

# Brennpunkte extragalaktischer Forschung

Silke Britzen

Max-Planck-Institut für Radioastronomie, Bonn

E-mail: [sbritzen@mpifr-bonn.mpg.de](mailto:sbritzen@mpifr-bonn.mpg.de)

Web: [www.mpifr-bonn.mpg.de/staff/sbritzen/](http://www.mpifr-bonn.mpg.de/staff/sbritzen/)

# Heute: das Programm

- 30.10. Gamma-Ray Bursts
- 13.11. GUT & TOE (Stringtheorie, etc.)
- **27.11. LHC & Higgs**
- 11.12. Higgs & Stringtheorie & Supersymmetrie

Winterferien: 23.12.-06.01.10

- 08.01.10 Higgs & die Inflation
- 22.01.10 Zeit & Lichtgeschwindigkeit
- 05.02.10



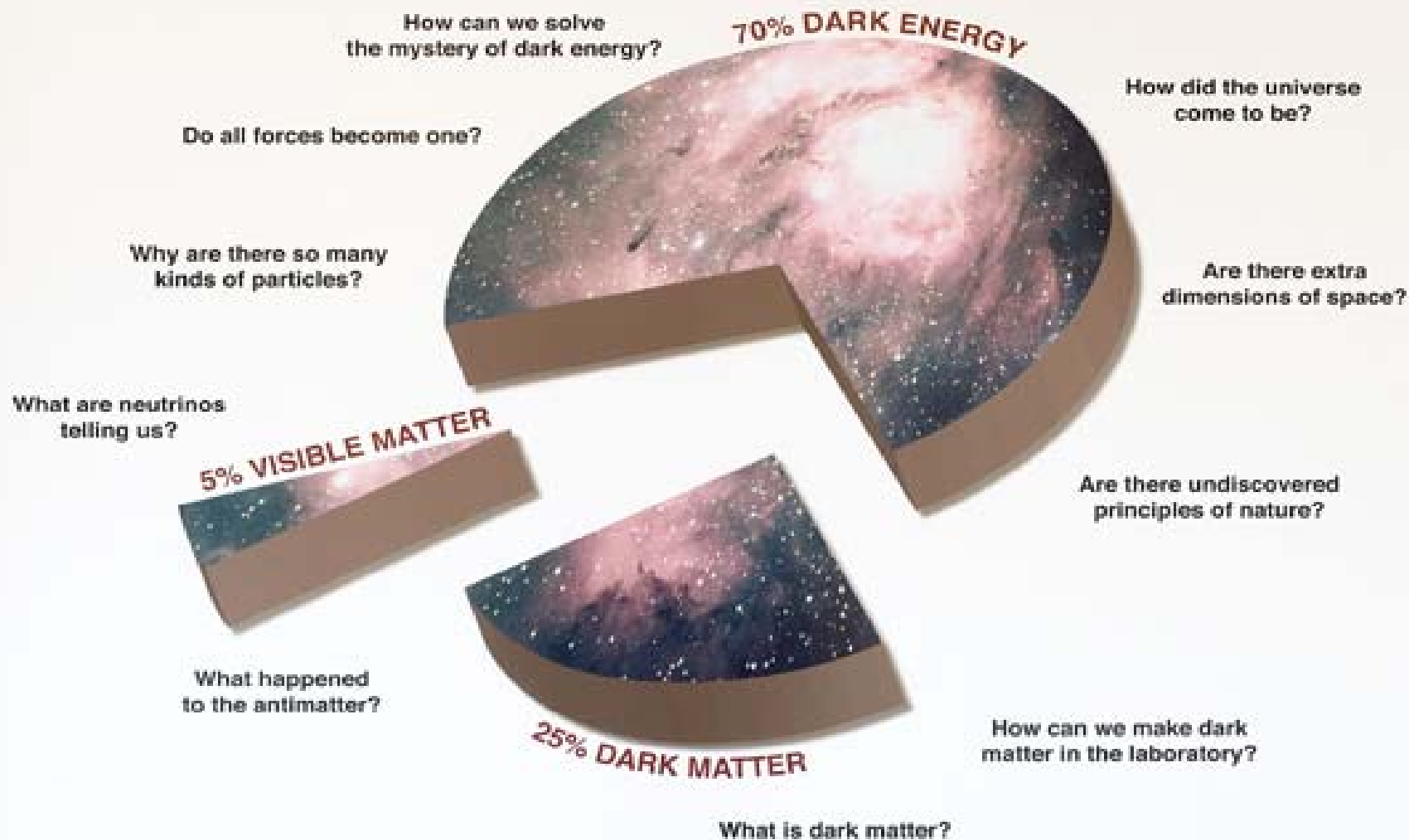
# Heute im Detail

- **27.11. LHC & HIGGS**

- Auf der Suche nach Dunkler Materie – Ergebnisse
- Das Higgs-Teilchen
- Higgs & LHC
- Der LHC wird hochgefahren
- Was passiert sonst am LHC? Die wichtigsten LHC-Experimente



# QUANTUM QUESTIONS



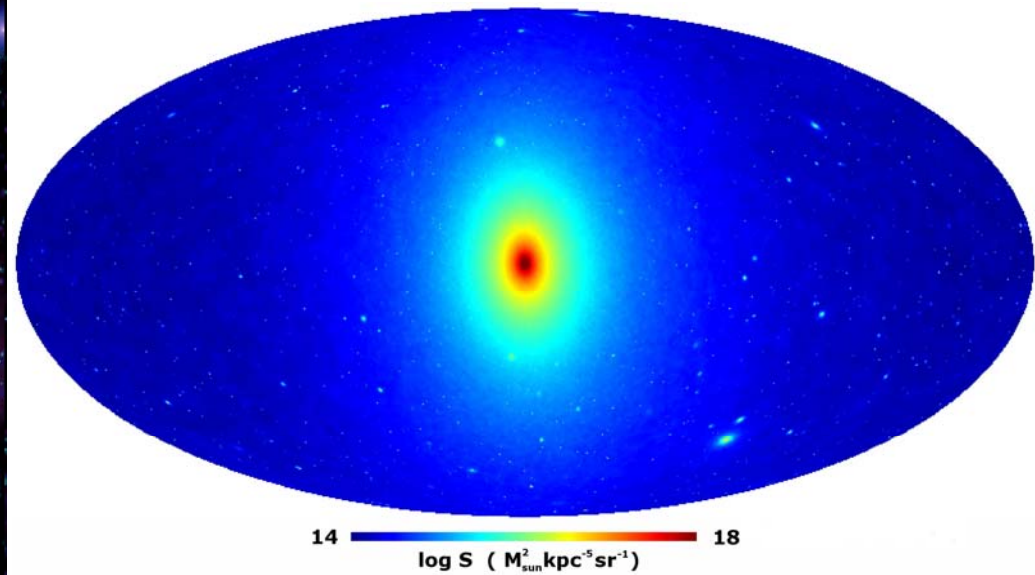
## Dark Matter and Dark Energy

Over the last decade, astronomical observations of galaxies and supermassive black holes have shown that visible matter (composed of quarks and leptons) accounts for only five percent of the energy and mass of the universe. Additional "dark matter" influences the motion of galaxies, and "dark energy" speeds up the expansion of the universe. A new generation of experiments will begin to answer the most intriguing questions about matter, energy, space and time.

# Die Suche nach Dunkler Materie – Ergebnisse



# Fermi auf der Suche nach Dunkler Materie



# Auf der Suche nach **Dunkler Materie** (Quelle: DLF)

"Wir suchen vor allem bei **Zwerggalaxien** nach den Spuren der Dunklen Materie. In diesen Galaxien gibt es recht wenige leuchtende Sterne, aber **große Mengen an Dunkler Materie**. Diese kleinen Galaxien haben zudem **keine Objekte aus normaler Materie, die Gamma-Strahlung aussenden**. Daher wäre ein Gamma-Leuchten von dort ein sehr klares Indiz für die Dunkle Materie."

"Wir setzen den Modellen für die Dunkle Materie bereits interessante Grenzen. Dass wir in den **Zwerggalaxien bisher keinerlei Spuren der Dunklen Materie sehen, ist mit einigen Modellen der so genannten minimalen Supersymmetrie kaum zu erklären**. Nach dem, was die Teilchenphysiker dort vorschlagen, hätten wir ein recht starkes Signal sehen müssen. Dass wir dort nichts sehen, schließt manche Modelle über die Dunkle Materie aus oder macht sie zumindest sehr unwahrscheinlich."

"Einige werden schon enttäuscht sein, aber die meisten fühlen sich noch ganz wohl. **Theoretiker sind immer sehr kreativ**, ein Modell an die Daten anzupassen. Das werden die auch jetzt versuchen."

