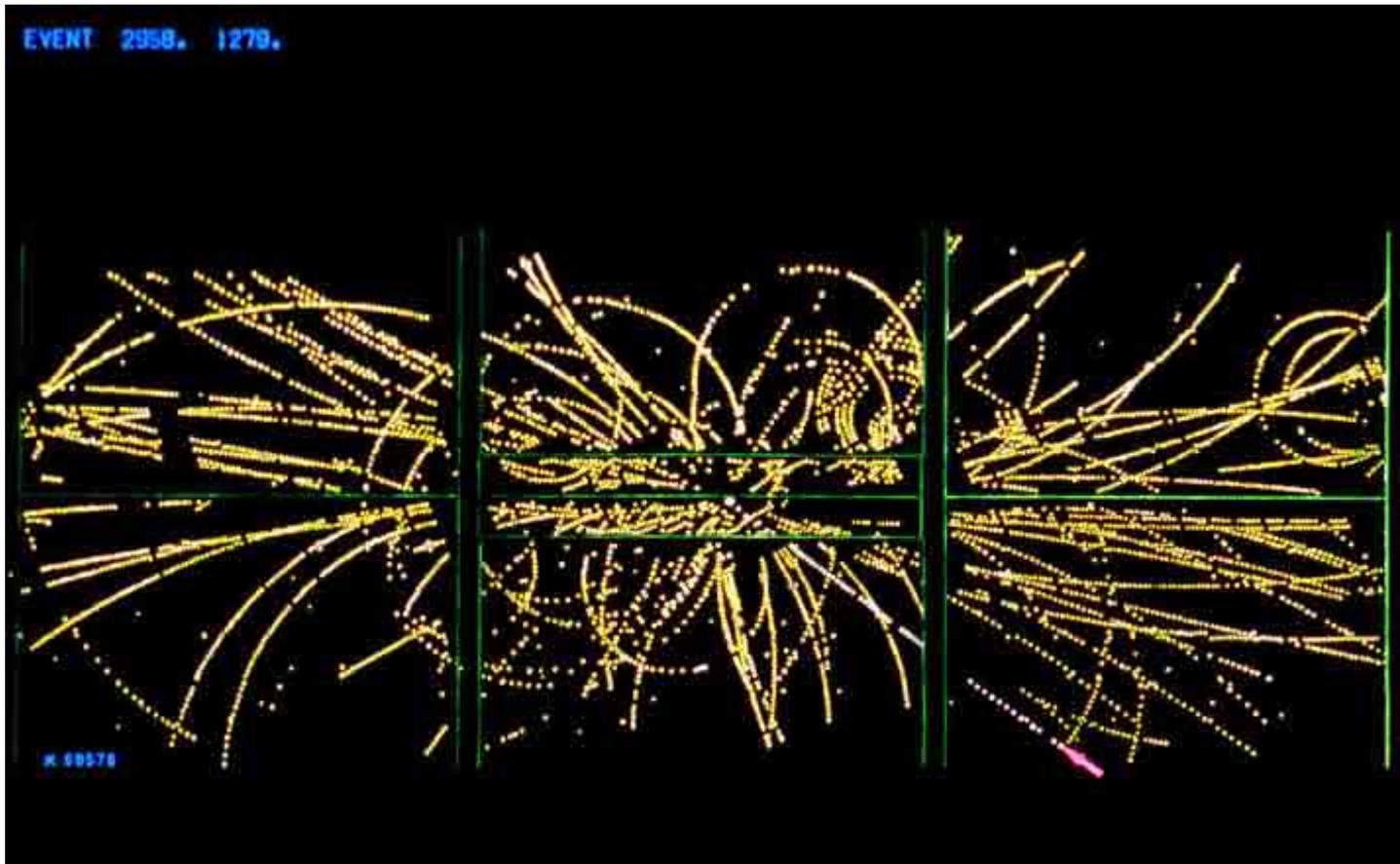


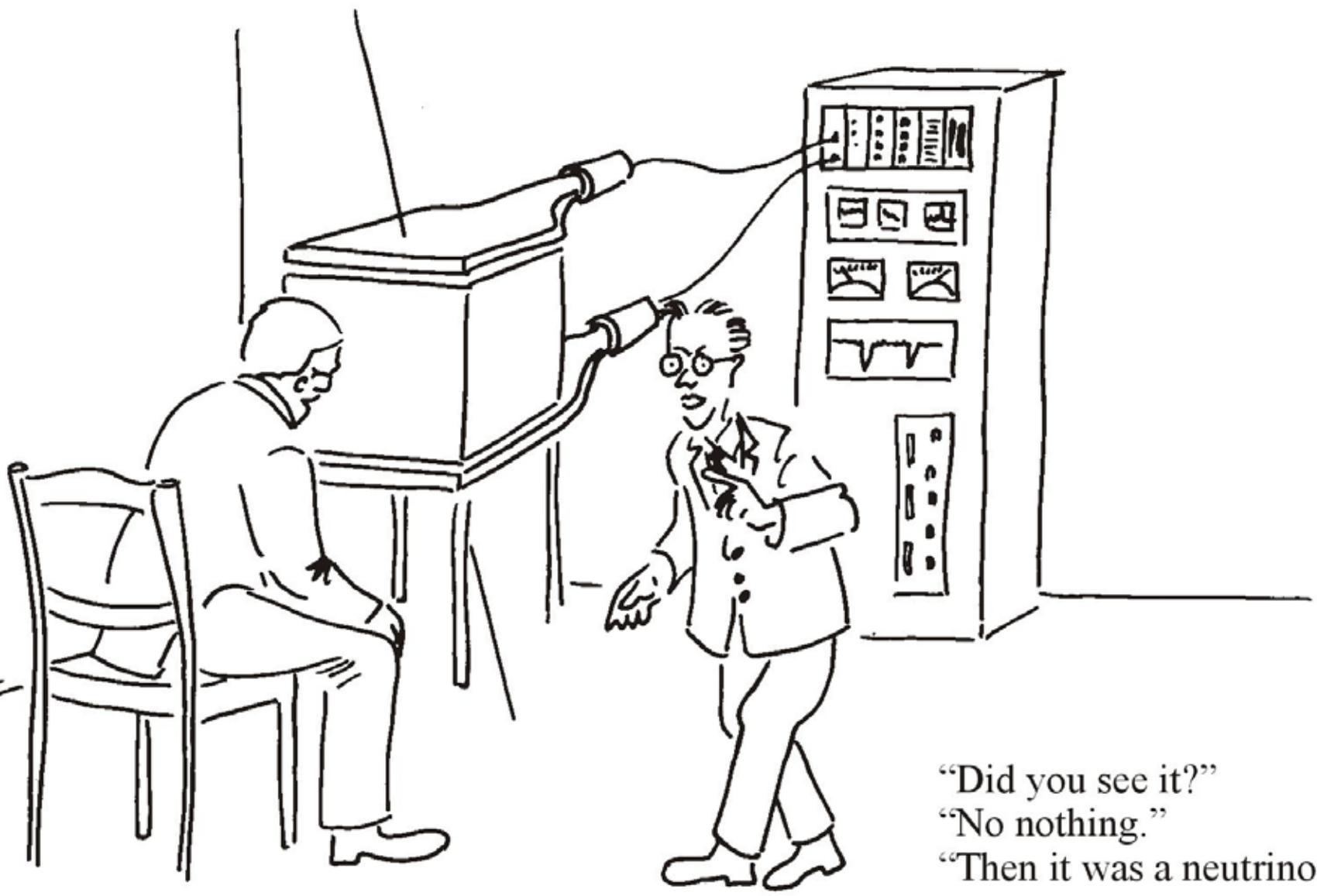
- Auslaufende Quarks binden sich zu neuen Teilchen
à Bündel von Hadronen („Jets“)

Historische Entdeckung des W

1983 am Super-Antiproton-Proton Synchrotron (S⁻ 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



