

# Warum haben Elementarteilchen eine Masse?

**Dr. Wolfgang F. Mader**  
Institut für Kern- und Teilchenphysik



„Naturwissenschaften Aktuell“  
1. Februar 2007

# Warum haben Elementarteilchen eine Masse?

## Inhaltsübersicht

- Was ist Masse
- Struktur der Materie und Wechselwirkungen
- Der Higgs Mechanismus
- Nachweis von Elementarteilchen
- Die Suche nach dem Higgs Teilchen
- Spin-off Technologien
- Ausblick

**Was ist Masse?**

# Sprachgebrauch: Masse und Gewicht

(nach <http://de.wikipedia.de>)

## Frage:

„Auf dem Mond ist die Anziehungskraft nur ein sechstel so groß.

Ein 90 kg schwerer Mensch wiegt also auf dem Mond nur 15 kg.“

# Sprachgebrauch: Masse und Gewicht

(nach <http://de.wikipedia.de>)

## Frage:

„Auf dem Mond ist die Anziehungskraft nur ein sechstel so groß.

Ein 90 kg schwerer Mensch wiegt also auf dem Mond nur 15 kg.“

## Antwort:

Der Fehler ist, dass die Masseneinheit Kilogramm als Einheit des Gewichts, also einer Kraft verwendet wird, die korrekt durch die Einheit Newton beschrieben werden müsste

# Sprachgebrauch: Masse und Gewicht

(nach <http://de.wikipedia.de>)

## Frage:

„Auf dem Mond ist die Anziehungskraft nur ein sechstel so groß.  
Ein 90 kg schwerer Mensch wiegt also auf dem Mond nur 15 kg.“

## Antwort:

Der Fehler ist, dass die Masseneinheit Kilogramm als Einheit des Gewichts, also einer Kraft verwendet wird, die korrekt durch die Einheit Newton beschrieben werden müsste

## Frage:

„Was ist schwerer: Ein Kilogramm Eisen oder ein Kilogramm Federn?“

# Sprachgebrauch: Masse und Gewicht

(nach <http://de.wikipedia.de>)

## Frage:

„Auf dem Mond ist die Anziehungskraft nur ein sechstel so groß.  
Ein 90 kg schwerer Mensch wiegt also auf dem Mond nur 15 kg.“

## Antwort:

Der Fehler ist, dass die Masseneinheit Kilogramm als Einheit des Gewichts, also einer Kraft verwendet wird, die korrekt durch die Einheit Newton beschrieben werden müsste

## Frage:

„Was ist schwerer: Ein Kilogramm Eisen oder ein Kilogramm Federn?“

## Antwort:

Man kann natürlich das Kilogramm Federn auf dem Mond wiegen und das Kilogramm Eisen auf der Raumstation ISS. Dann wäre das Kilogramm Eisen „leichter“, hätte also ein kleineres Gewicht, nämlich gar keines.

# Sprachgebrauch: Masse und Gewicht

(nach <http://de.wikipedia.de>)

## Frage:

„Auf dem Mond ist die Anziehungskraft nur ein sechstel so groß.  
Ein 90 kg schwerer Mensch wiegt also auf dem Mond nur 15 kg.“

## Antwort:

Der Fehler ist, dass die Masseneinheit Kilogramm als Einheit des Gewichts, also einer Kraft verwendet wird, die korrekt durch die Einheit Newton beschrieben werden müsste

## Frage:

„Was ist schwerer: Ein Kilogramm Eisen oder ein Kilogramm Federn?“

## Antwort:

Man kann natürlich das Kilogramm Federn auf dem Mond wiegen und das Kilogramm Eisen auf der Raumstation ISS. Dann wäre das Kilogramm Eisen „leichter“, hätte also ein kleineres Gewicht, nämlich gar keines.

**Vielfach werden im alltäglichen Sprachgebrauch Masse und Gewicht vermischt!!**

# Größenordnungen der Natur

Einheiten für Energie, Impuls und Masse

## Vergleich der Längen:

Ein Mensch ist ca.  $10^{18}$  so groß wie ein Elektron

## Vergleich der Massen

Ein Mensch ist ca.  $10^{33}$  mal so schwer wie ein Elektron

# Größenordnungen der Natur

Einheiten für Energie, Impuls und Masse

## Vergleich der Längen:

Ein Mensch ist ca.  $10^{18}$  so groß wie ein Elektron

## Vergleich der Massen

Ein Mensch ist ca.  $10^{33}$  mal so schwer wie ein Elektron

**Vergleich von Massen und Längen zwischen Mikro- und Makrokosmos  
nur wenig aussagekräftig!**

**Es ist sinnvoll, für Elementarteilchen eine andere Einheit zu verwenden**

# Größenordnungen der Natur

Einheiten für Energie, Impuls und Masse

## Vergleich der Längen:

Ein Mensch ist ca.  $10^{18}$  so groß wie ein Elektron

## Vergleich der Massen

Ein Mensch ist ca.  $10^{33}$  mal so schwer wie ein Elektron

**Vergleich von Massen und Längen zwischen Mikro- und Makrokosmos  
nur wenig aussagekräftig!**

**Es ist sinnvoll, für Elementarteilchen eine andere Einheit zu verwenden**

## Definition:

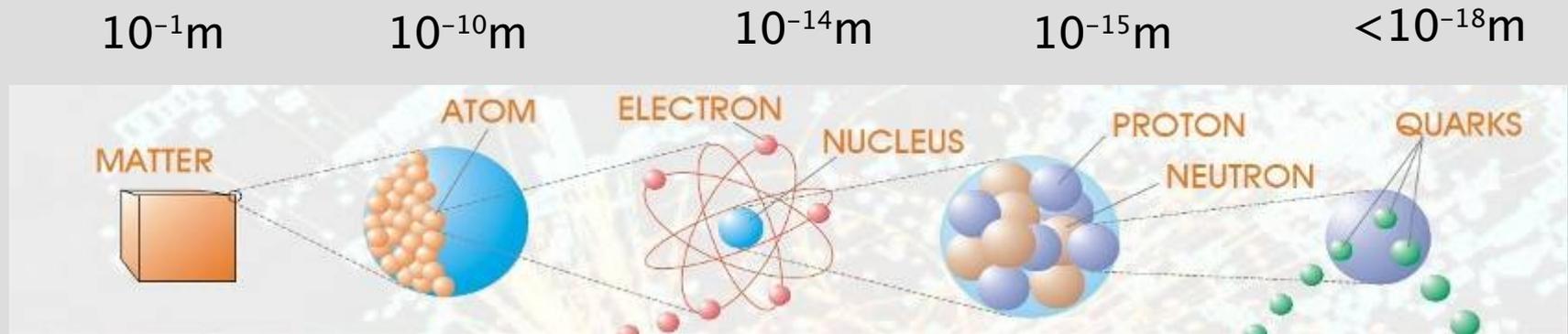
Ein Elektronvolt (1eV) ist die Energie, die ein Elektron beim Durchlaufen einer Spannung von 1V gewinnt

1 MeV	Megaelektronenvolt	$1 \cdot 10^6$ eV
1 GeV	Gigaelektronenvolt	$1 \cdot 10^9$ eV
1 TeV	Teraelektronenvolt	$1 \cdot 10^{12}$ eV

# Das Standardmodell der Teilchenphysik

# Struktur der Materie

## Größenordnungen



Festkörperphysik

Kernphysik

Atomphysik

Teilchenphysik

- Elementarteilchen
- Wechselwirkungen

# Struktur der Materie

Bausteine der Materie

Existierten unmittelbar nach dem Urknall  
Heute nur noch in kosmischer Strahlung oder an Teilchenbeschleunigern

LEPTONS	
These particles exist on their own	
Charge = -1	Charge = 0
<b>ELECTRON (<math>e^-</math>)</b> Responsible for electricity and chemical reactions. Mass = $0.51 \text{ MeV}/c^2$	<b>ELECTRON NEUTRINO (<math>\nu_e</math>)</b> Rarely interacts with other matter. Observed 1956.
<b>MUON (<math>\mu^-</math>)</b> A heavier relative of the electron. Discovered 1937. Mass = $0.106 \text{ GeV}/c^2$	<b>MUON NEUTRINO (<math>\nu_\mu</math>)</b> A relative of $\nu_e$ . Discovered 1962.
<b>TAU (<math>\tau^-</math>)</b> A heavier relative of the electron and muon. Discovered 1975. Mass = $1.78 \text{ GeV}/c^2$	<b>TAU NEUTRINO (<math>\nu_\tau</math>)</b> Indirect evidence 1975. Directly observed 2000.

QUARKS	
These particles only exist bound together	
Charge = +2/3	Charge = -1/3
<b>UP (<math>u</math>)</b> Mass ~ $3 \text{ MeV}/c^2$	<b>DOWN (<math>d</math>)</b> Mass ~ $6 \text{ MeV}/c^2$
Protons are made up of two up quarks and one down quark. Neutrons are made up of one up quark and two down quarks.	
<b>CHARM (<math>c</math>)</b> A heavier relative of the up quark. Discovered 1973. Mass ~ $1.2 \text{ GeV}/c^2$	<b>STRANGE (<math>s</math>)</b> A heavier relative of the down quark. Evidence 1947. Mass ~ $0.1 \text{ GeV}/c^2$
<b>TOP (<math>t</math>)</b> The heaviest quark. Discovered 1994. Mass ~ $175 \text{ GeV}/c^2$	<b>BOTTOM (<math>b</math>)</b> A heavier relative of the down and strange quarks. Discovered 1977. Mass ~ $4.2 \text{ GeV}/c^2$

# Wechselwirkungen

## Wechselwirkungen

- Verantwortlich für die Kräfte zwischen den Teilchen
- Verantwortlich für Teilchenzerfälle und Vernichtung