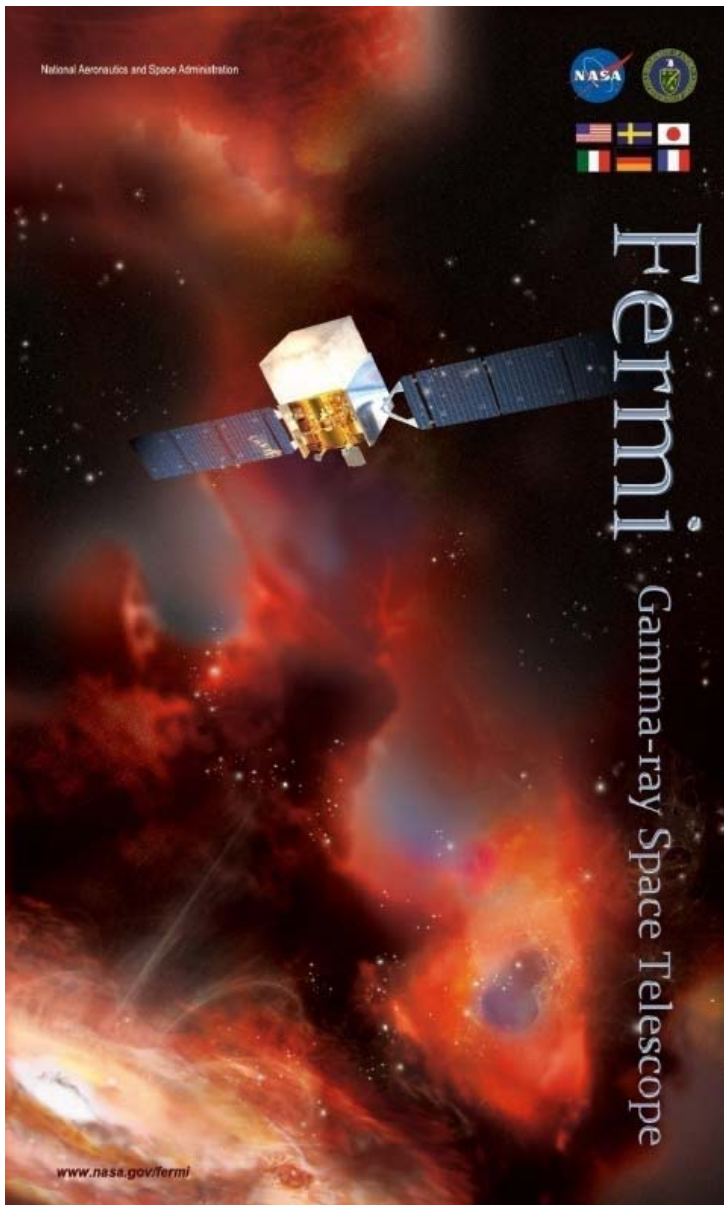
# Auf der Suche nach **Dunkler Materie** (Quelle: DLF)

- Fermi wird noch mindestens bis zum Jahr 2013 nach dem möglichen Gammaleuchten der zerstrahlten Dunklen Materie Ausschau halten. *Manche Experten bezweifeln, dass sich die Theorien noch lange entsprechend verbiegen lassen. Zu sehr häufen sich in letzter Zeit in vielen Bereichen die Anzeichen dafür, dass die Dunkle Materie womöglich gar nicht existiert oder sie sich zumindest ganz anders verhält, als es das Standardmodell vorhersagt.* Auf die Physiker kommen bewegte Zeiten zu.

Pauli bei der „Erfindung“ des Neutrinos:

"Heute habe ich etwas getan, was man in der theoretischen Physik nie tun darf. Ich habe etwas, was nicht verstanden ist, durch etwas erklärt, was man nicht beobachten kann!"





## Dark matter constraints from observations of dwarf spheroidal galaxies with the Fermi-LAT

Christian Farnier,  
LPTA, CNRS, UM2  
on behalf of the Fermi-LAT collaboration





**DM composed  $\frac{1}{4}$  of the total energy budget of the Universe but its nature is still unknown**

Self annihilation of **WIMPs** led to High Energy  $\gamma$ -rays in final state

$$\Phi_{WIMP}(E, \Psi) = \underbrace{J(\Psi)}_{\substack{\text{Astrophysical} \\ \text{factor}}} \times \underbrace{\Phi^{PP}(E)}_{\substack{\text{Particle physics} \\ \text{factor}}}$$

$$J(\Psi) = \int_{l.o.s} dl(\Psi) \rho^2(l)$$

Nb of annihilations

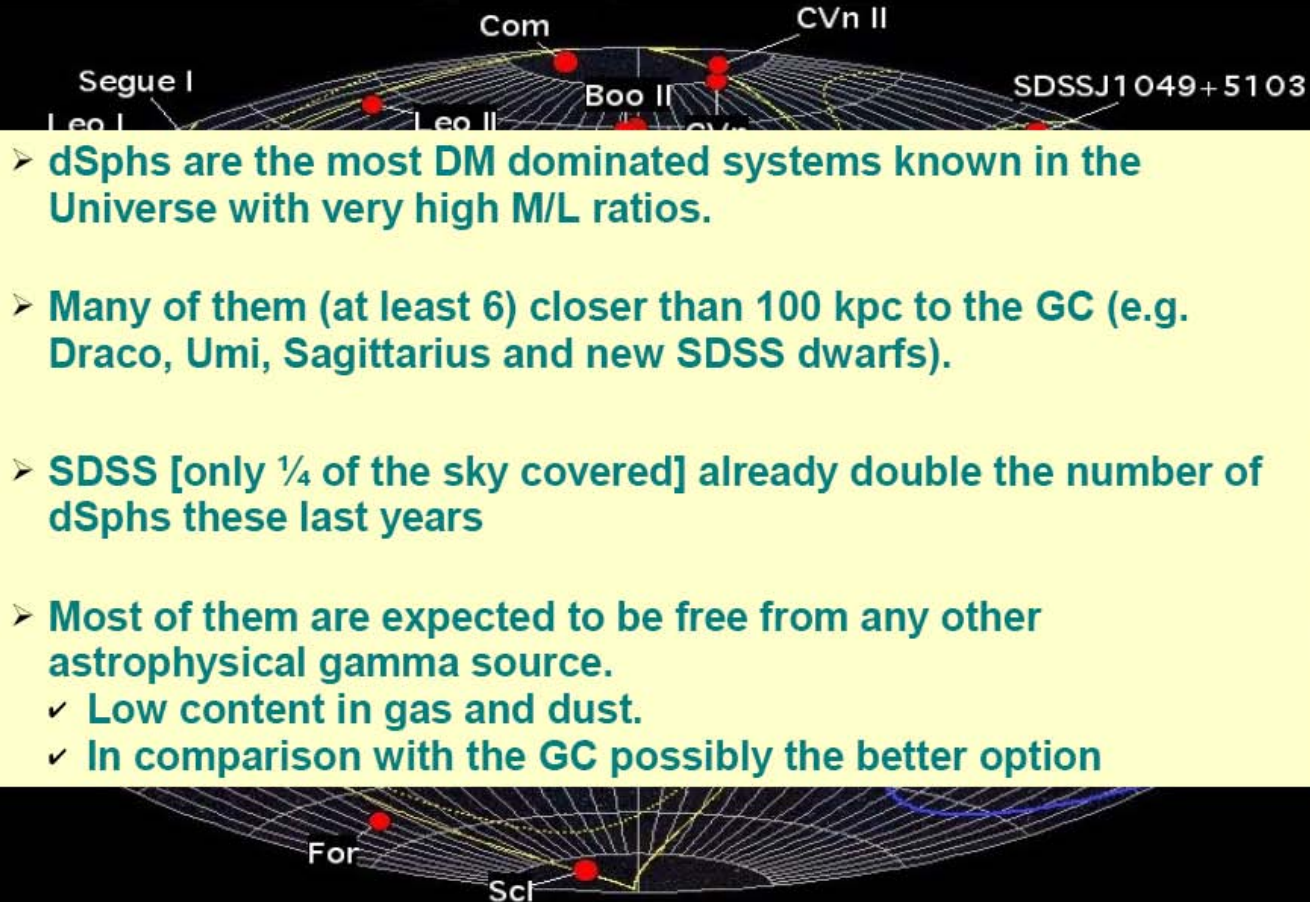
$$\Phi^{PP}(E) = \frac{1}{2} \frac{\langle \sigma v \rangle}{m_{WIMP}^2} \sum_f \frac{dN_f}{dE} B_f$$

Nb of  $\gamma$  per annihilation

Particle physics factor spectrum features:

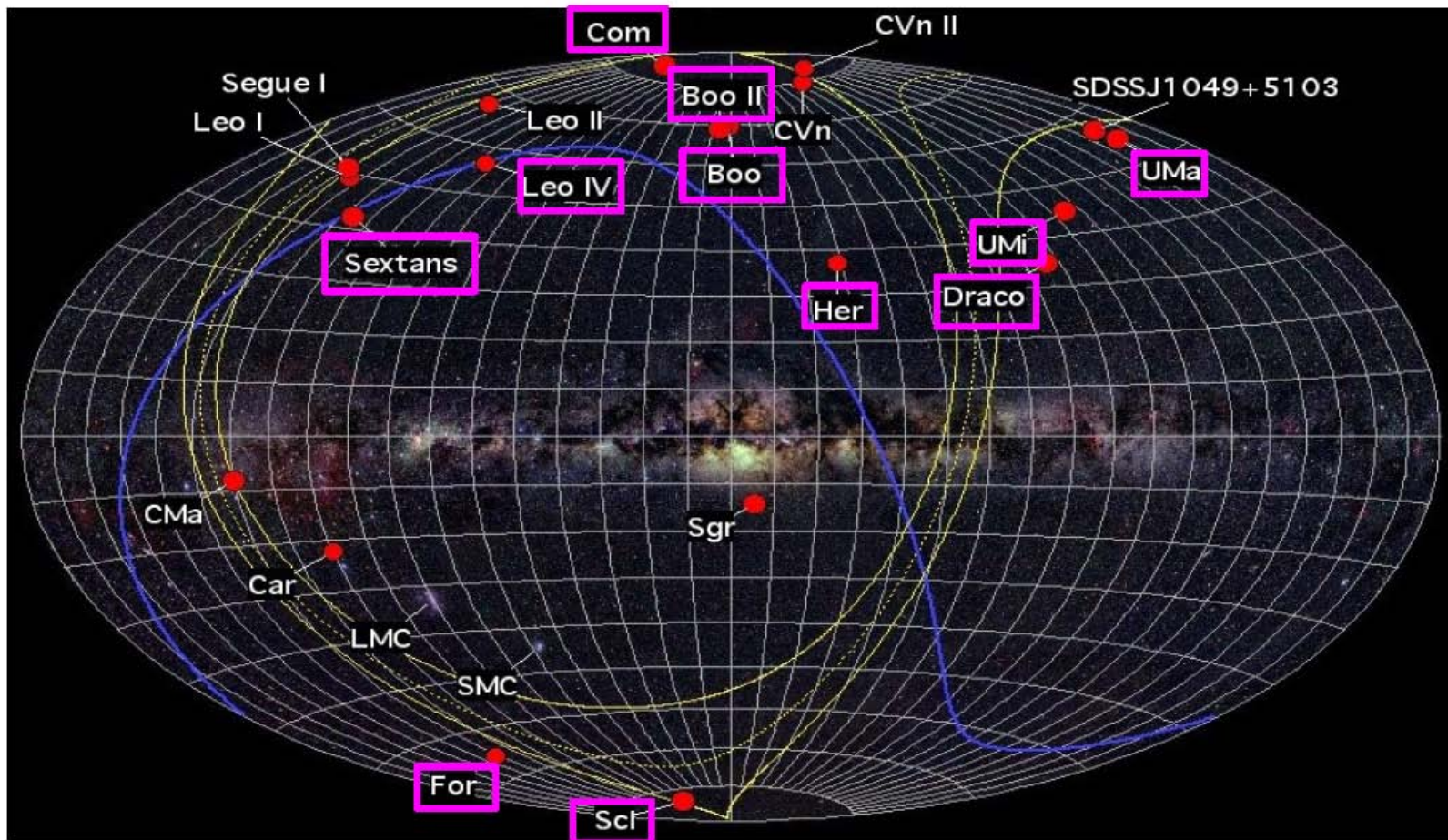
- line: « smoking gun » for DM search but loop suppressed (Poster 134 – Y. Edmonds)
- continuum: differs from power-law with a cut-off at the mass,  $m_{WIMP}$

## Dwarf spheroidal galaxies (dSph): promising targets for DM detection





# Dwarf spheroidal galaxies (dSph): promising targets for DM detection



## Analysis of LAT dSph targets



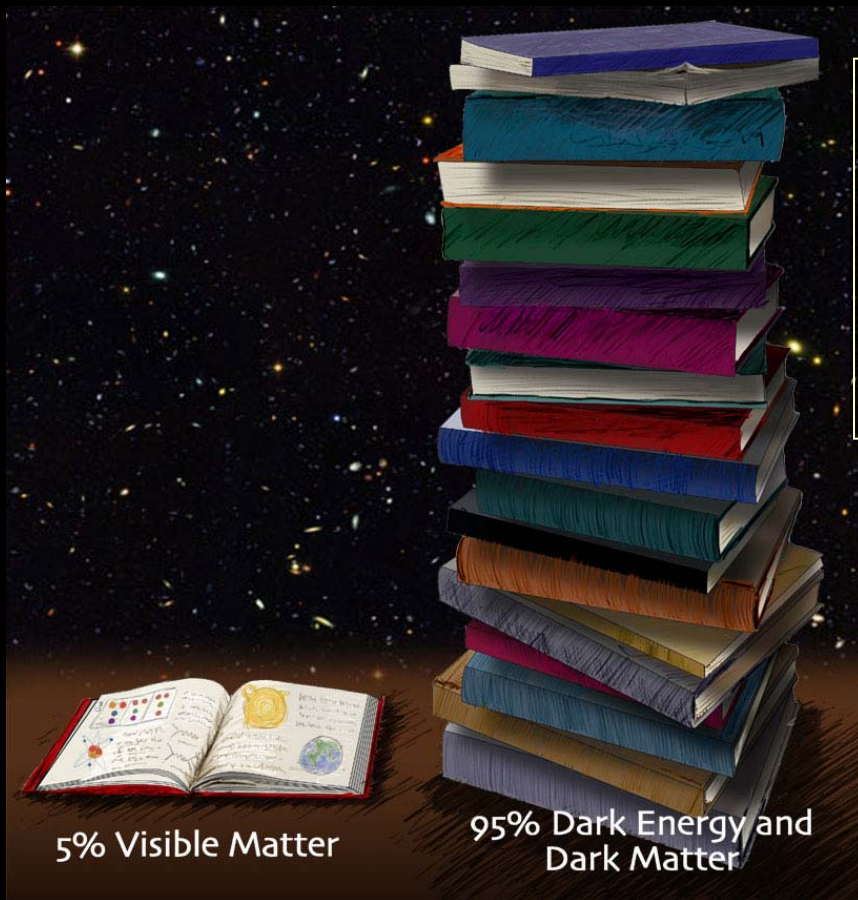
- **14 dSphs** considered: *Submitted to ApJL*
  - **Selection criteria:**
    - **Proximity ( < 180 kpc)**
    - **Far from the Galactic Plane ( $|b| > 30^\circ$ )**
- **11 months** data analyzed
- **Event selection:**
  - **Diffuse class events**
  - **Zenith Angle <  $105^\circ$**
  - **Field of view (fov) radius:  $10^\circ$**
- **dSph fov modelisation:**
  - **Diffuse components: galactic diffuse & isotropic**
  - **Point sources (as determined in the Fermi-LAT catalog)**
- **Energy ranges: 100, 500 & 1000 MeV – up to 50GeV**

### Results:

**No significant signal detected at any of the dSphs selected**



# Is Dark Matter a Particle?



The lightest supersymmetric particle has the right properties to be dark matter

Can we produce dark matter in a collider and study all its properties?



A complex particle physics diagram, likely a Feynman diagram, rendered in white and red lines on a dark blue background. The diagram features a central red circle with the word "HIGGS" written in white capital letters across it. The diagram is composed of numerous interconnected lines, some forming loops and others extending outwards, representing particle interactions. The overall structure is dense and intricate, typical of high-energy physics visualizations.

HIGGS

# Literatur

- **Higgs production at the Large Hadron Collider:  
Theoretical status**

*Robert Harlander*

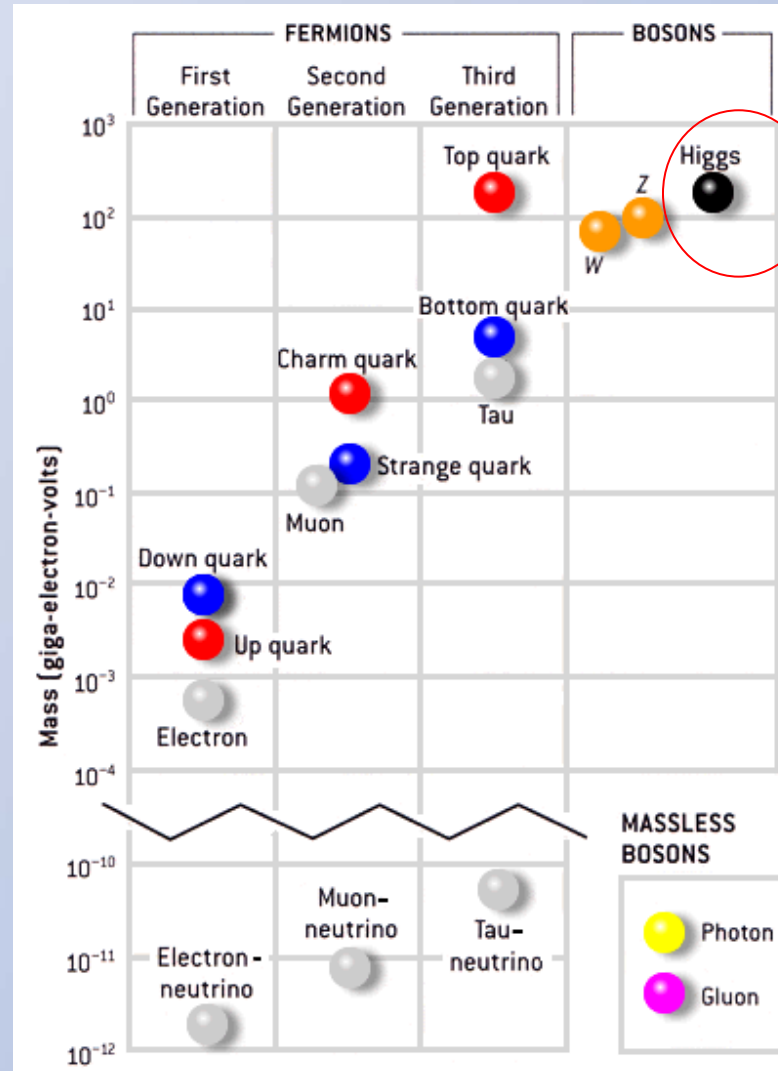
Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics

**35** (2008) 033001 (30pp)

[online at stacks.iop.org/JPhysG/35/033001](http://stacks.iop.org/JPhysG/35/033001)

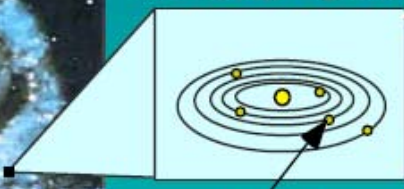
# Standardmodell

## Masse



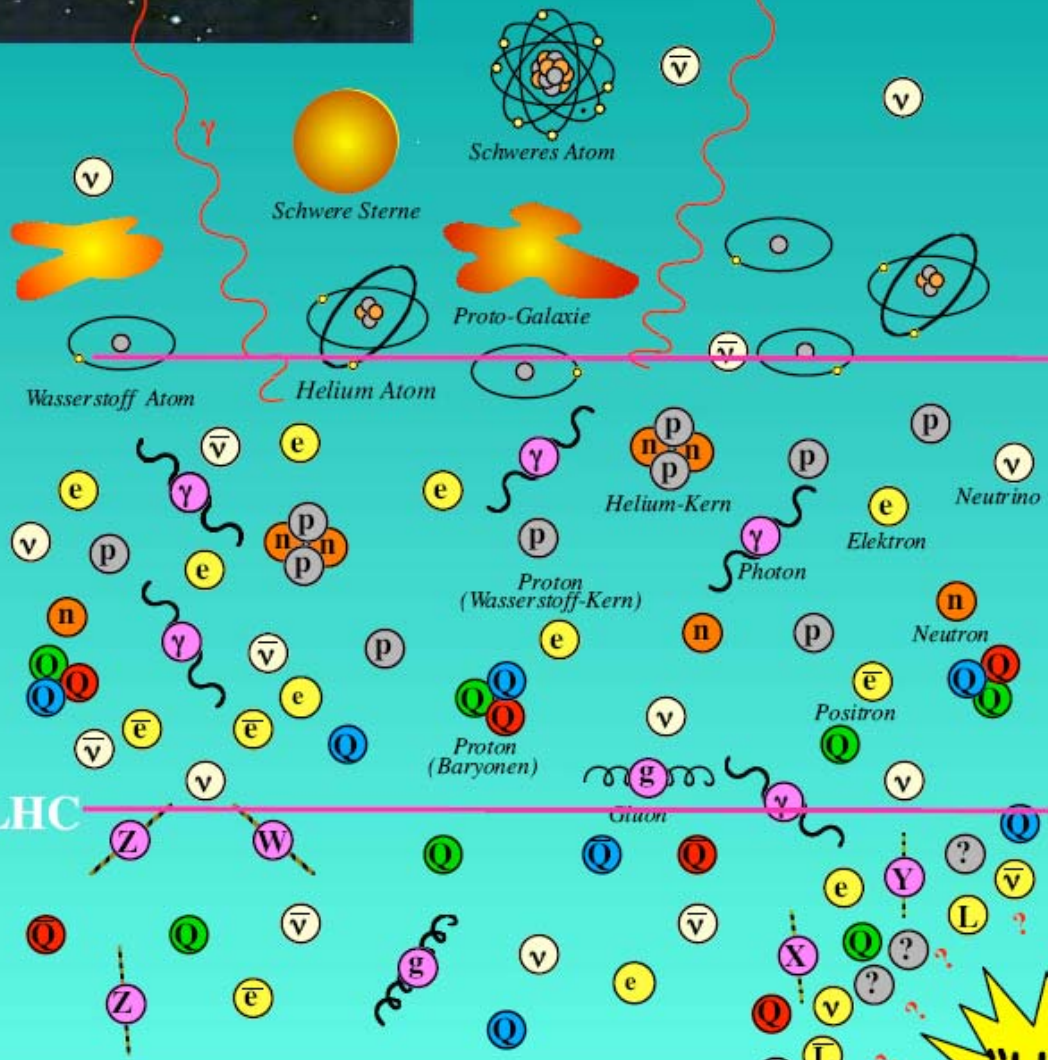
Noch nicht gefunden!

# Das expandierende Universum



Wir sind hier

Zeit



Temperatur	Alter
2.7 K	13.7 Milliarden Jahre

GEGENWART

erste Supernovae

Entstehung von Sternen und Galaxien

11 K	1 Milliarde Jahre
------	-------------------

UNIVERSUM WIRD TRANSPARENT

Bildung von Atomen.  
Entkopplung von Strahlung und Materie.

1.000 K	300 000 Jahre
---------	---------------

Nukleosynthese von Helium  
Positronen verschwinden

$10^{10} K$	1 sec.
-------------	--------

Formation von Protonen und Neutronen  
Antiquarks verschwinden

$10^{15} K$	$10^{-10} sec$
-------------	----------------

Asymmetry  $Q - Q \bar{L} - L$

$10^{16} K$	$10^{-15} sec$
-------------	----------------

Inflation

$10^{27} K$	$10^{-34} sec$
-------------	----------------

GROSSE VEREINHEITLICHUNG

$10^{31} K$	$10^{-43} sec$
-------------	----------------

Astronomie

Teilchenbeschleuniger

materiedominierte Ära

strahlungsdominierte Ära



QUANTEN- GRAVITATION

# Higgs-Feld / Higgs-Teilchen

- Für nahezu alle bekannten Teilchen lässt sich eine spezifische Masse ausmachen; die schwersten subatomaren Teilchen sind das Top-Quark und die Austauschteilchen der schwachen Kernkraft, die etwa der Masse beziehungsweise der halben Masse eines Goldatoms entsprechen.
- Der **Higgs-Mechanismus erlaubt es, den elementaren Bausteinen der Materie (Elektronen und Quarks) und den Kraftteilchen eine effektive Masse zu geben, und trotzdem die Standardtheorie der Teilchenphysik selbstkonsistent zu bewahren.**
- Teilchenphysiker aus aller Welt sind überzeugt, dass es das Higgs-Teilchen geben muss. Doch **bislang** sind **alle Experimente zur Ortung fehlgeschlagen.**

# Higgs & Kollegen

- **Die Väter des Higgs-Teilchens**
- Auch wenn die ganze Teilchenphysik-Gemeinde nach dem Higgs-Teilchen Ausschau hält: Peter Higgs war nur einer von mehreren Schöpfern der Idee, die Elementarteilchen theoretisch mit Masse versorgt.
- 1964 erschienen im Band 13 der Physical Review Letters drei unabhängige Veröffentlichungen zu dem Mechanismus, der die Masse von Elementarteilchen erklären kann. Alle drei Aufsätze nahmen verschiedene Perspektiven ein und lieferten jeder einen Beitrag zur Gesamtidee. Die Autoren waren François Englert und Robert Brout, Peter Higgs sowie Gerald Guralnik, Carl Hagen und Tom Kibble:
- F. Englert and R. Brout: Broken Symmetry and the Mass of Gauge Vector Mesons; [Phys. Rev. Lett. 13, 321 \(1964\)](#)
- Peter W. Higgs: Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons; [Phys. Rev. Lett. 13, 508 \(1964\)](#)
- G. S. Guralnik, C. R. Hagen, T. W. Kibble: Global Conservation Laws and Massless Particles; [Phys. Rev. Lett. 13, 585 \(1964\)](#)
- Auf einer Konferenz im Jahr 1966 führte dann Ben Lee für das Teilchen, das mit dem beschriebenen Mechanismus verbunden ist, den Namen "Higgs" ein - ein griffiger Name, der sich durchsetzte.