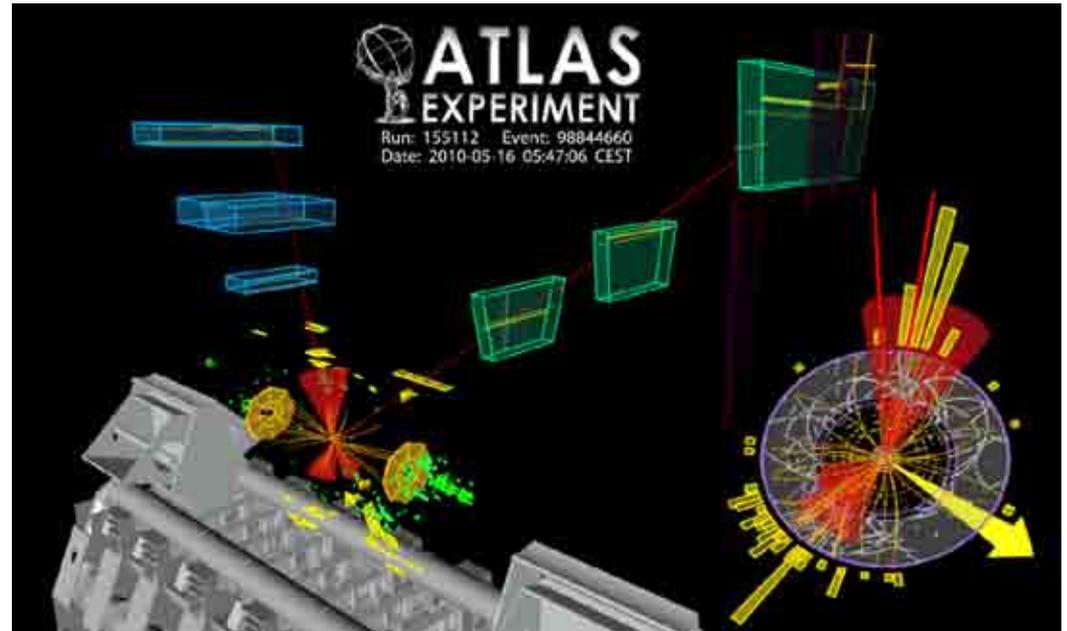
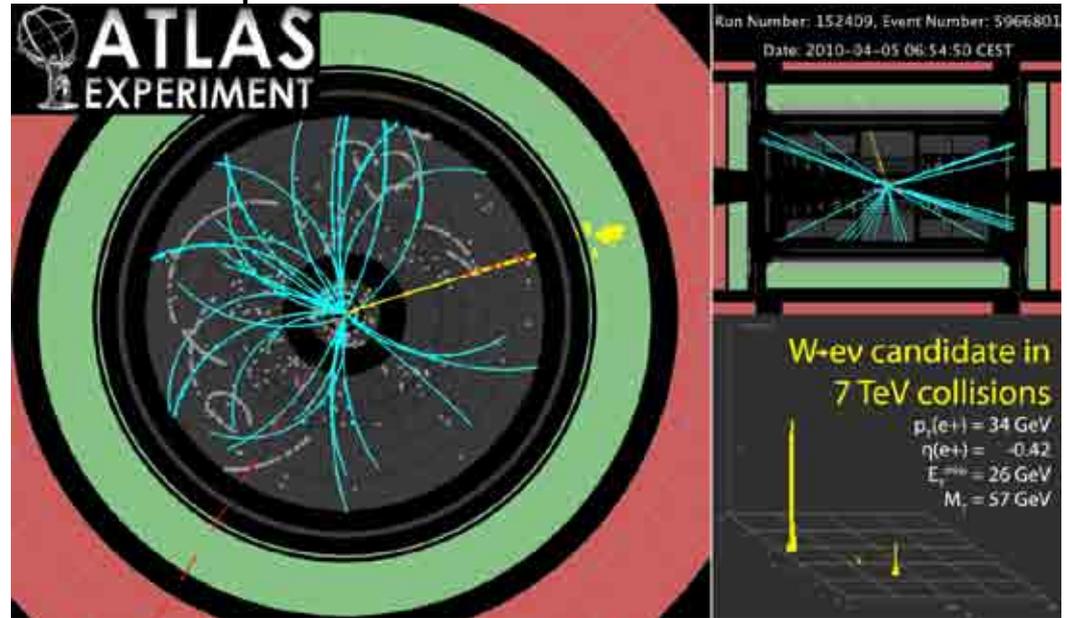
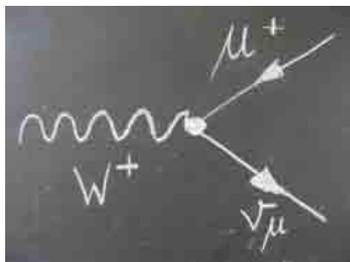
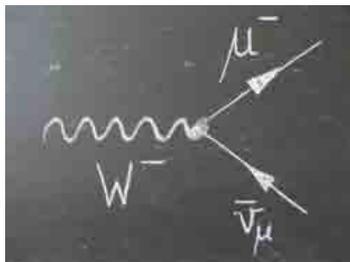
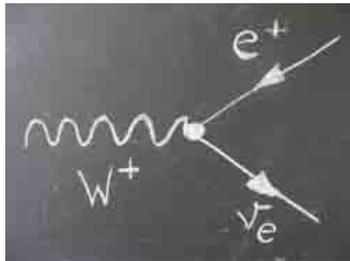
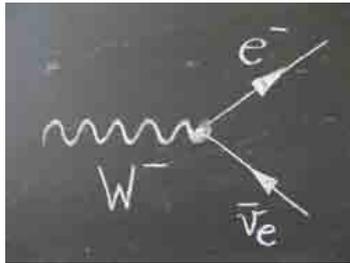