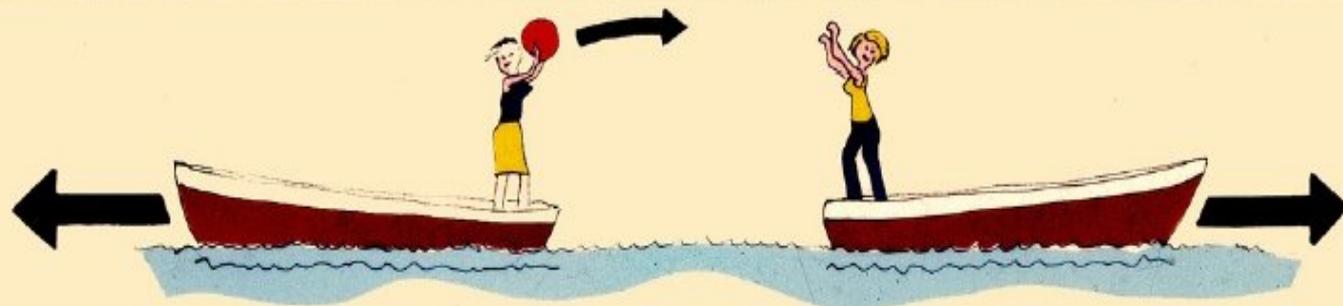
## 4 fundamentale Wechselwirkungen

- Gravitation (Schwerkraft)
- Elektromagnetische Wechselwirkung
  - **Verantwortlich für Elektromagnetismus**
- Schwache Wechselwirkung
  - **Verantwortlich für z.B. Radioaktiven Zerfall**
- Starke Wechselwirkung
  - **Bindung der Quarks/Nukleonen im Atomkern**

# Wechselwirkungen

## THE FORCES IN NATURE

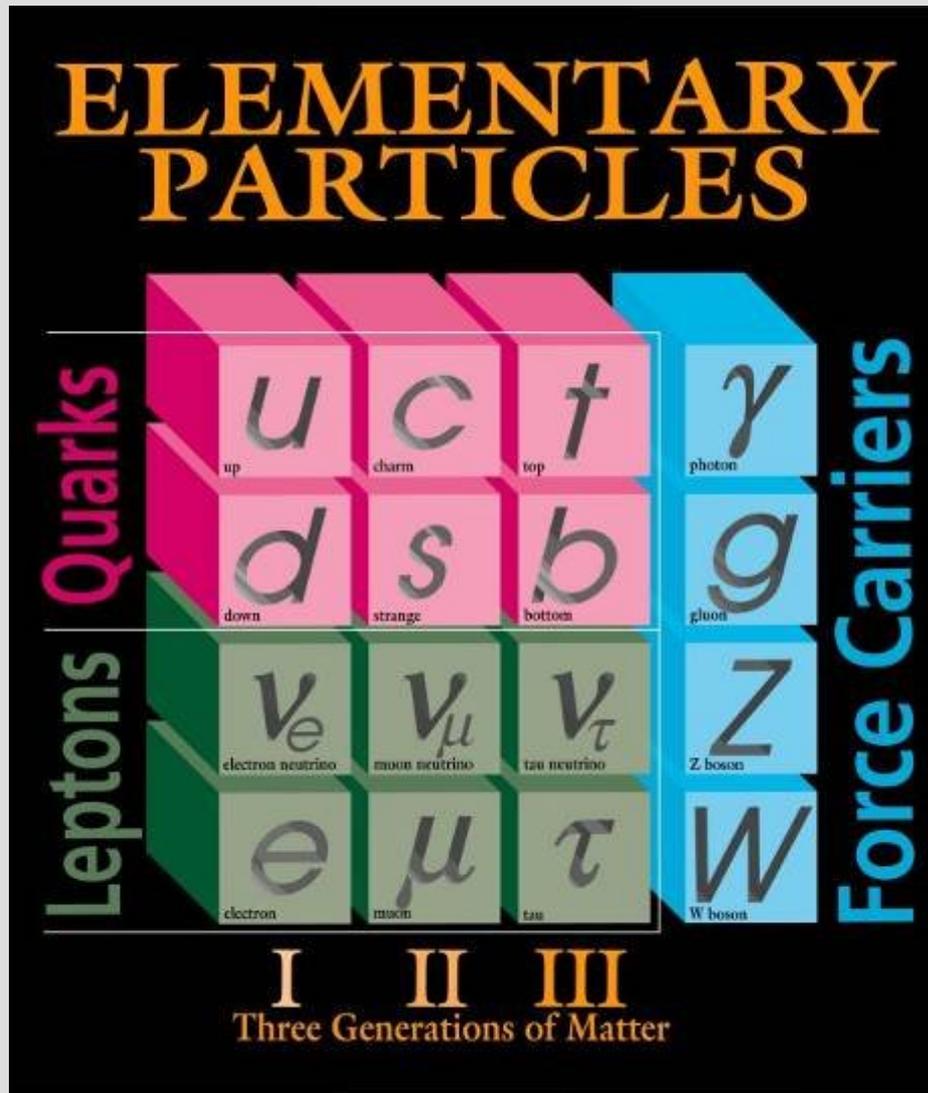
TYPE	INTENSITY OF FORCES (DECREASING ORDER)	BINDING PARTICLE (FIELD QUANTUM)	OCCURS IN:
STRONG NUCLEAR FORCE	$\sim 1$	GLUONS (NO MASS)	ATOMIC NUCLEUS
ELECTRO-MAGNETIC FORCE	$\sim \frac{1}{1000}$	PHOTON (NO MASS)	ATOMIC SHELL ELECTROTECHNIQUE
WEAK NUCLEAR FORCE	$\sim \frac{1}{100000}$	BOSONS $Z^0, W^+, W^-$ (HEAVY)	RADIOACTIVE BETA DESINTEGRATION
GRAVITATION	$\sim 10^{-38}$	GRAVITON ?	HEAVENLY BODIES



THE EXCHANGE OF PARTICLES IS RESPONSIBLE FOR THE FORCES

# Das Standardmodell der Teilchenphysik

(Zusammenfassung)



## Theorie:

Alle Elementarteilchen im Standardmodell wären **masselos!**

## Ausweg:

Einführung eines weiteren Teilchens

**Das Higgsteilchen**

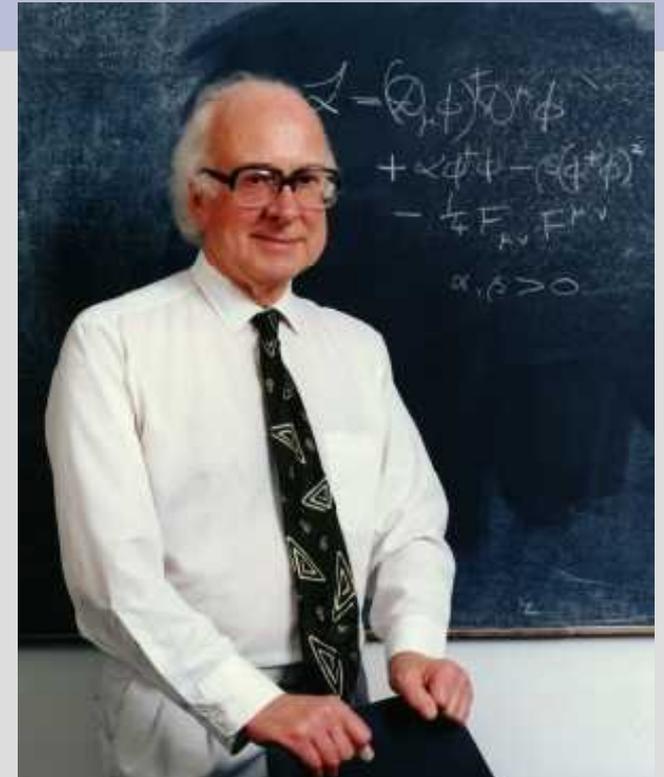
# Der Higgs Mechanismus

# Erklärung der Masse

Es ist immer noch unverstanden, was Masse ist, und warum Quarks und Leptonen unterschiedliche Massen haben.

Unsere zur Zeit beste Idee ist, dass ein überall vorhandenes Hintergrundfeld (Higgs Feld) dafür verantwortlich ist.

Die Masse eines Teilchen ist dann ein Maß für den Widerstand welches es bei seiner Bewegung durch dieses Feld erfährt.



Peter Ware Higgs  
(\* 29.05.1929)

# Der Higgs Mechanismus

(nach David Miller, University College)



**Physik:** Das Higgs Feld füllt als Hintergrundfeld das gesamte Universum

**Analogie:** Man stelle sich einen Raum vor in dem sich Physiker während einer Cocktailparty unterhalten

# Der Higgs Mechanismus

(nach David Miller, University College)



**Physik:** Ein in der Theorie ursprünglich masseloses Teilchen erhält durch die Wechselwirkung mit dem Hintergrundfeld eine Masse.

**Analogie:** Ein berühmter Physiker betritt den Raum. Eine Mensentraube bildet sich um ihn herum, welche seine Geschwindigkeit verlangsamt.

# Der Higgs Mechanismus

(nach David Miller, University College)



**Physik:** Das Higgsteilchen ist der Anregungszustand des Hintergrundfeldes.

**Analogie:** Jemand streut ein Gerücht in den Raum. Es bildet sich wieder eine Menschentraube während sich das Gerücht verbreitet