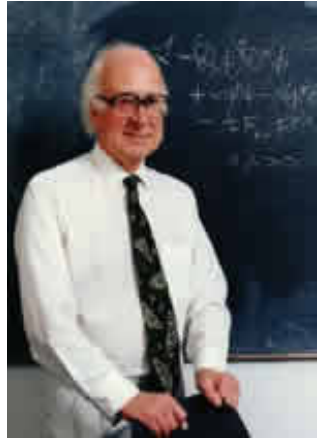
# Higgs & die Masse

- **Masseneinheiten in der Teilchenphysik**
- Das Elektronenvolt (Einheitenzeichen eV) ist eine Einheit der Energie, die in Atom-, Kern- und Teilchenphysik häufig benutzt wird. Ein Elektronenvolt ist die Energie, die ein Teilchen mit der Ladung  $1 e$  (Elementarladung) erhält, wenn es eine Spannung von  $1 V$  durchläuft.  $1 eV$  entspricht  $1,602\ 176\ 462(63) \cdot 10^{-19} J$ .
- In der Teilchenphysik werden sowohl die Ruhemasse von Elementarteilchen als auch die Energie, auf die sie in Beschleunigern gebracht werden, in (Vielfachen von) Elektronenvolt angegeben. Die Umrechnung geschieht mit Hilfe der Gleichung
- $E = mc^2$
- wobei  $E$  für die Energie,  $m$  für die Masse und  $c$  für die Vakuumlichtgeschwindigkeit steht.
- Danach entspricht  $1 eV/c^2$  ungefähr  $1,8 \cdot 10^{-36} kg$  und  $1 GeV$  (Gigaelektronenvolt) ungefähr der Ruheenergie eines Protons (genauer:  $0,938 GeV$ ).

# Higgs-Feld / Higgs-Teilchen

- **Das Problem: das Higgs-Teilchen ist als solches nicht zu fassen. Denn im Moment seiner Entstehung zerfällt es auch schon wieder in so genannte „Sekundärteilchen“. Nur über diese kann das Higgs-Teilchen indirekt auch identifiziert werden.**
- Um der Phantom-Teilchen habhaft zu werden, wurde das **ATLAS**-Experiment am Teilchenbeschleuniger LHC am CERN entwickelt. Bereits seit Beginn der 1990er Jahre arbeiten dort hunderte Wissenschaftler an dem Nachweis der Higgs-Teilchen.
- In den großen Experimenten am LHC werden sich zukünftig 40 Millionen mal pro Sekunde zwei Pakete aus jeweils 100 Milliarden Protonen durchkreuzen. Erfüllt der Beschleuniger diese Anforderungen, so wird etwa **einmal pro Minute ein nachweisbares Higgs-Teilchen** erzeugt.
- Mithilfe eines ausgeklügelten Filtersystems sollen aus den rund eine Milliarde Kollisionen pro Sekunde die Higgs-Ereignisse ausfindig gemacht werden.

# Higgs Mechanismus



- Frage: Warum haben die Elementarteilchen unterschiedliche Massen?
- 1964 Peter Higgs postuliert skalares Hintergrundfeld
- Higgsfeld  $\longrightarrow$  Widerstand für Teilchen

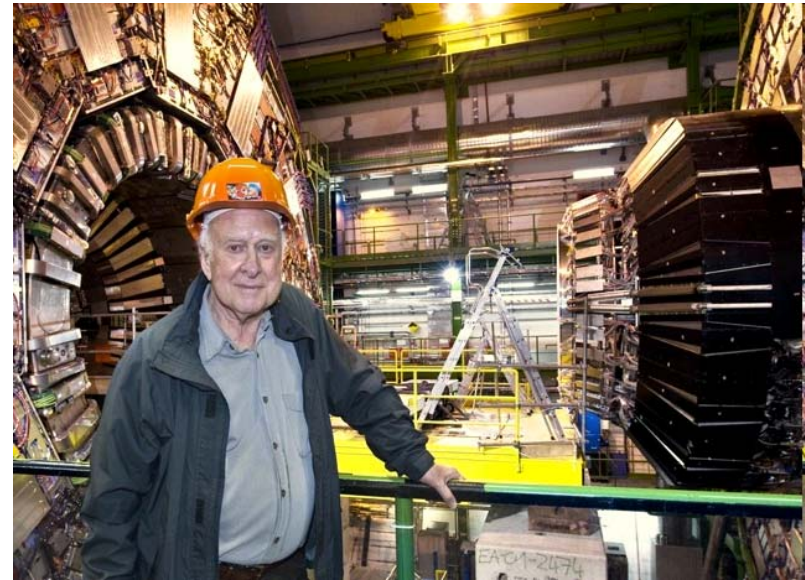
Trägheit



Masse



- Kopplung über Higgs-Bosonen



# Higgs-Comic



sich leise unterhaltende  
Physiker füllen den Raum  
Higgshintergrundfeld



berühmter Physiker  
betritt den Raum, jeder  
will sich mit ihm  
unterhalten

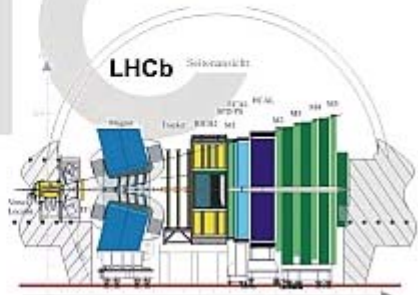
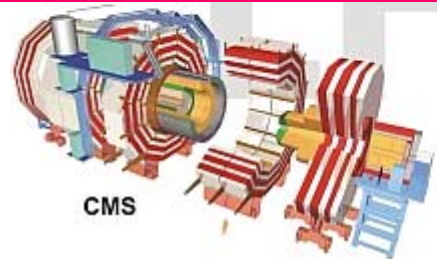
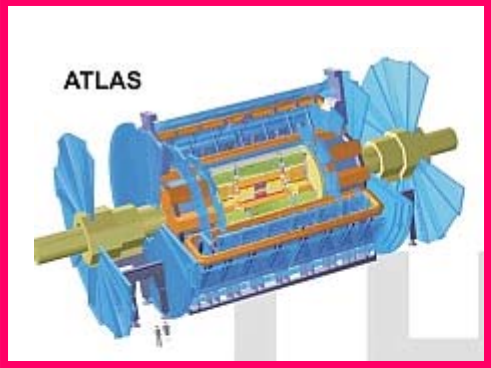


berühmter Physiker wird  
beim durchqueren des  
Raumes behindert



Higgs vermittelt Masse

ATLAS dient dem Nachweis  
des Higgs-Teilchens



# Warum ist das Higgs so wichtig?

- einfachste bekannte und experimentell konsistenteste Erklärung für die Masse der Eichbosonen
- Grundlegende Theorie erfordert Masselose Eichbosonen da sie sonst math. nicht Lösbar ist
- W- und Z- Bosonen haben große Massen
- Vereinheitlichung von elektromagnetischer und schwacher WW
- experimentelle Bestätigung vieler Eigenschaften