C. Guep

“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

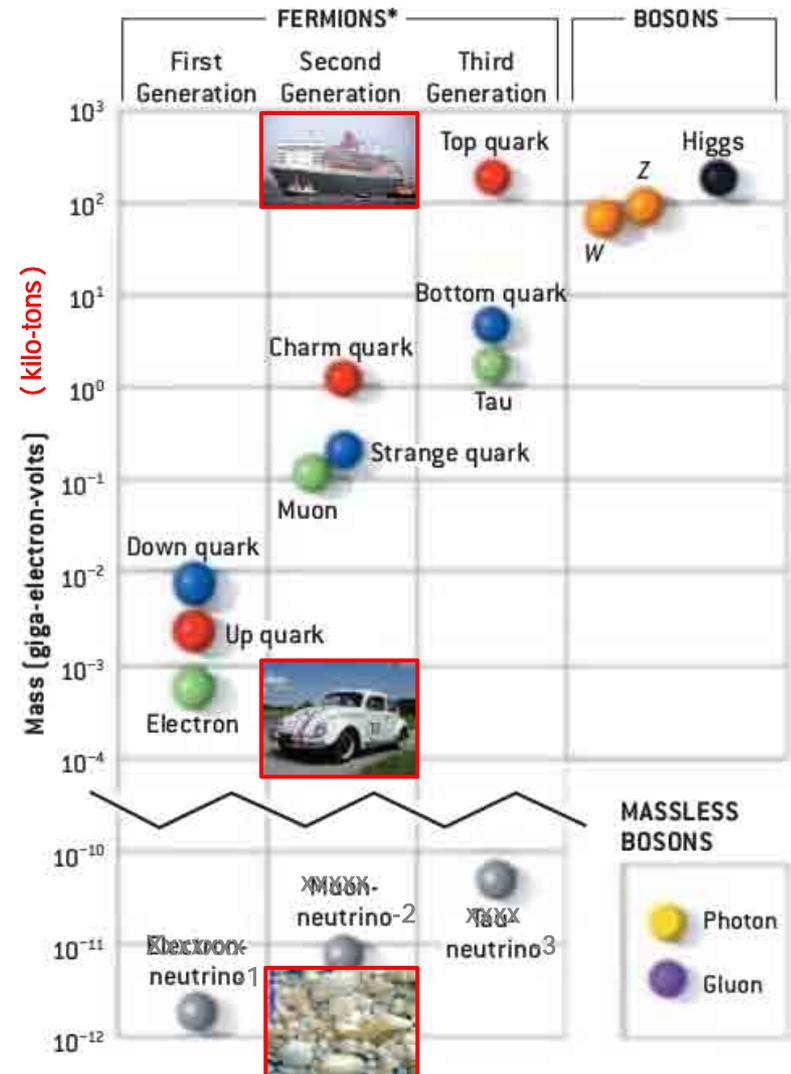
- n ~ Sandkorn
- e ~ Auto
- t ~ Ozeandampfer

✓ ... 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?