# ... und was ist mit masselosen Teilchen wie dem Photon?



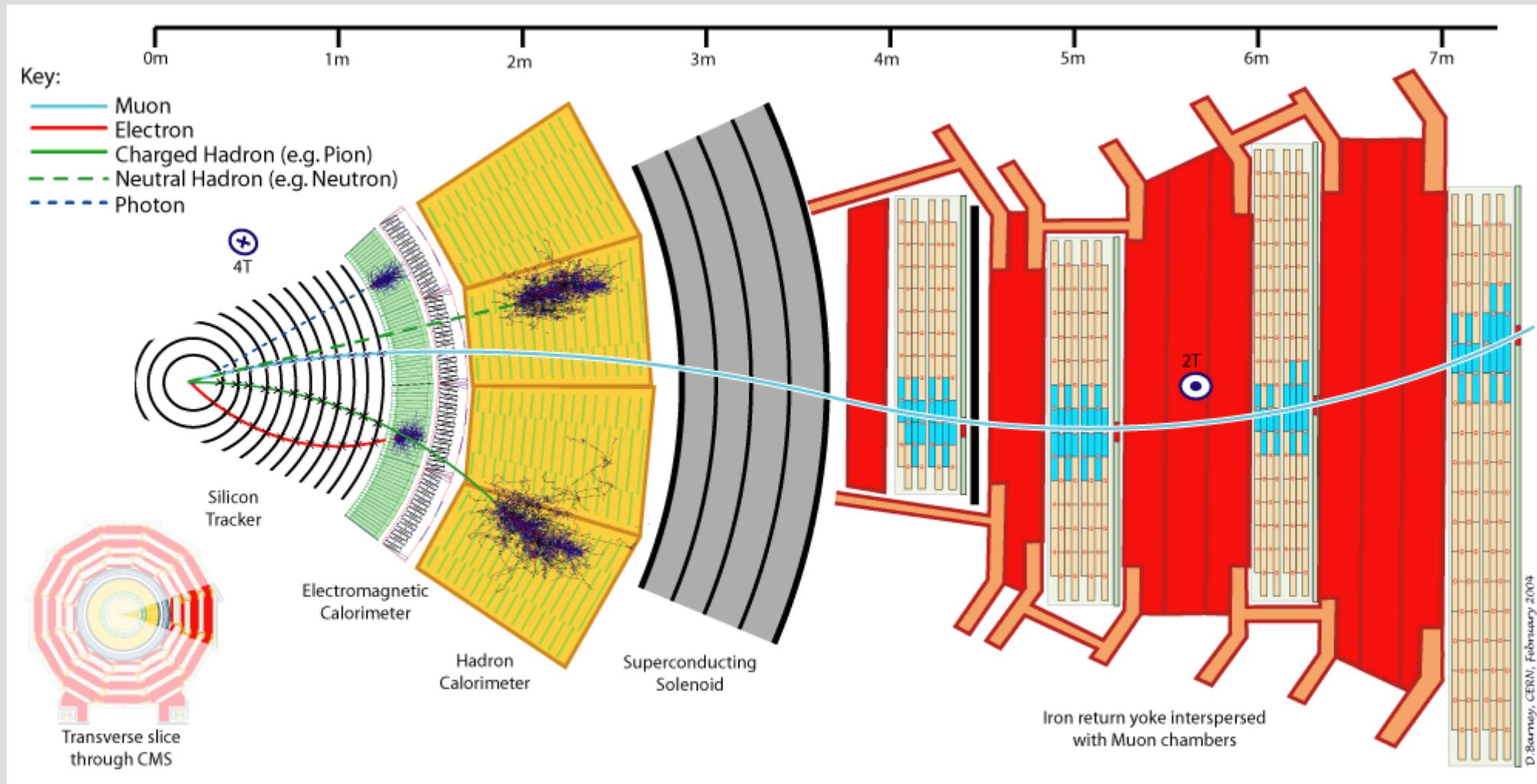
**Physik:** Masselose Teilchen bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit.

**Analogie:** Der arme Student der an diesem Abend die Cocktails reichen muss bewegt sich schnell und ungehindert durch den vollen Raum.

# Nachweis von Elementarteilchen

# Nachweis von Elementarteilchen

(am Beispiel CMS)

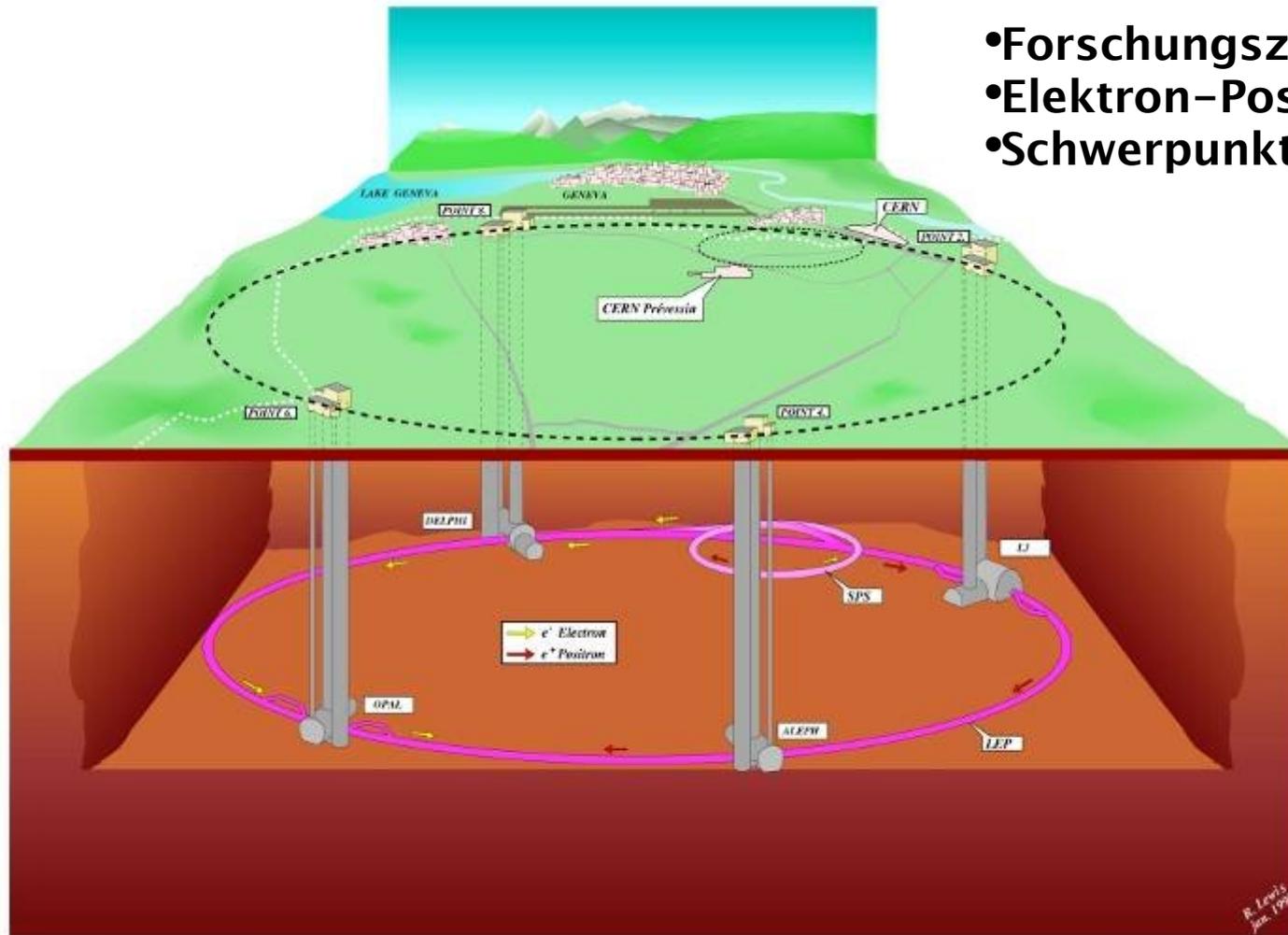


**Was wissen wir heute über das  
Higgs Boson?!?**

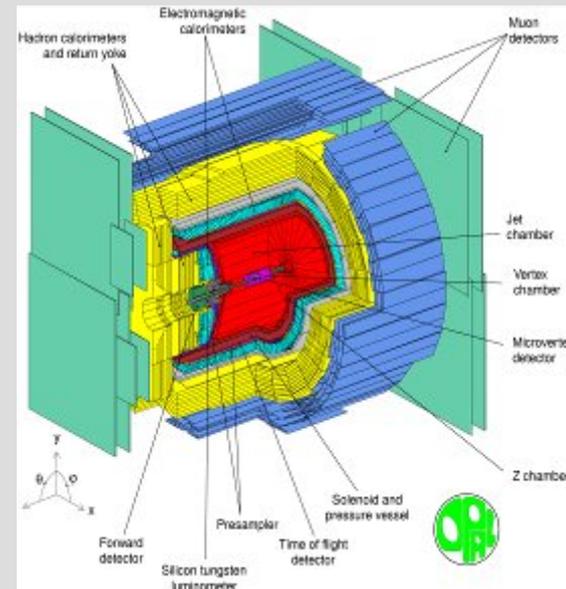
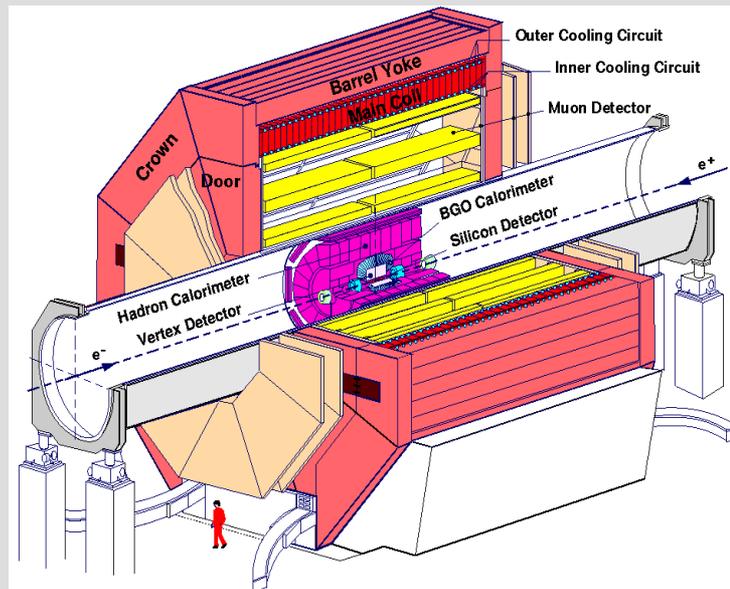
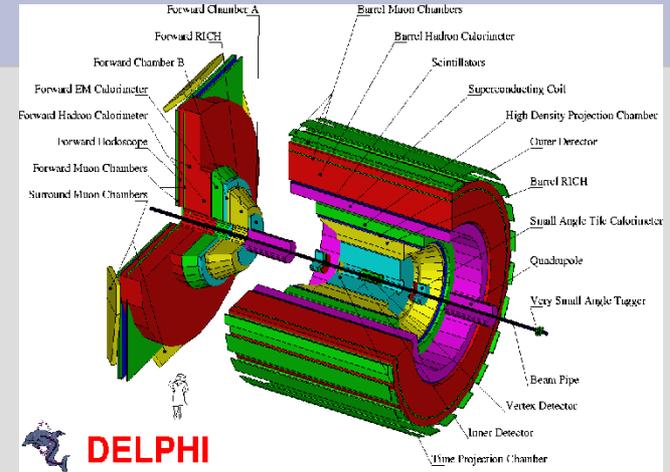
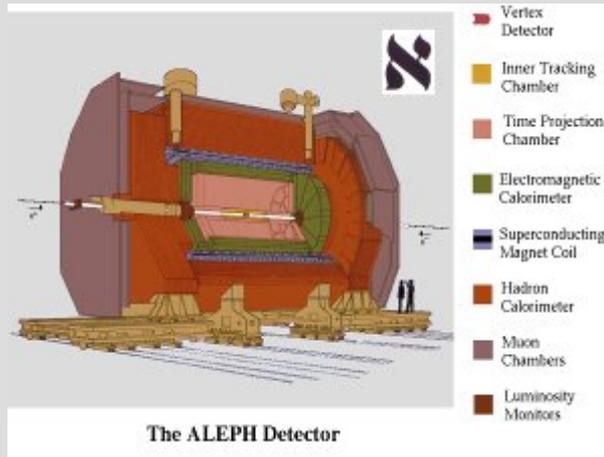
# Der LEP Beschleuniger