Standardmodell gilt als gut abgesichert



Feynman: „Das Standardmodell ist zu gut um falsch zu sein.“

# Theoretische Berechnungen

Standardmodell muss modifiziert werden



Eichtheorie



spontane  
Symmetriebrechung

# Theoretische Grundlagen

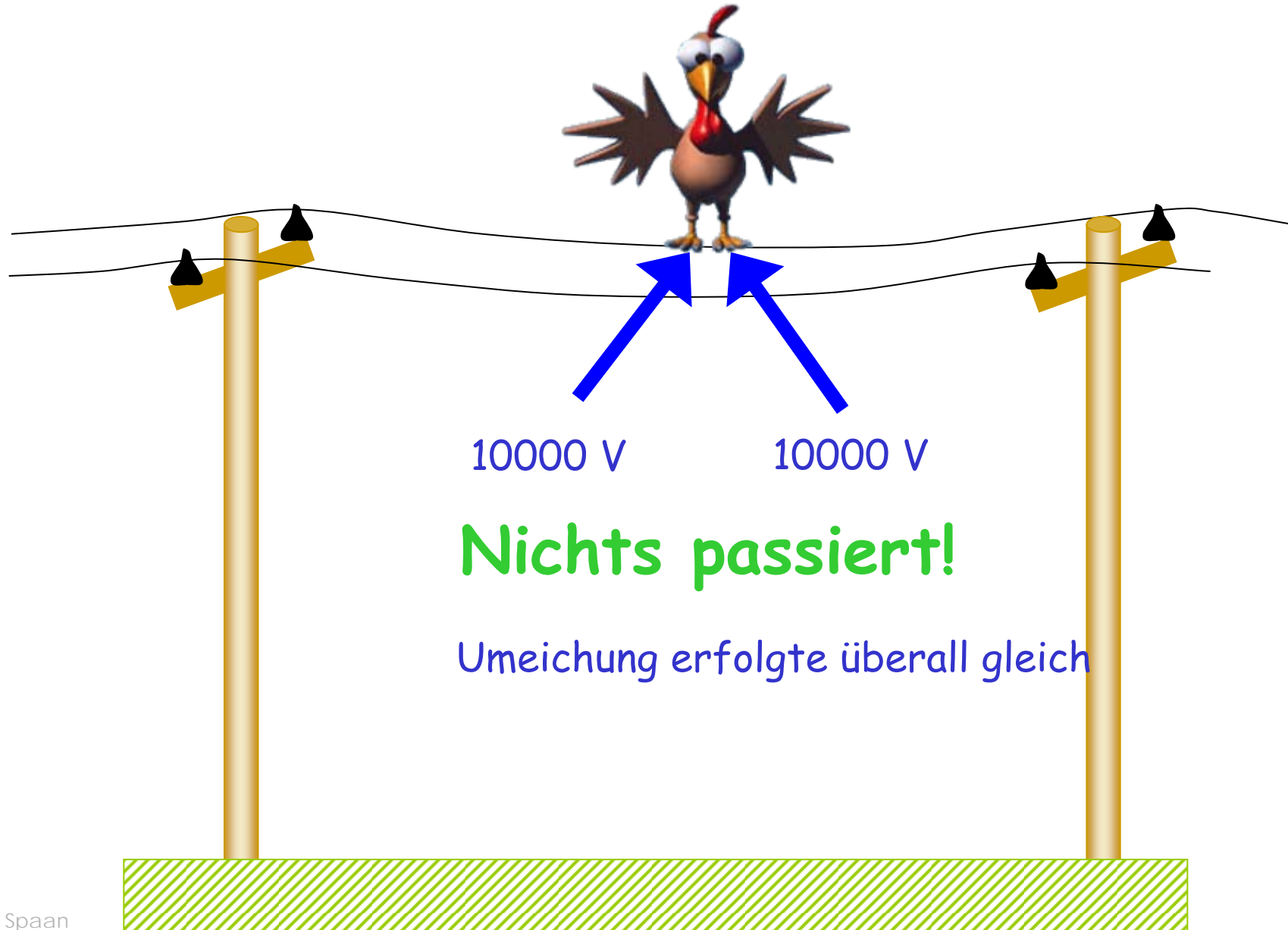
- Die invariante Lagrange Funktion der  $(W, B)$  Eichtheorie für die elektroschwache

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}(\partial_\nu W_\mu^i - \partial_\mu W_\nu^i + g\epsilon^{ijk} W_\mu^j W_\nu^k) (\partial^\nu W^{i\mu} - \partial^\mu W^{i\nu} + g\epsilon^{ijk} W^{j\mu} W^{k\nu}) - \frac{1}{4}(\partial_\nu B_\mu - \partial_\mu B_\nu) (\partial^\nu B^\mu - \partial^\mu B^\nu) + i\bar{\psi}_R \gamma^\mu \left( \partial_\mu + i\frac{g'}{2} Y_R B_\mu \right) \psi_R + i\bar{\psi}_L \gamma^\mu \left( \partial_\mu + i\frac{g}{2} \tau_i W_\mu^i + i\frac{g'}{2} Y_L B_\mu \right) \psi_L \quad \left. \begin{array}{l} \text{a) } \\ \text{b) } \end{array} \right\}$$

- a) Wechselwirkung zwischen beiden Eichbosonen
- b) Wechselwirkung zwischen Eichbosonen und Fermionen

Mit einem Massenterm ist die L nicht mehr invariant, aber im Experiment sieht man, dass manche Teilchen doch eine Masse haben!

# Globale Eichsymmetrie



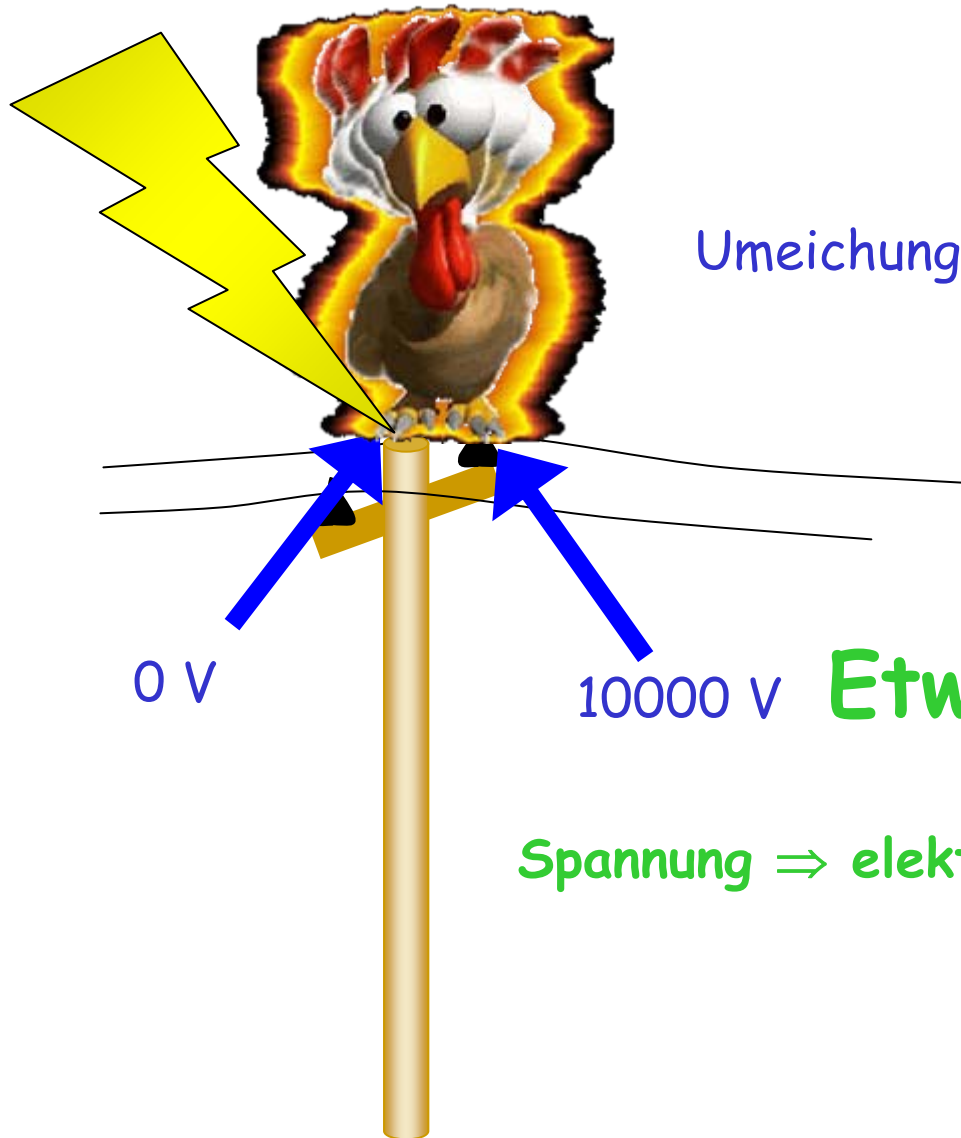
10000 V

10000 V

**Nichts passiert!**

Umeichung erfolgte überall gleich

# Lokale Eichsymmetrie



Umeichung erfolgte überall anders!

0 V

10000 V

**Etwas passiert!**

**Spannung  $\Rightarrow$  elektrisches Feld  $\Rightarrow$  Kraft!**

# Theoretische Grundlagen

- Theoretische Vorstellung für das Skalar-Feld  $\Phi$ , das für die **Teilchenmassen** verantwortlich ist.

$$\Phi = \begin{pmatrix} \phi^\dagger \\ \phi^0 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v + H \end{pmatrix}; \quad V(\Phi) = -\lambda v^2 |\Phi^\dagger \Phi| + \lambda (|\Phi^\dagger \Phi|)^2$$

$$\mathcal{L}_\Phi = (D^\mu \Phi)^\dagger (D_\mu \Phi) - g_f (\bar{\psi}_L \Phi \psi_R + \bar{\psi}_R \Phi^\dagger \psi_L) - V(\Phi)$$

Wechselwirkung mit den Eichbosonen

Wechselwirkung mit den Fermionen

Wechselwirkung mit sich selbst

$$m_{W^\pm} = \frac{gv}{2}, \quad m_Z = \frac{v\sqrt{(g^2+g'^2)}}{2}$$

$$m_f = \frac{g_f v}{\sqrt{2}}$$

$$m_H = \sqrt{2\lambda} v$$

Existenz eines Spin 0 Teilchens, das **Higgs-Boson** mit Masse

- Hierbei ist  $\lambda$  unbekannt; Die Higgs-Masse ist einen vom SM nicht vorhergesagter freier Parameter