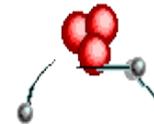
The Dawn of Physics Beyond the Standard Model, by Gordon Kane, Scientific American, June 2003

- ✓ 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

- ✓ 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

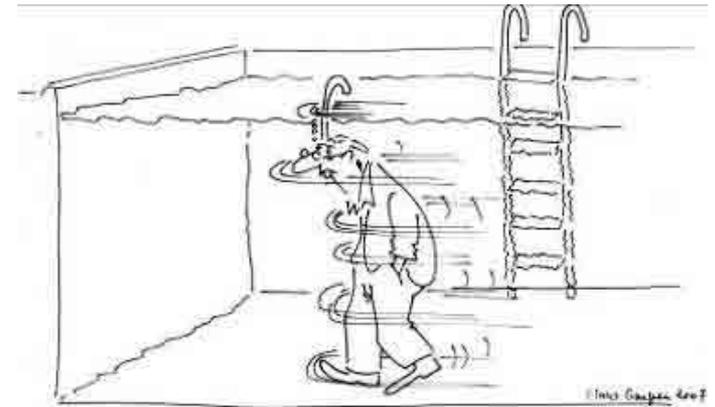
✓ "Leeres" Vakuum (ohne Hintergrundfeld)

- 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



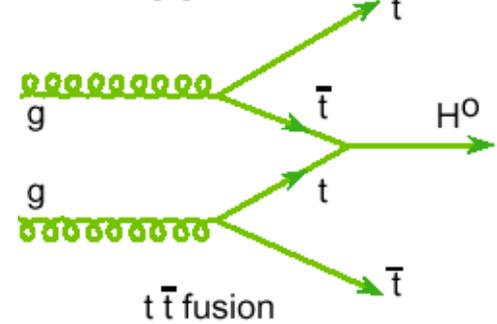
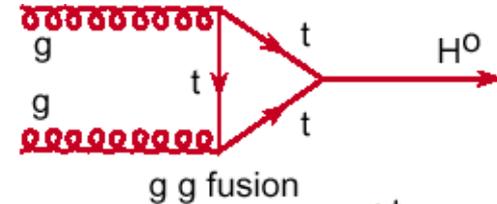
✓ Higgs-Teilchen

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



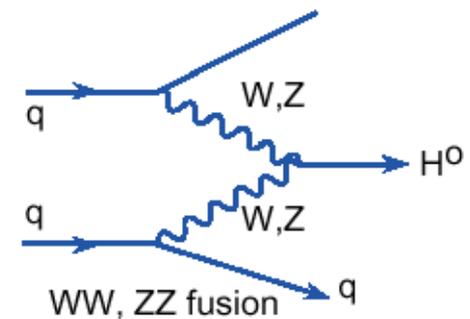
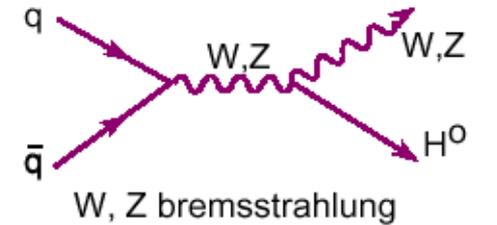
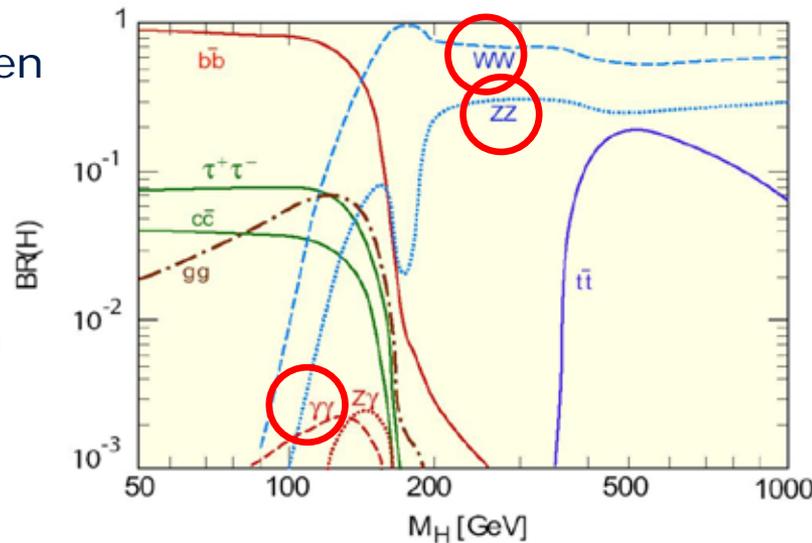
✓ Entdecke Hintergrundfeld d. Higgs-Boson Erzeugung