1989–2000

- Forschungszentrum CERN/Genf
- Elektron-Positron Kollisionen
- Schwerpunktsenergie (90–209)GeV

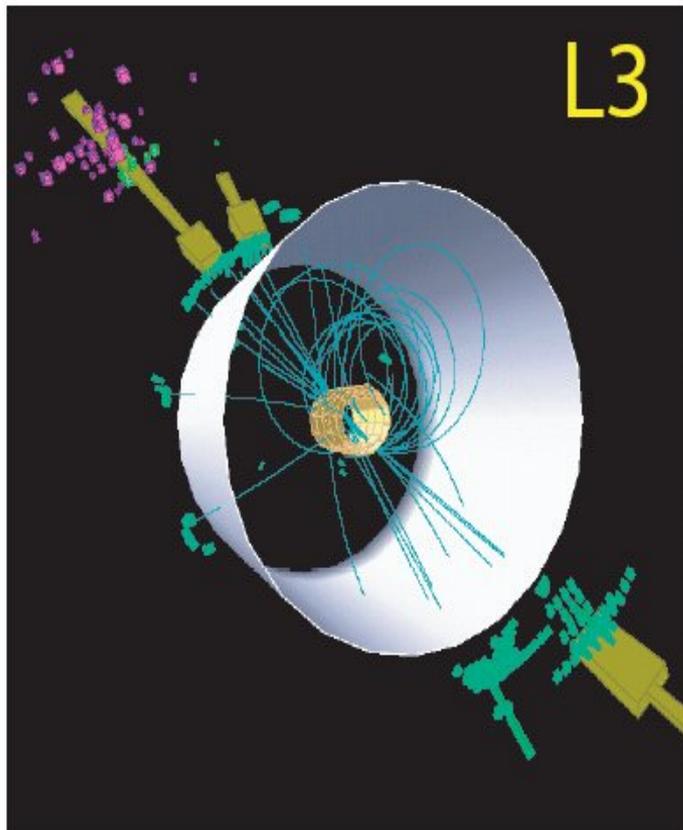


# Die 4 LEP Experimente



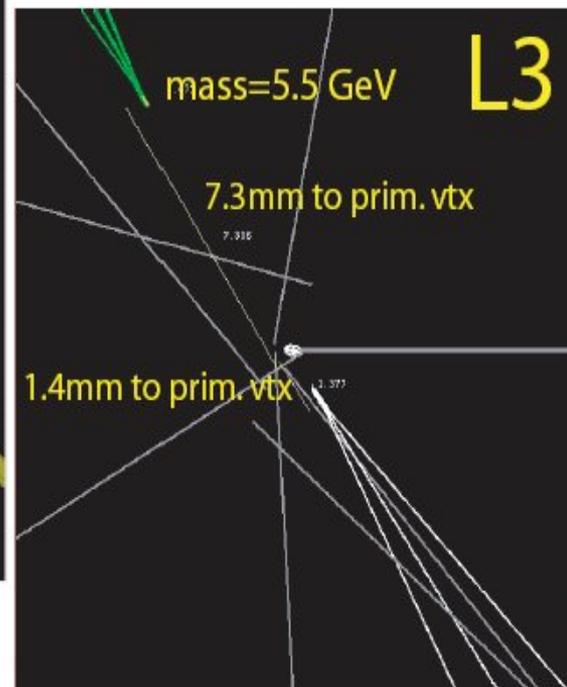
# Ein HIGGS Kandidat

most significant  $H\nu\nu$  candidate

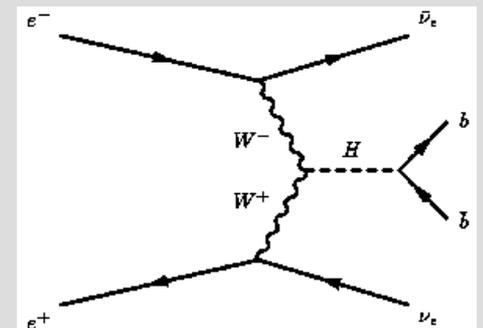
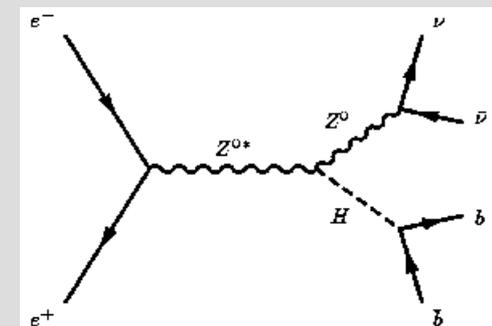


measured H mass = 114.4 GeV  
H mass resolution  $\sim 3$  GeV

Secondary vtx's view

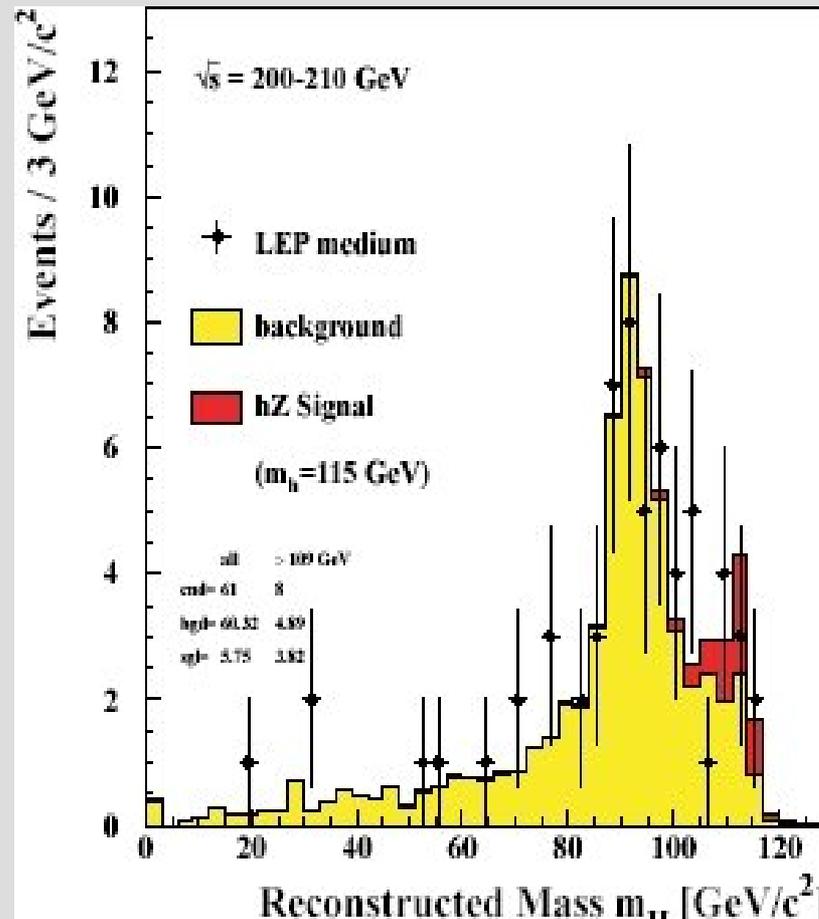


Produktion von Higgs Bosonen:



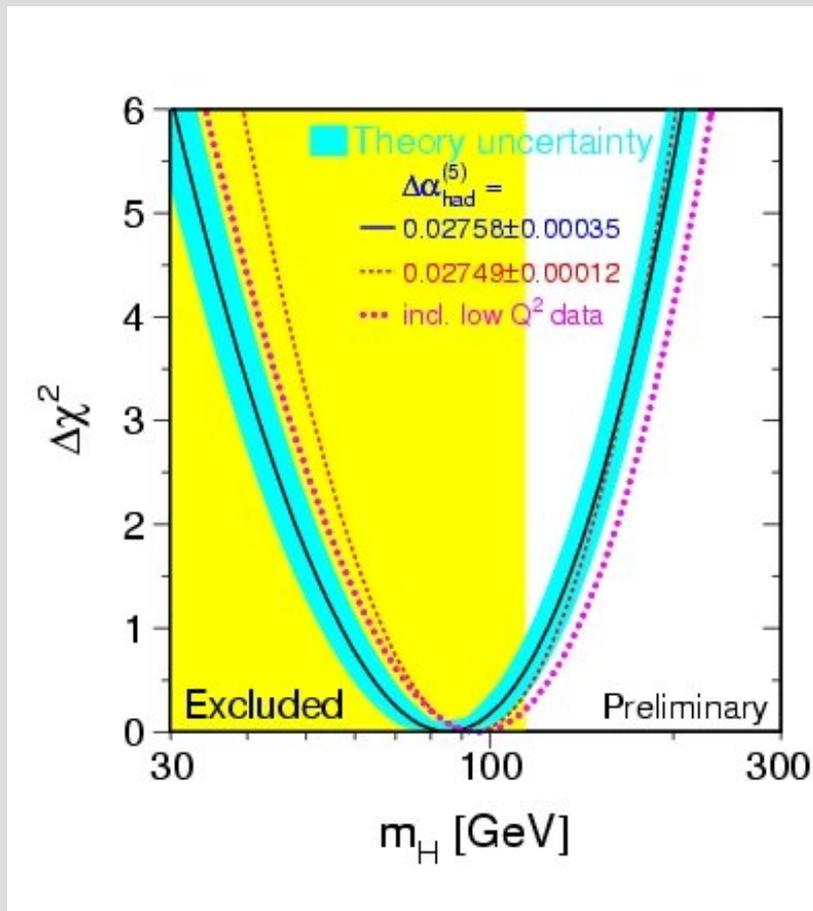
# ...und was wissen wir jetzt über das Higgs?!?

Das Higgsteilchen konnte bei LEP nicht entdeckt werden!!



# ...und was wissen wir jetzt über das Higgs?!?

Das Higgsteilchen konnte bei LEP nicht entdeckt werden!!