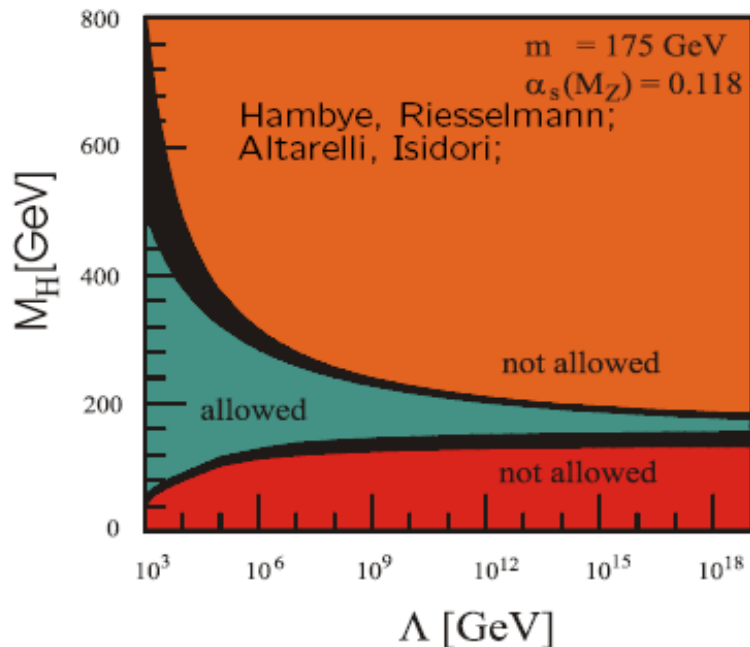


# Higgs: die Masse

- Experimentell bestimmte Grenzen sind solider als theoretische Grenzen
- Wäre die Masse  $< 114$  GeV, wäre es am LEP beobachtet worden – aber nach der Quantenfeldtheorie trägt das Higgs-Boson zu jedem Streuprozess als Übergangszustand bei – einige Beobachtungsgrößen sensibel für diesen Prozess
- Bei allen Zahlen wird angenommen, daß die elektroschwache Symmetrie auf minimale Art gebrochen ist – daraus folgt ein einziges physikalisches Higgs-Boson
- „minimalismus“ ist ein schwaches Argument und die Natur könnte ein komplexeres Higgs-Szenario gewählt haben (Supersymmetrie: weitere 5 Freiheitsgrade würden sich als physikalische Higgs-Bosonen manifestieren -> Vorlesung in 14 Tagen)
- Das Standard Modell mit einem Higgs-Boson einer bestimmten Masse ist gültig bis zu entsprechender Energie – jenseits davon, erwartet man eine neue Physik
- Geht man davon aus, daß das Standard Modell bis zu einer bestimmten Energie gültig sein sollte, dann kann man daraus obere und untere Grenzen der Higgs-Masse ableiten

# Die Higgs-Masse, Theoretische Grenzen

- Man kann Grenzen für  $\lambda$  aus der Theorie setzen



$$\underline{55 \leq M_H \leq 700 \text{ GeV}}$$

$$\underline{130 \leq M_H \leq 190 \text{ GeV}}$$

für  $\Lambda = 1 \text{ TeV}$

für  $\Lambda = M_{\text{Planck}} = 10^{19} \text{ GeV}$

für  $m_t = 175 \pm 5 \text{ GeV}$

- Obere Schranke:
  - SM ist gültig bis zu einer endlichen Energie  $\Lambda$
- Untere Schranke:
  - Vakuumstabilität, endliches Minimum für das Potential  $V(\Phi)$

$$\lambda(\Lambda) < \infty$$

$$\lambda(\Lambda) > 0$$

# Experimentelle Daten

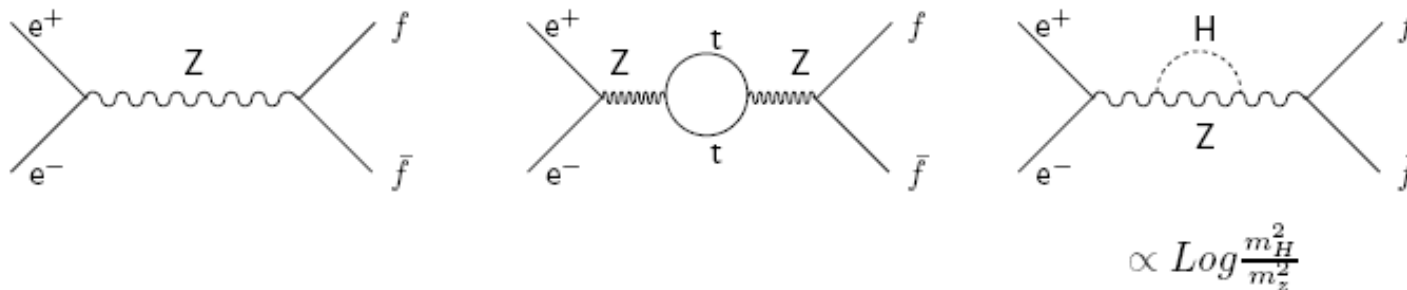
- Die Experimente, die bis jetzt nach Higgs gesucht haben

Collider	Running Period	Beam	$\sqrt{s}$ (GeV)
LEP1	1989-1995	$e^+e^-$	91
SLC	1991-1998	$e^+e^-$	91
LEP2	1995-2000	$e^+e^-$	$\sim 209$
TEVATRON	2001-	$p\bar{p}$	1 800
LHC	2007-	$pp$	14 000
LINEAR COLLIDER?	???	$e^+e^-$	500

# Experimentelle Daten

Collider	Running Period	Beam	$\sqrt{s}$ (GeV)
LEP1	1989-1995	$e^+e^-$	91
SLC	1991-1998	$e^+e^-$	91

- Indirekte Messungen:
  - Mit Präzisionsmessungen der elektroschwachen Wechselwirkung im Vergleich zur Theorie mit elektroschwachen Strahlungskorrekturen, werden Grenzen für die Higgs-Masse gesetzt.



Die Messwerte des Z- Resonanzs werden mit den Theoretischen Vorhersagen verglichen; durch Top- Masse auf die Higgs- Masse schließen

# Indirekte Suche bei LEP, Ergebnisse

## ■ Indirekte Suche

- Präzisionsmessungen der Eigenschaften der Z, W-Resonanz, wie Z.b.

- Masse
- Breite

} Indirekte Obergrenze für die Higgs- Masse durch Vergleich vom Experiment mit den Theoretischen Vorhersagen, die von Top-Quark Masse und Higgs- Masse abhängen.

- Neueste Experimentelle Durchschnittliche Werte aus dem indirekten Suche für die  $m_H$  :

$$m_{top} = 171.4 \pm 2.1 \text{ GeV ( Sommer, 2006 ); Tevatron}$$

$$m_H = 85_{-28}^{+39} \text{ GeV}$$

$$m_H < 166 \text{ GeV, 95\% confidence level (Aussagewahrscheinlichkeit)}$$

- Vergleich mit den Theoretischen Vorhersagen:

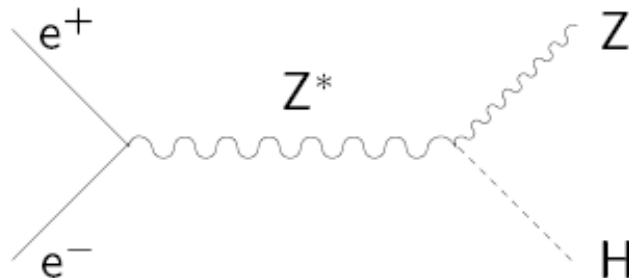
$$55 \leq m_H \leq 700$$

# Experimentelle Daten

Collider	Running Period	Beam	$\sqrt{s}$ (GeV)
LEP2	1995-2000	$e^+e^-$	$\sim 209$

## ■ Direkte Suche

- Der dominierende Higgsproduktionsprozeß in der Elektron- Positron-Vernichtung ist Higgs- Abstrahlung beim Z-Austausch:



$$Z \rightarrow (qq, ll)$$

$$H \rightarrow bb$$

# Direkte Suche bei LEP, Ergebnisse

- Die direkte Suche gibt die Untere Grenze der Higgs-Masse im Kanal  $e^+ e^- \rightarrow Z^* \rightarrow HZ$

$$m_H > 114.4 \text{ GeV} \quad (95\% \text{ CL})$$

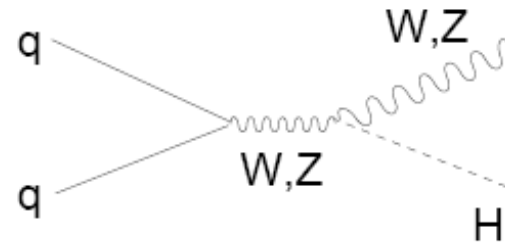
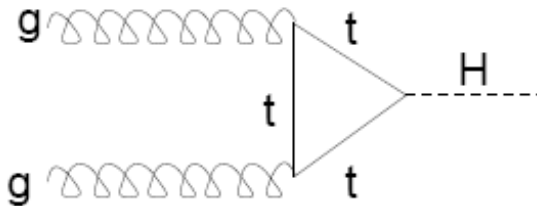
Bei einer  $M_H = 115.6 \text{ GeV}$  wurde 2001/02 bei LEP bei einer Schwerpunktsenergie von 209 GeV eine Anhäufung von Kandidatenereignissen für Higgs- Zerfälle in  $b\bar{b}$  gefunden. Die Signifikanz der Higgs- Ereignisse gegenüber den erwarteten Untergrundereignissen ist nur  $2\sigma$ , also keine Entdeckung