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



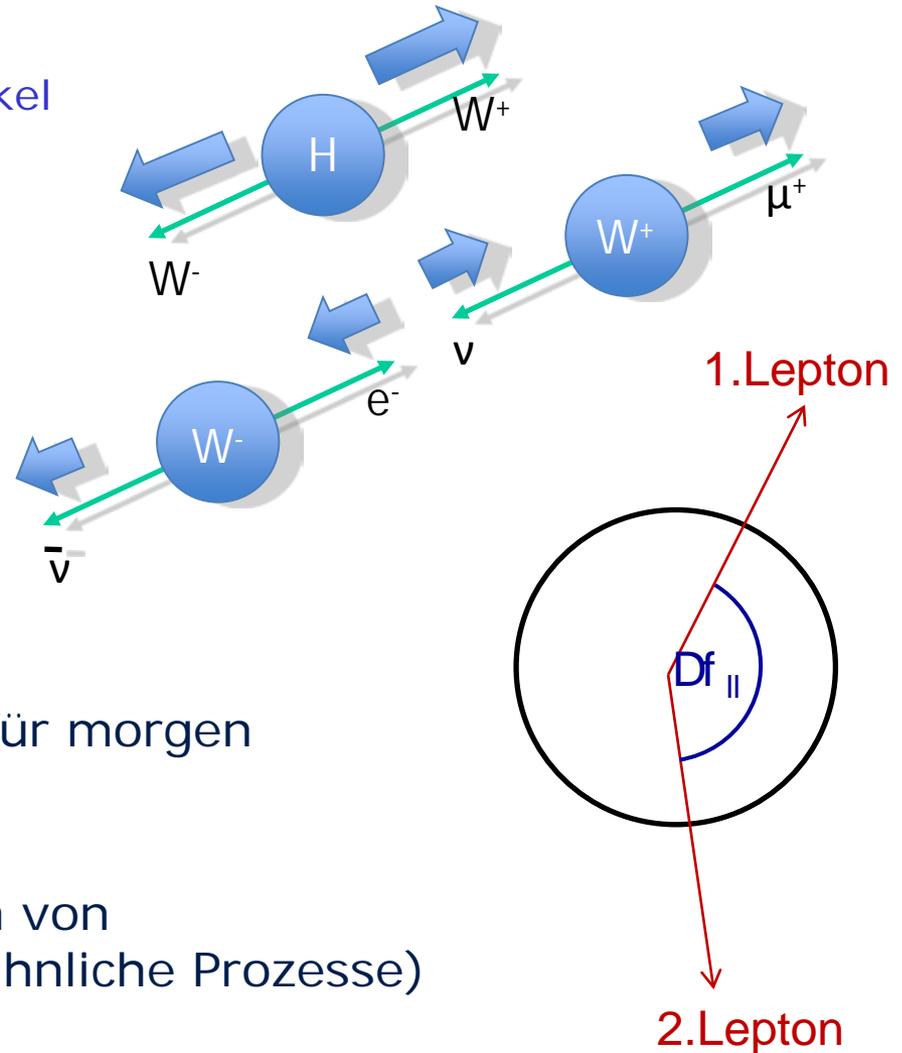
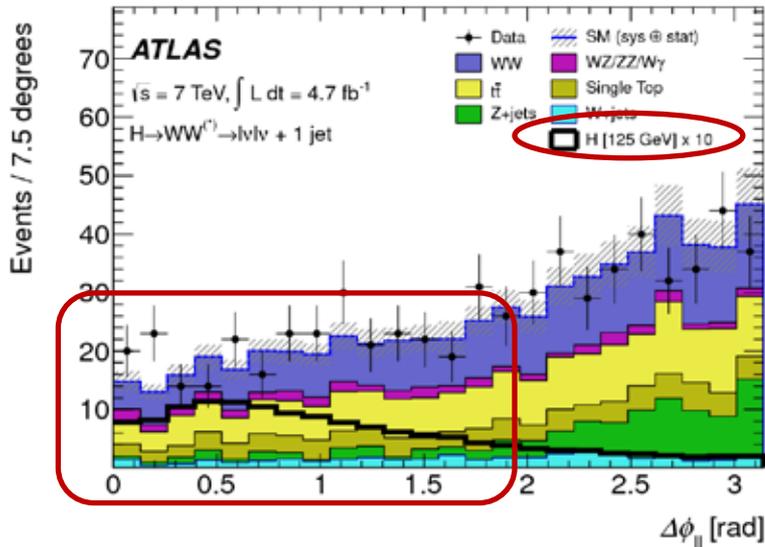
✓ Higgs Boson Zerfälle vorhersagbar

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



✓ Drehimpulsbetrachtungen:

- Leptonen aus H → W⁺W⁻ Zerfall bevorzugen kleine DF Öffnungswinkel



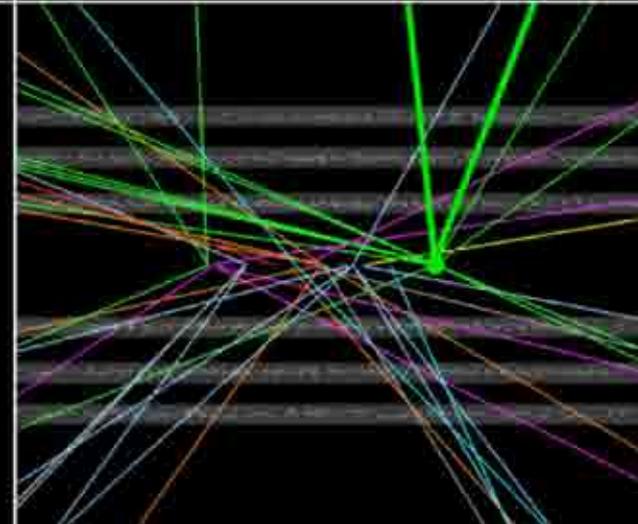
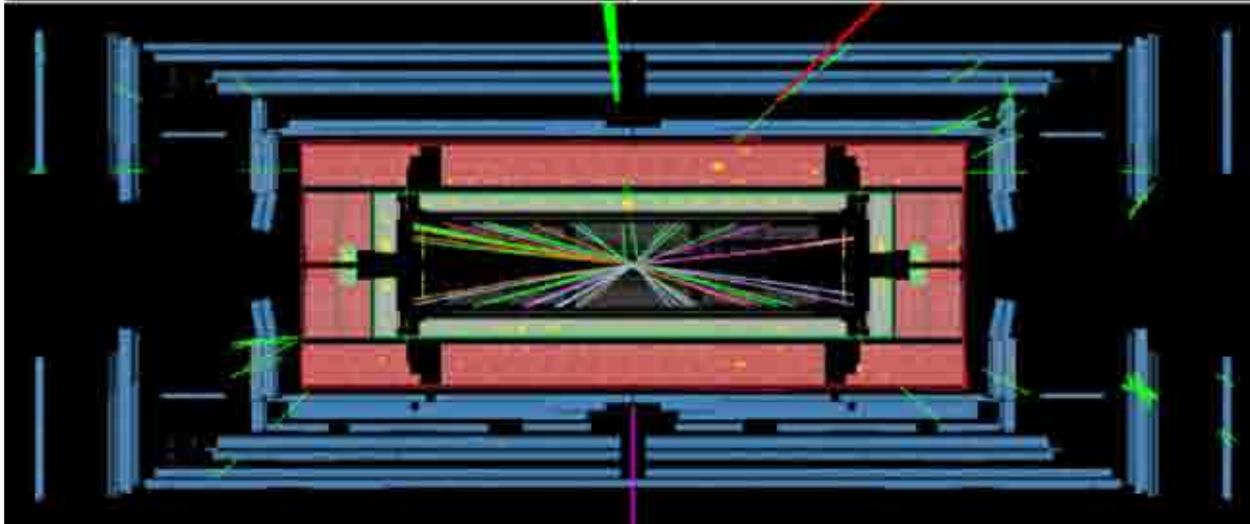
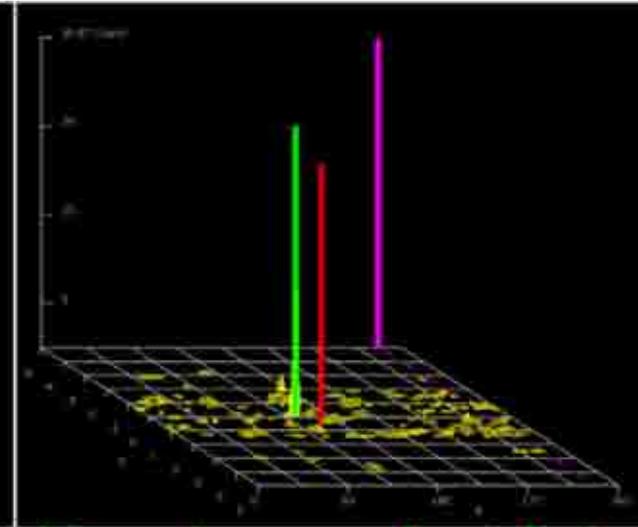
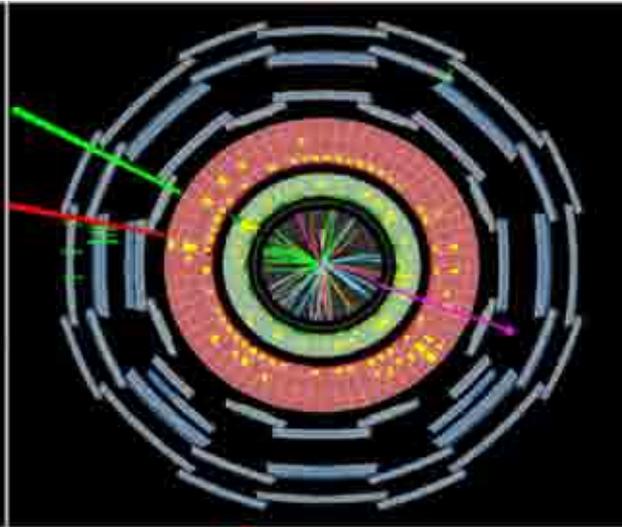
✓ Zweite (wählbare) Messaufgabe für morgen
 → Finden Sie solche Ereignisse
 und messen Sie die Winkel