**Aber:**

Das Higgs ist wahrscheinlich leicht

$$(100\text{GeV} < m_{\text{Higgs}} < 200\text{ GeV})$$

Eine direkte Suche nach dem Higgs-Teilchen bei LEP ergab

$$m_{\text{Higgs}} > 114\text{ GeV}$$

# Beschleuniger und Detektoren

# Conseil Européen de la Recherche Nucléaire (CERN)



**Europäisches Forschungszentrum in Genf/CH  
Kollider-Ring mit 27km Umfang  
ca. 100m unter der Erde**



# Conseil Européen de la Recherche Nucléaire (CERN)



## Fakten zum LHC

Proton-Proton Kollisionen bei Energien von 7TeV / Proton  
ca. 2808 Proton-Pakete pro Strahl  
Jedes Paket mit ca. 100 Milliarden Protonen

## ...und in den Detektoren

Kollisionsrate 40Mhz --> 1 Kollision / 25 ns (=0,000.000.025 s)  
Pro Kollision ca. 20 Wechselwirkungen

## Die Datenmenge

Datenvolumen: 400 MByte/s  
in 10 Jahren: 1 000 000 000 Milliarden Ereignisse

**Beginn der Datennahme Frühjahr 2008**

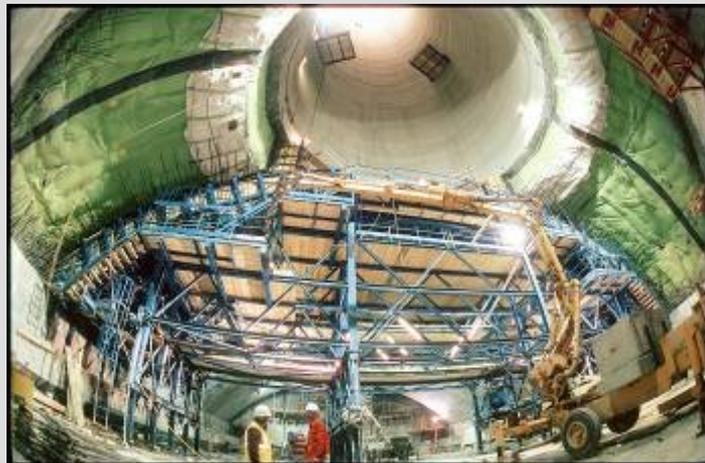
# CERN und LHC

## Die Maschine



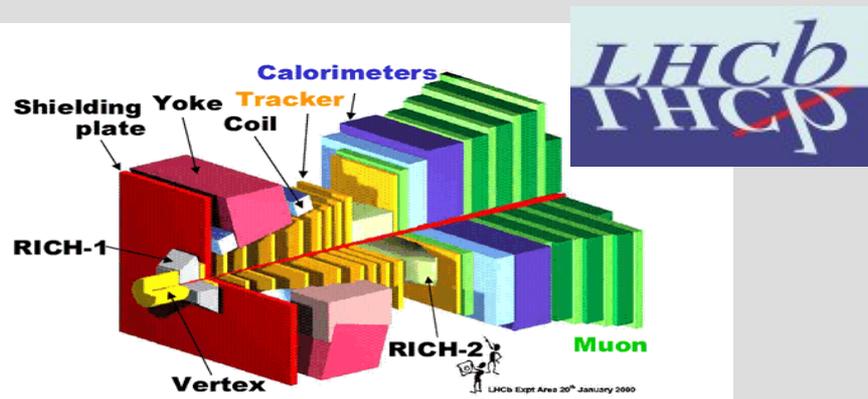
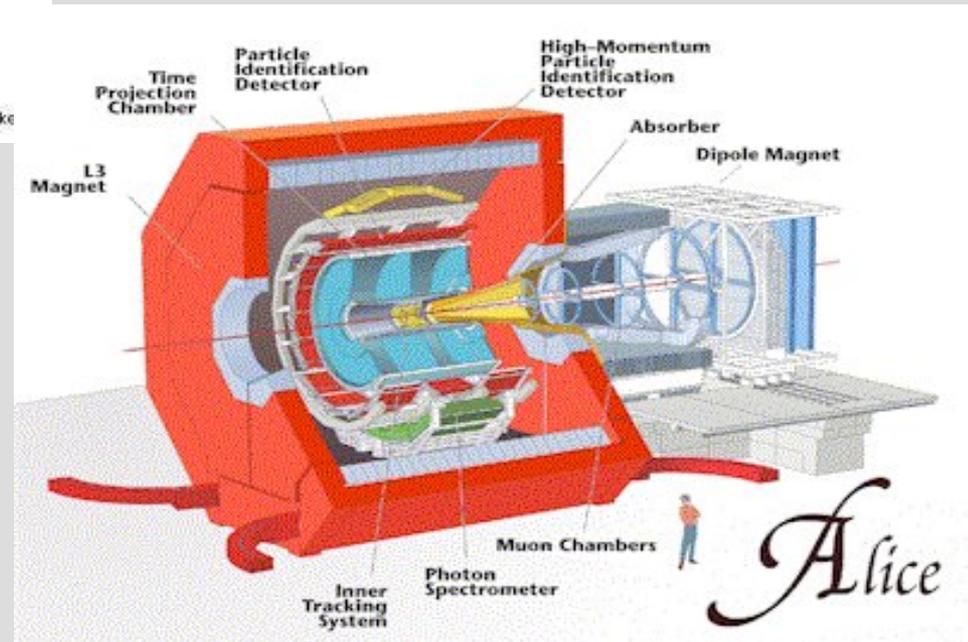
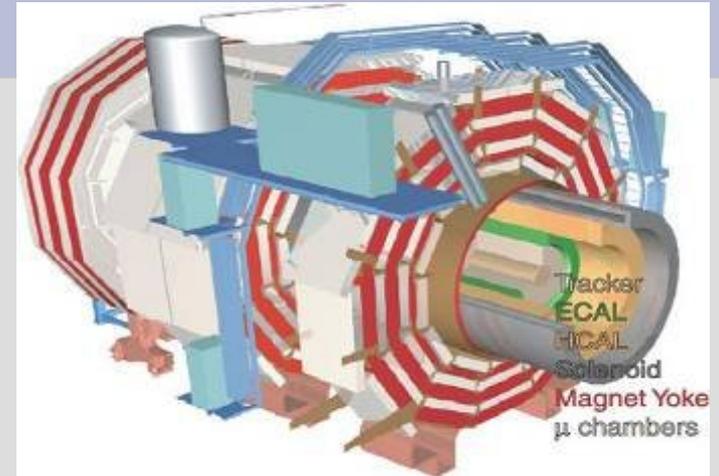
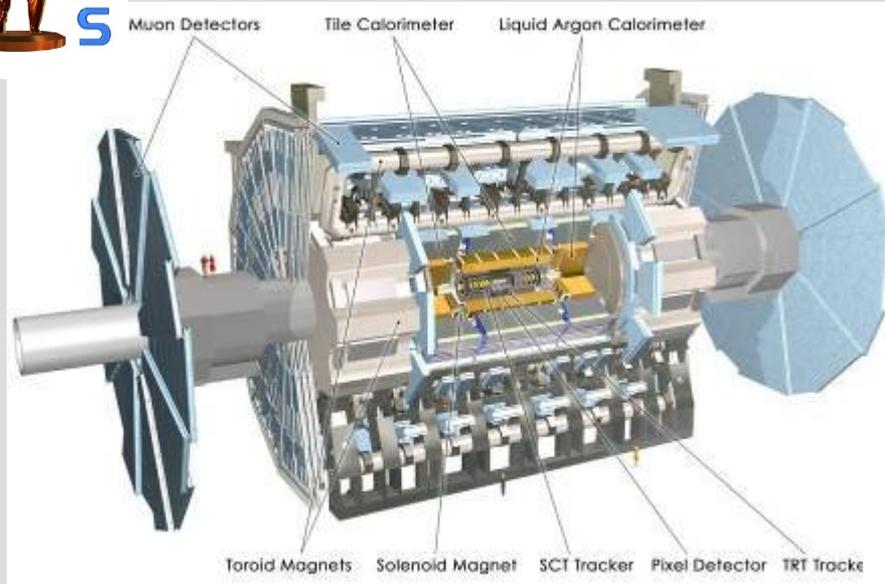
# CERN und LHC

## Die Experimentierhallen

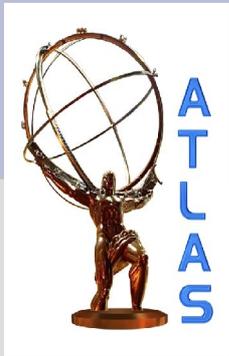


# CERN und LHC

## Die Experimente

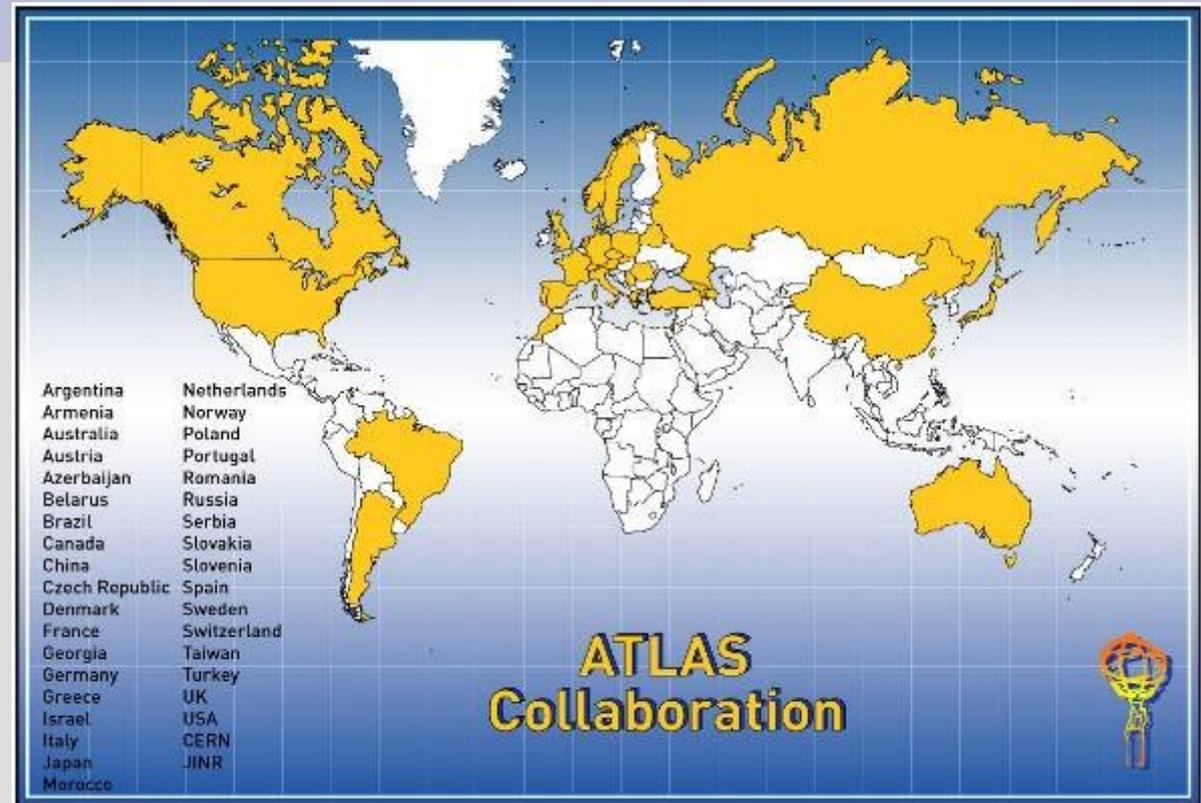


# Das ATLAS Experiment



An ATLAS beteiligt sind  
**161** Institute aus **35** Ländern  
 (Stand September 2006)

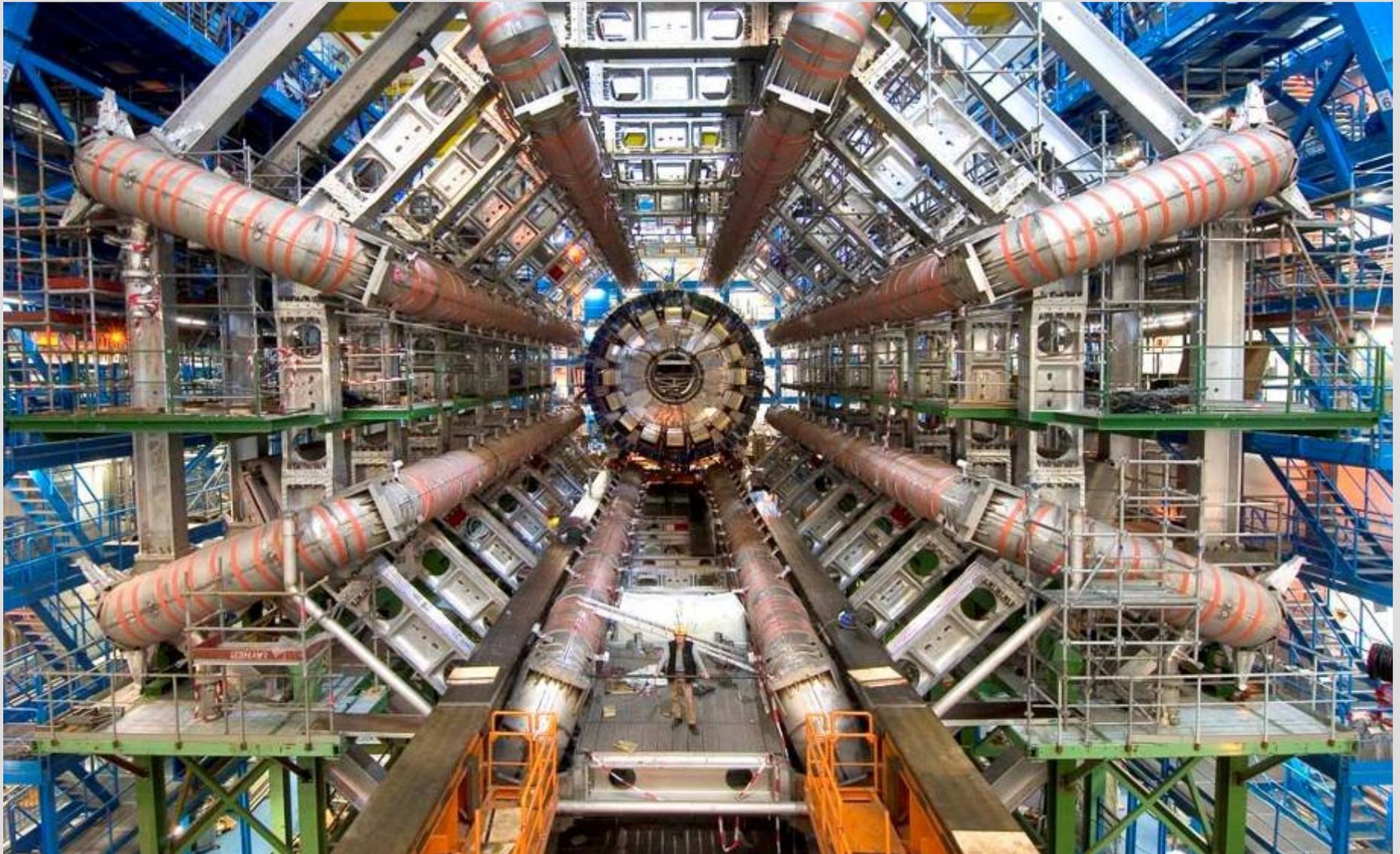
**1830** Wissenschaftler



Albany, Alberta, NIKHEF Amsterdam, Ankara, LAPP Ancey, Argonne NL, Arizona, UT Arlington, Athens, NTU Athens, Baku, IFAE Barcelona, Belgrade, Bergen, Berkeley LBL and UC, **HU Berlin**, Bern, Birmingham, Bologna, **Bonn**, Boston, Brandeis, Bratislava/SAS Kosice, Brookhaven NL, Buenos Aires, Bucharest, Cambridge, Carleton, Casablanca/Rabat, CERN, Chinese Cluster, Chicago, Clermont-Ferrand, Columbia, NBI Copenhagen, Cosenza, AGH UST Cracow, **DESY**, **Dortmund**, **TU Dresden**, JINR Dubna, Duke, Frascati, **Freiburg**, Geneva, Genoa, **Giessen**, Glasgow, LPSC Grenoble, Technion Haifa, Hampton, Harvard, **Heidelberg**, Hiroshima, Hiroshima IT, Indiana, Innsbruck, Iowa SU, Irvine UC, Istanbul Bogazici, KEK, Kobe, Kyoto, Kyoto UE, Lancaster, UN La Plata, Lecce, Lisbon LIP, Liverpool, Ljubljana, QMW London, RHBNC London, UC London, Lund, UA Madrid, **Mainz**, Manchester, Mannheim, CPPM Marseille, Massachusetts, MIT, Melbourne, Michigan, Michigan SU, Milano, Minsk NAS, Minsk NCPHEP, Montreal, McGill Montreal, FIAN Moscow, ITEP Moscow, MEPhI Moscow, MSU Moscow, **LMU**, **MPI Munich**, Nagasaki IAS, Naples, New Mexico, New York, Nijmegen, BINP Novosibirsk, Ohio SU, Okayama, Oklahoma, Oklahoma SU, Oregon, LAL Orsay, Osaka, Oslo, Oxford, Paris VI and VII, Pavia, Pennsylvania, Pisa, Pittsburgh, CAS Prague, CU Prague, TU Prague, IHEP Protvino, Ritsumeikan, UFRJ Rio de Janeiro, Rochester, Rome I, Rome II, Rome III, Rutherford Appleton Laboratory, DAPNIA Saclay, Santa Cruz UC, Sheffield, Shinshu, **Siegen**, Simon Fraser Burnaby, SLAC, Southern Methodist Dallas, NPI Petersburg, Stockholm, KTH Stockholm, Stony Brook, Sydney, AS Taipei, Tbilisi, Tel Aviv, Thessaloniki, Tokyo ICEPP, Tokyo MU, Toronto, TRIUMF, Tsukuba, Tufts, Udine, Uppsala, Urbana UI, Valencia, UBC Vancouver, Victoria, Washington, Weizmann Rehovot, Wisconsin, **Wuppertal**, Yale, Yerevan

# Das ATLAS Experiment

(Stand: Oktober 2005)



# Das ATLAS Experiment

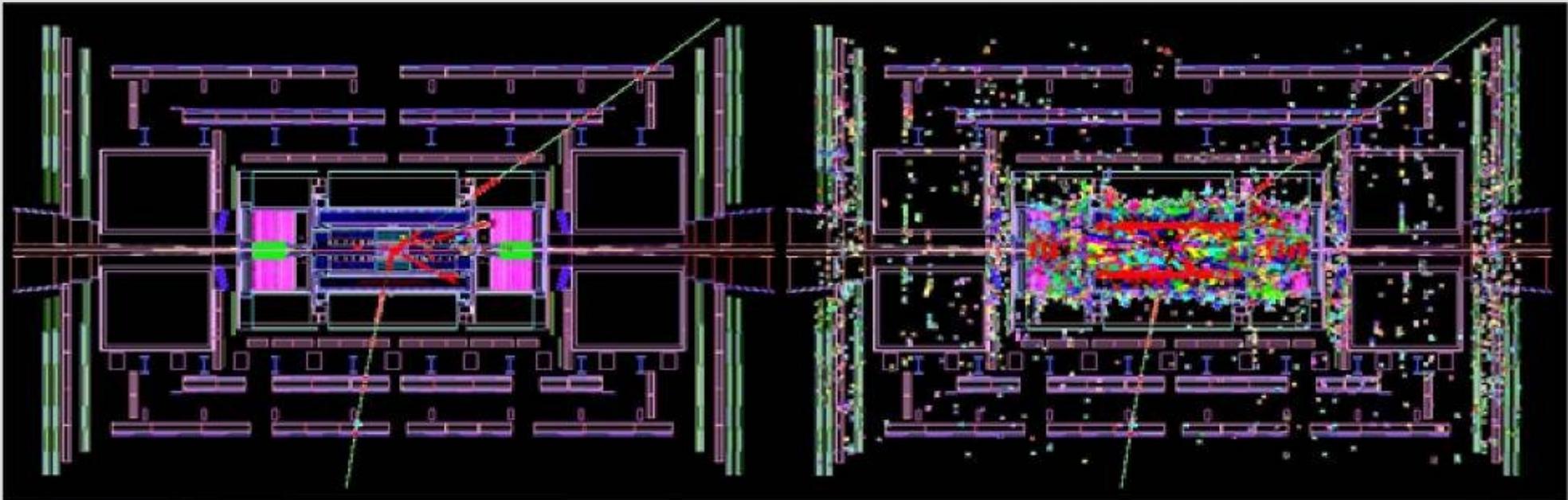
(Stand: Gestern)