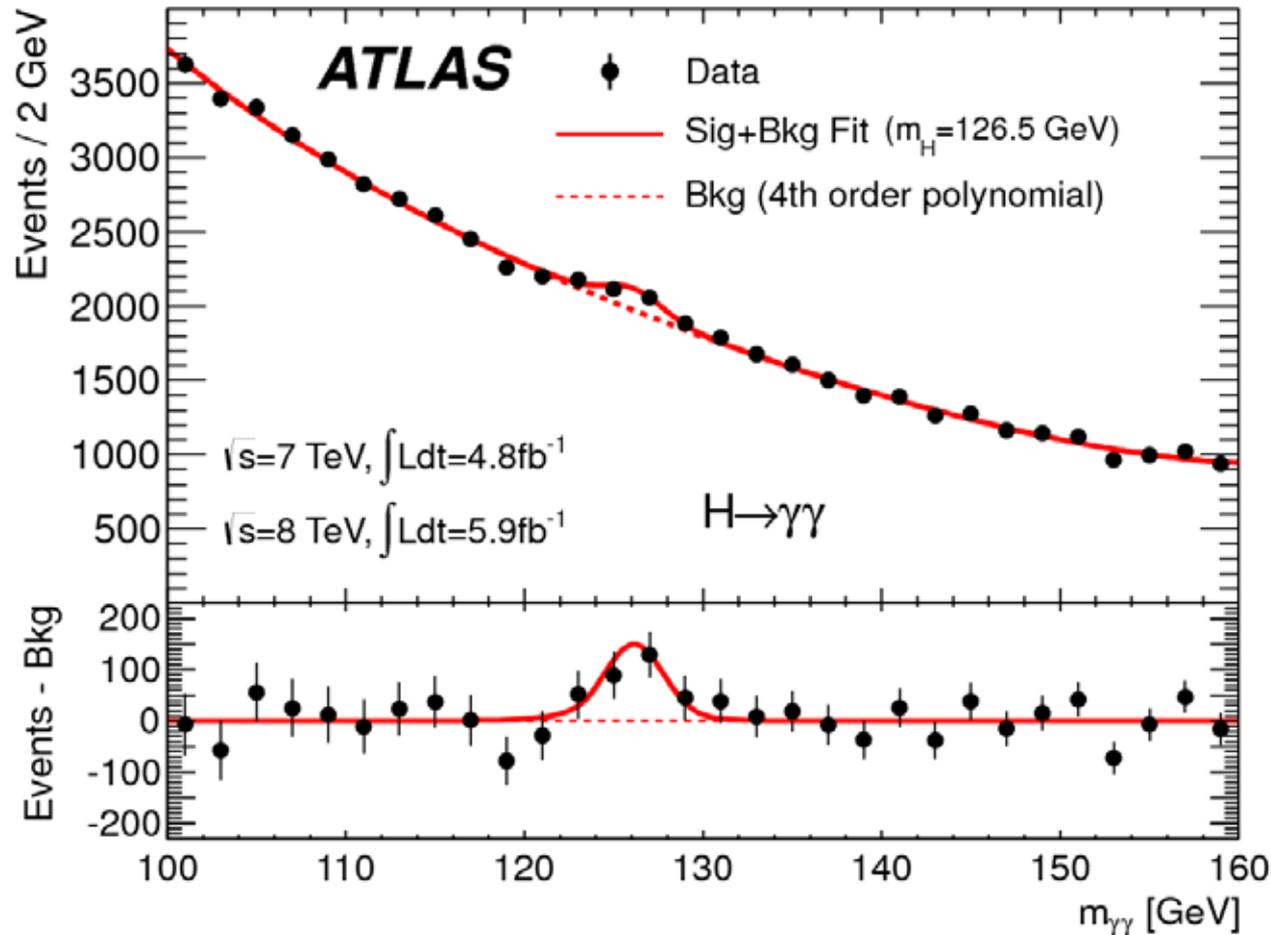
✓ In jedem Fall immer Kombination von
 Signal (Higgs) und Untergrund (ähnliche Prozesse)



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*

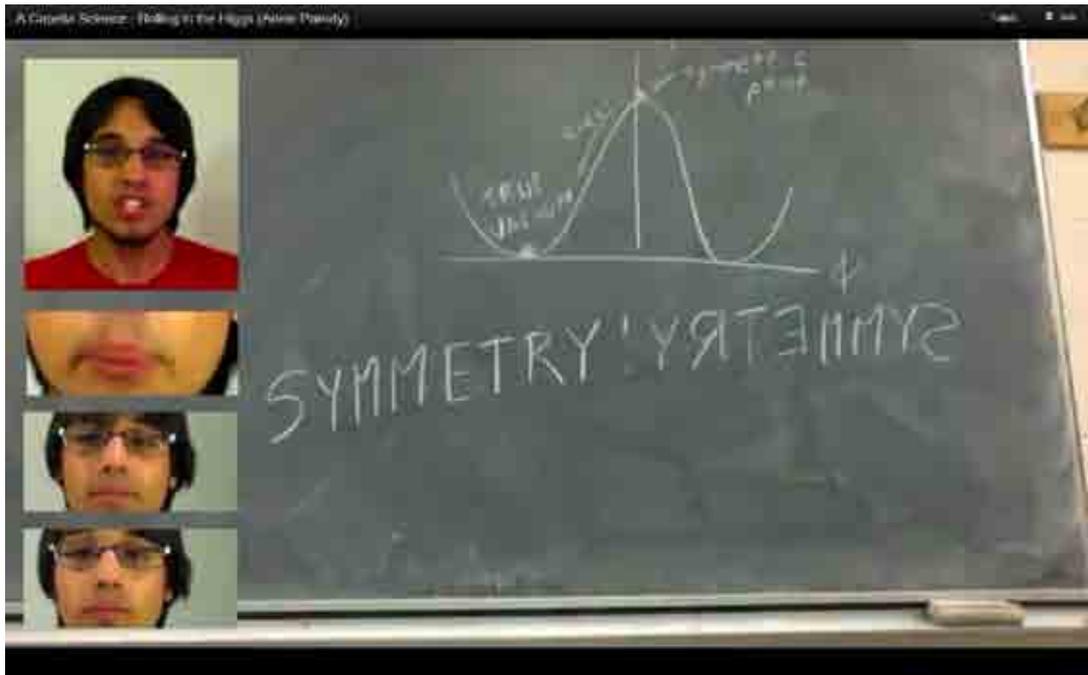
*Chorus:
 We could have had a model (Particle breakthrough, at the LHC)
 Without a scalar field (5-sigma result, could it be the Higgs)
 But symmetry requires no mass (Particle breakthrough, at the LHC)
 So we break it, with the Higgs (5-sigma result, could it be the Higgs)*