**Webcam:**

<http://atlas.ch/webcams.html>



# Das Higgs Boson in ATLAS



**Idealisiertes Bild der Erzeugung eines Higgs-Bosons, wie es im ATLAS Detektor erwartet wird (links). Das Higgs-Boson zerfällt hier in zwei Z-Bosonen, welche ihrerseits wiederum in zwei Elektronen (rote Spuren) bzw. zwei Myonen (rot-grüne Spuren) zerfallen. Experimentell erschwert wird die Identifikation solcher Ereignisse z.B. durch die Überlagerung einer großen Anzahl von Untergrundereignissen, welche in einem Proton-Proton Speicherring wie dem LHC gleichzeitig stattfinden.**

# Die 'Teflon-Pfanne' der Teilchenphysik

(Spin-Off Technologien - einige Beispiele)

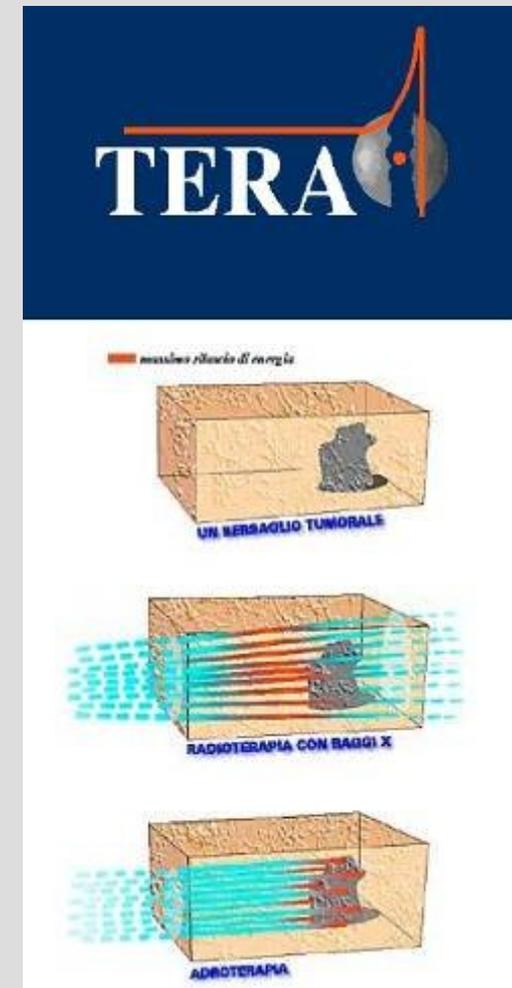
# Tera - Heilen mit Hadronen

## Entwicklung initiiert vom CERN

Prof. Hugo Amaldi

Übliche Strahlentherapie schädigt nicht nur den Tumor, sondern auch das Gewebe davor und dahinter

Hadron Strahlung kann auch in der Tiefe sehr genau lokalisiert werden



# Das World-Wide Web

## Entwicklung am CERN (http-Protokoll)

### Technisches Problem:

Kommunikation in großen internationalen Kollaborationen

### Innerhalb von 10 Jahren:

Weltweiter Siegeszug. Heute fast in jedem Haushalt vorhanden

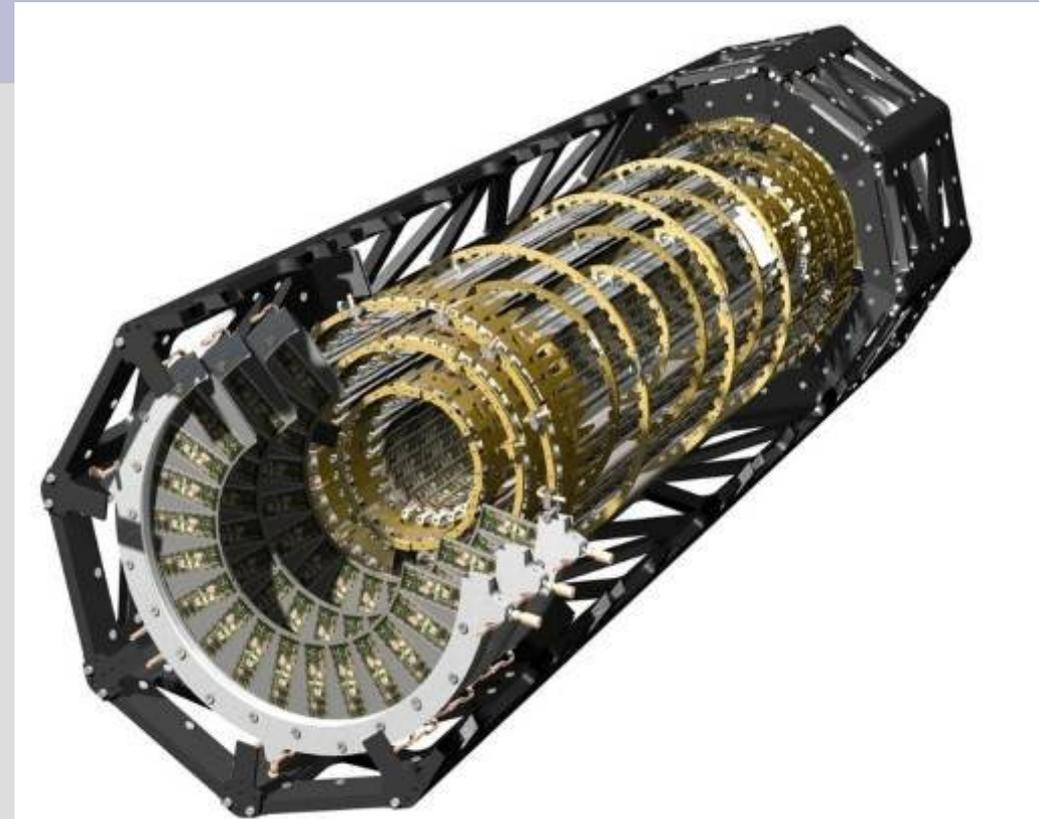
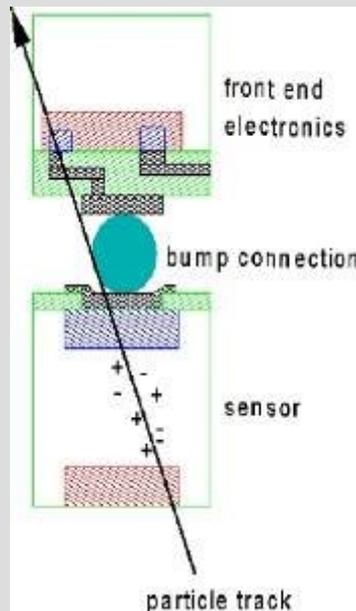


# Digitales Röntgen

## Pixel Detektor für ATLAS (Halbleiterdetektor)

### Funktionsweise:

Nachweis der Teilchen über  
Ionisation des Siliziums

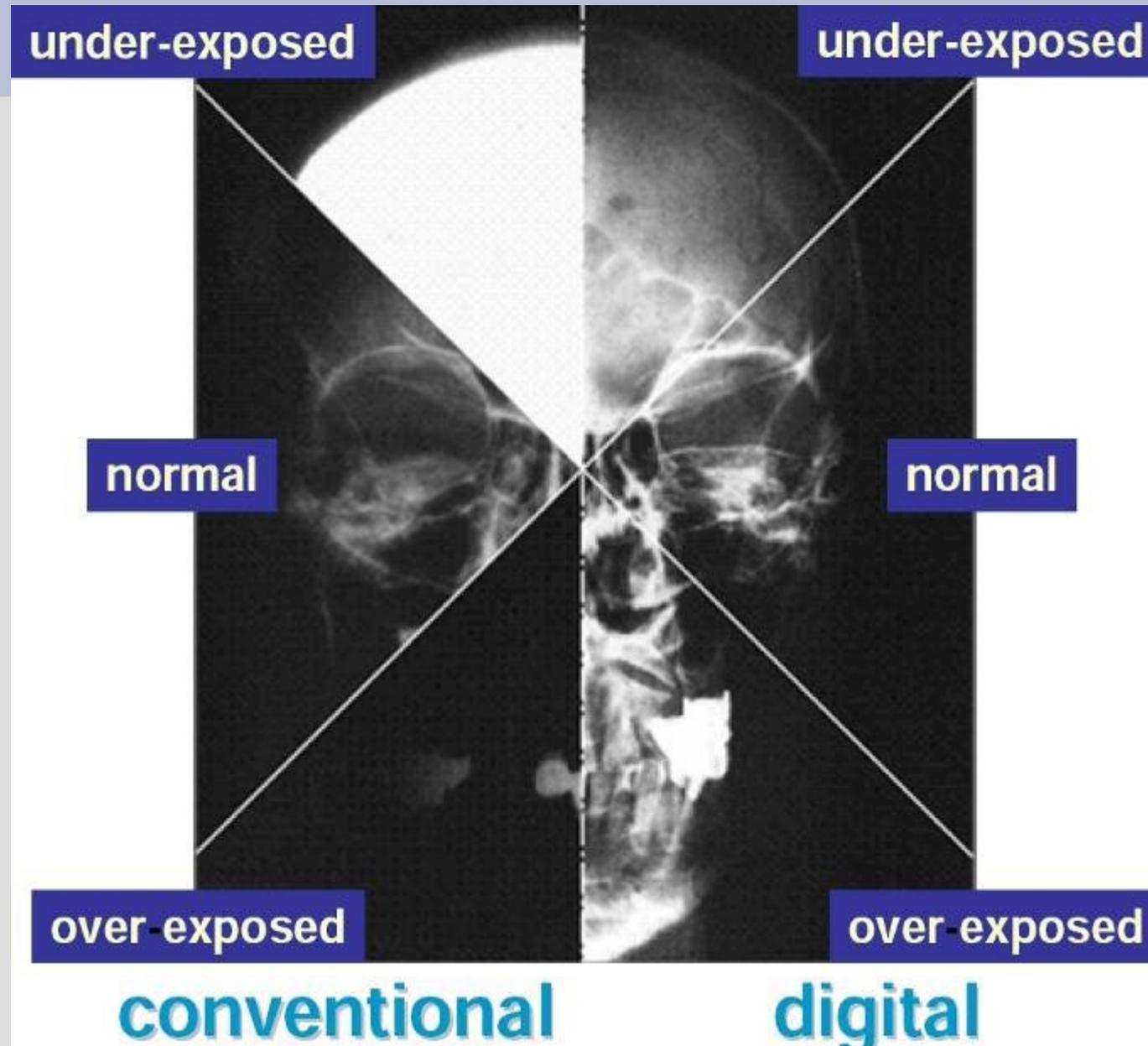


### Vorteil:

Jedes einzelne Röntgenquant wird gezählt  
Geringe Strahlenbelastung  
Über-/Unterbelichtung kann korrigiert werden

# Digitales Röntgen

(Ein Vergleich)

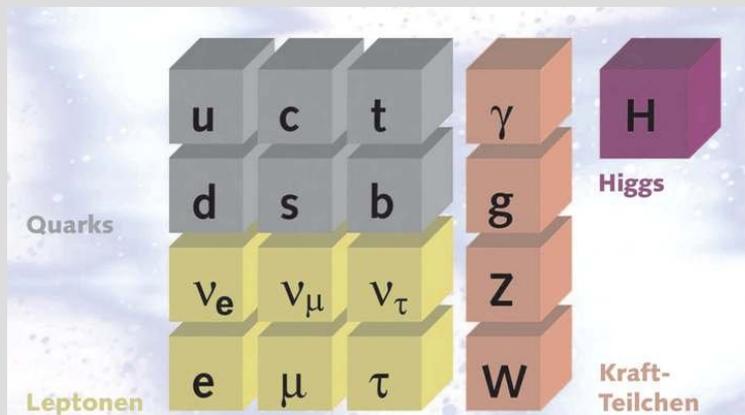


... und wie geht es weiter?

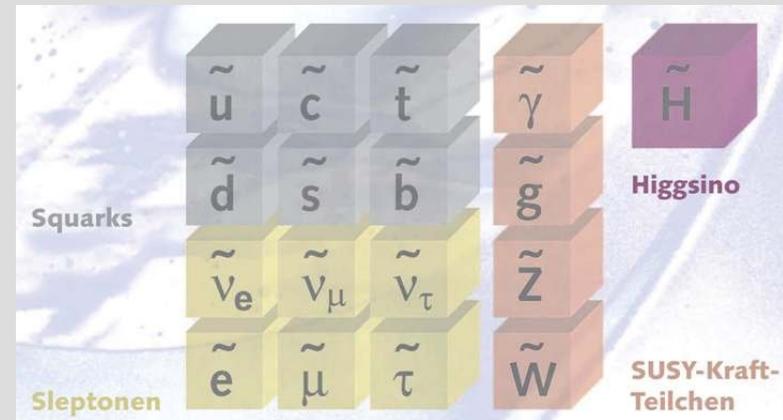
# ... z.B. Supersymmetrie ?!?

(SUSY)

Standardmodell



Supersymmetrische Erweiterung



Jedes Elementarteilchen im Standardmodell erhält einen supersymmetrischen Partner

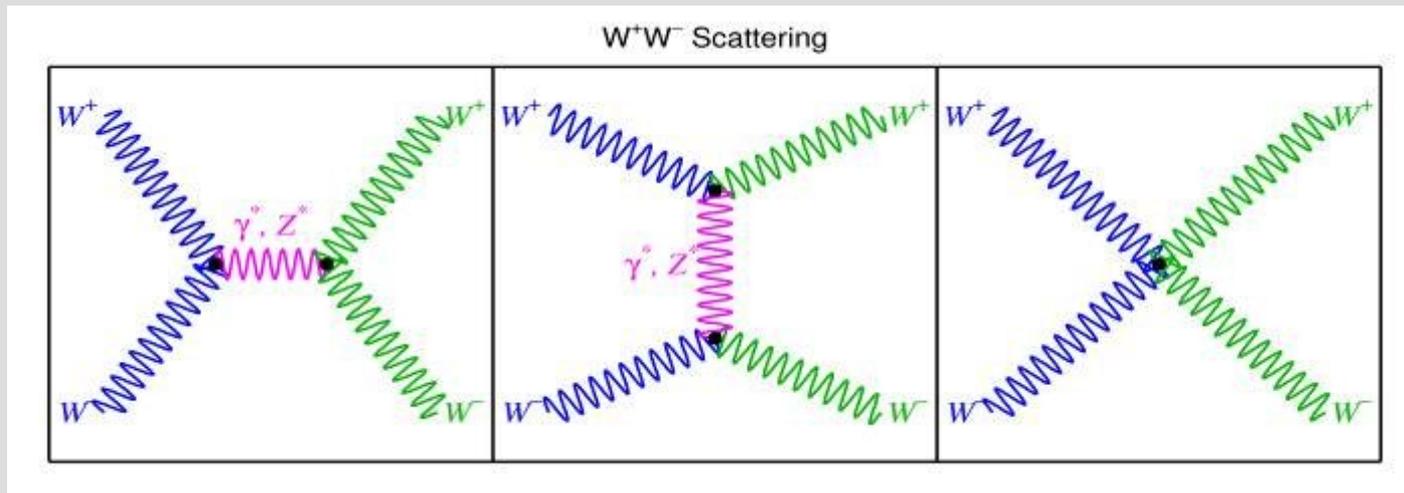
**Würde helfen, viele theoretische Fragen zu lösen:**

- Vereinigung aller Kräfte inklusive Gravitation
- Leichtestes SUSY Teilchen stabil --> Kandidat für Dunkle Materie

**Entdeckung bei ATLAS/CMS am LHC möglich!**

# ... und wenn es das Higgs nicht gibt ?!?

**Die Kraft-Teilchen (W-Bosonen, Z-Bosonen und Photon) wechselwirken auch untereinander!**



**Wenn das Higgs Boson nicht existiert:**

Ist bei der Wechselwirkung die Wahrscheinlichkeit nicht erhalten

**Es muss bei LHC neue Physik geben!!!**

**Epilog: ... und Dresden?**

# Epilog: ... und Dresden?

## **Simulationprogram für Experimente am CERN/LHC**

SHERPA (Gruppe Frank Krauss – Institut für Theoretische Physik)

## **Beitrag zu Hochspannungsversorgung des ATLAS Kalorimeters**

Entwicklung der Hochspannungsmodule bei ISEG/Rossendorf

Test und Inbetriebnahme der Module

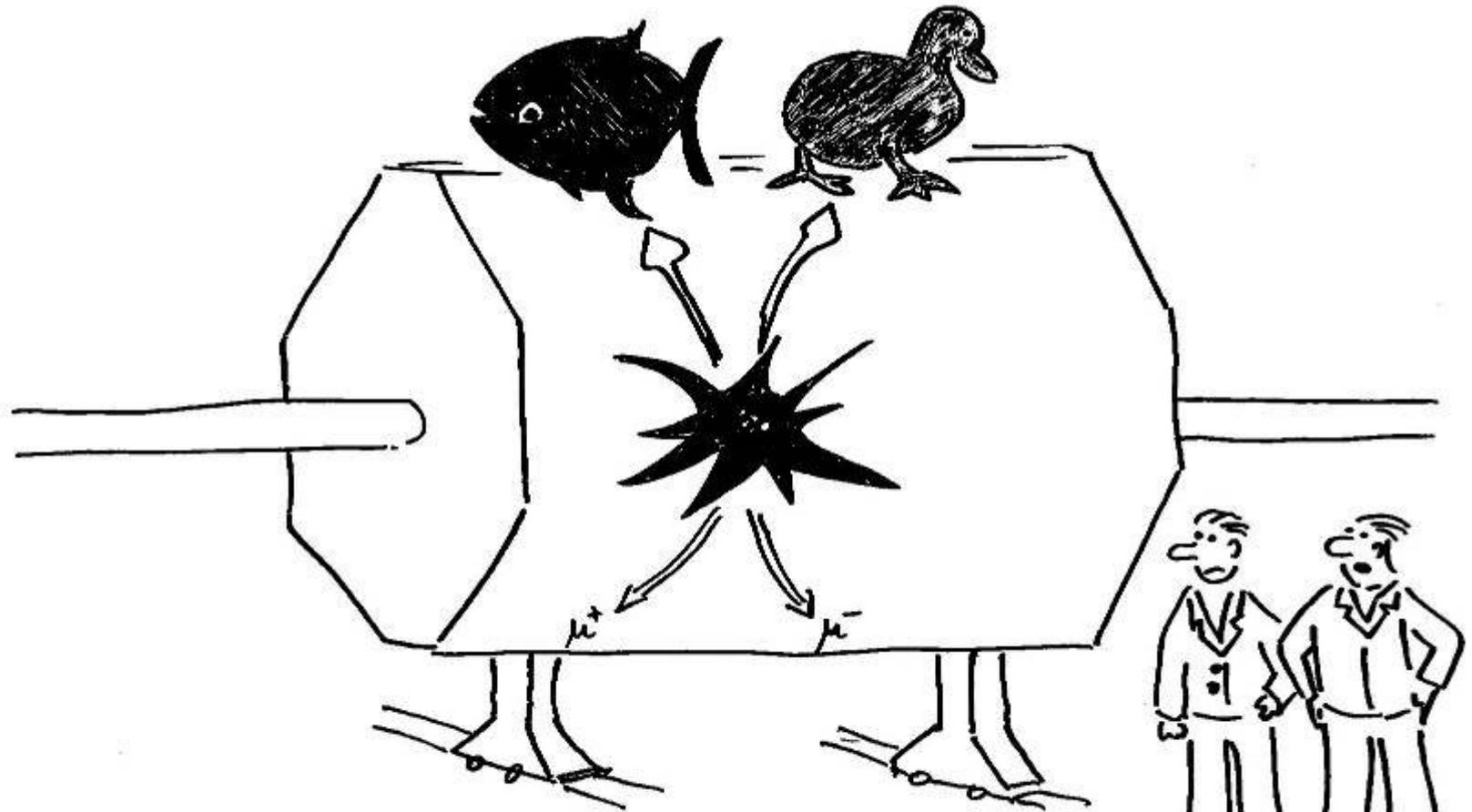
Beitrag zur Datenauslese

## **(Vorbereitung) der Physikanalysen**

Suche nach dem Higgs Boson

Suche nach neuer Physik jenseits des Standardmodells

... be Prepared for the Unexpected!



“This is not exactly, what theory predicted for the Higgs decay!”