*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*

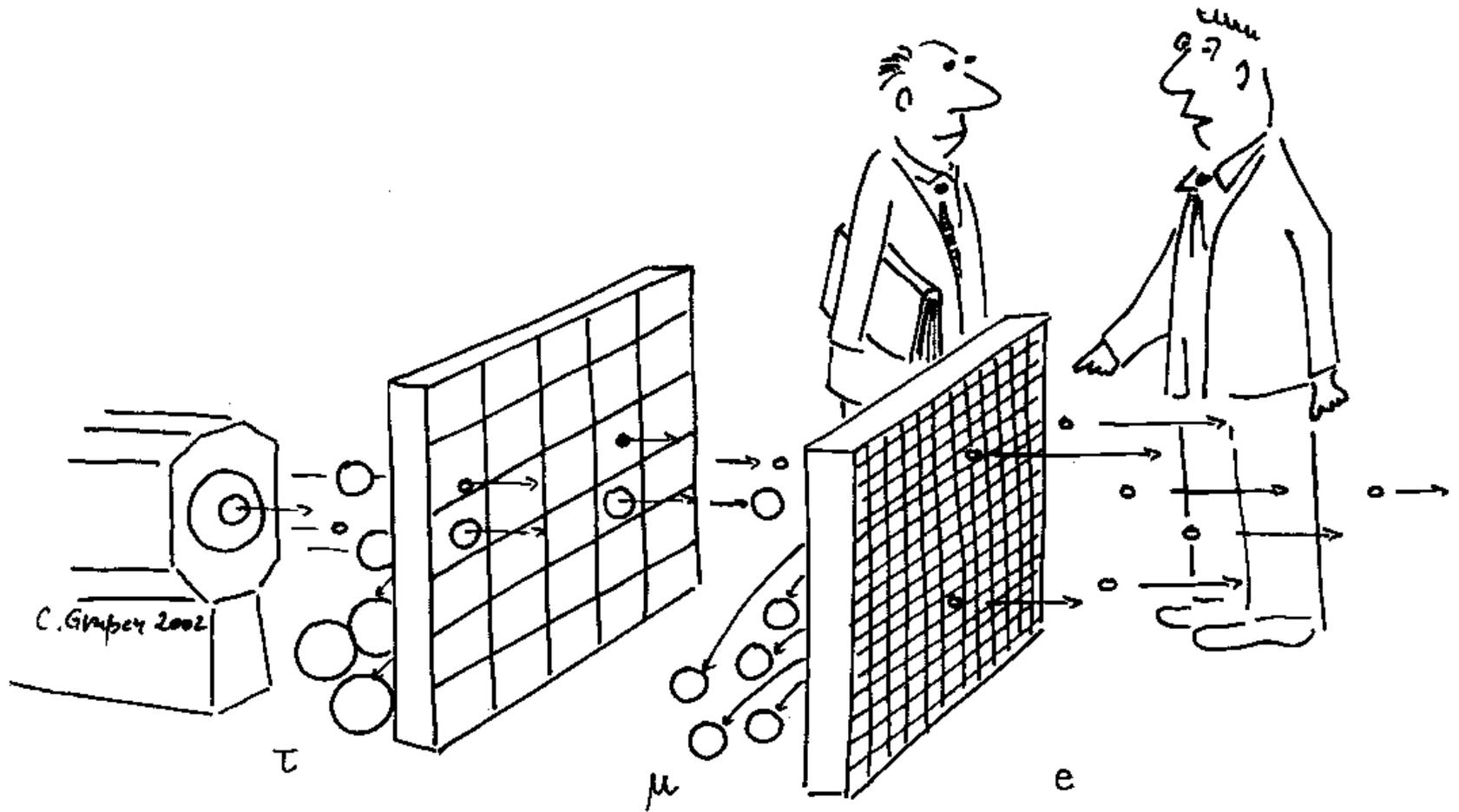
*Roll your vacuum to minimum potential
 Break your SU(2) down to massless modes
 Into mass terms of gauge bosons they go
 Fermions sink in like skiers into snow*

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



www.youtube.com/watch?v=VtltBX1I1VY

VIEL SPAß BEIM MESSEN!



"Our new lepton identifier!"