# Experimentelle Daten

Collider	Running Period	Beam	$\sqrt{s}$ (GeV)
TEVATRON	2001-	$p\bar{p}$	1 800

## ■ Direkte Suche

- Higgs erzeugt bei Gluon Fusion und Higgs-Strahlung



- Kann die Untere Grenze erhöhen
- Allerdings ist mit pp- Kollision viel schwieriger nach Higgs zu suchen, wegen Untergrundstrahlung
- Die jetzige Statistik reicht noch nicht für eine Higgs Entdeckung; braucht noch 2-3 Jahre für eine Higgs Masse bis 200 GeV ( obere Grenze des Detektors )



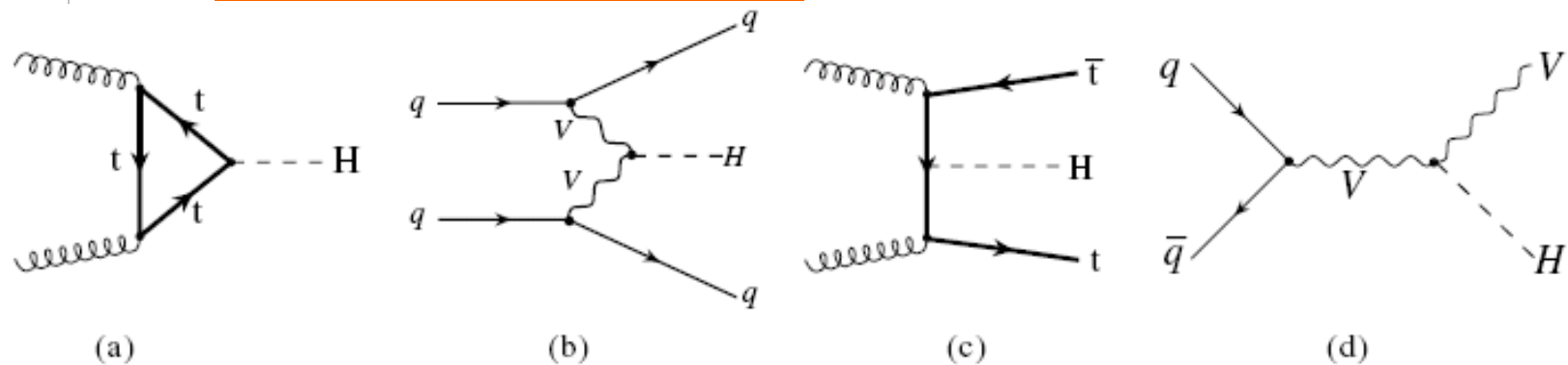
# Higgs-Produktion

Gluonen-Fusion

Assoziierte  $t\bar{t}H$  Produktion

Schwache Boson-Fusion

Higgs-Strahlung



**Figure 4.** Production modes of a Standard Model Higgs boson: (a) gluon fusion; (b) weak boson fusion (WBF); (c) associated  $t\bar{t}H$  production; (d) Higgs Strahlung. There is also a  $q\bar{q}$  initiated process for  $t\bar{t}H$  production which contributes about 30-40% to the total rate at the LHC (at the Tevatron, this is actually the dominant sub-process, giving 99% of the full cross section).

**Zerfall entweder in Fermionen, in massive Vektor-Bosonen und Schleifen-induzierte Zerfälle**

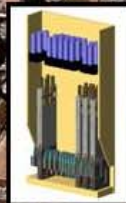
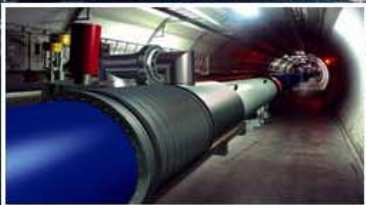
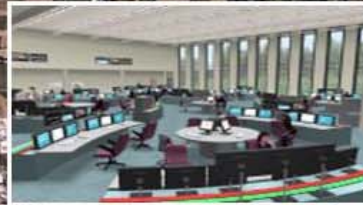
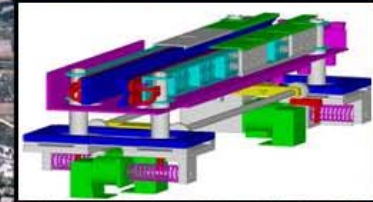
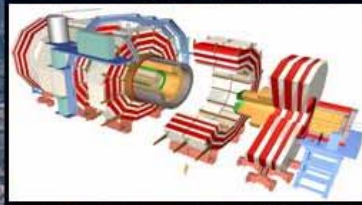
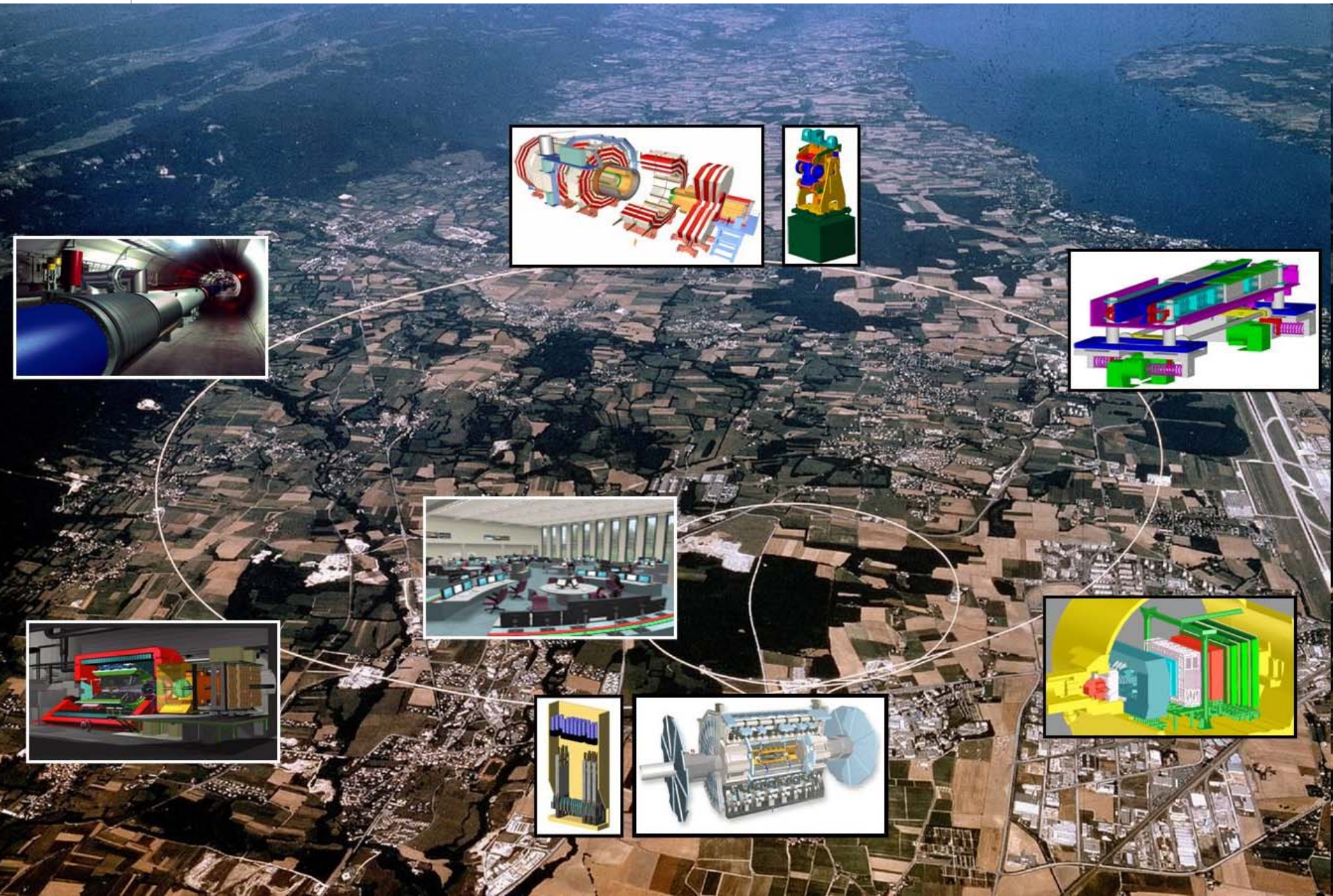
A complex visualization of particle tracks, likely from a detector like the ATLAS or CMS at the LHC. The image features a dense network of white and red lines on a dark blue background. A prominent red circular region is centered in the image, with a white ring inside it. The tracks radiate outwards from this center, forming a complex web of lines. Some tracks are straight, while others are curved or spiral-like. The overall appearance is that of a high-energy particle collision event being analyzed.

# Kurzbesuch am LHC





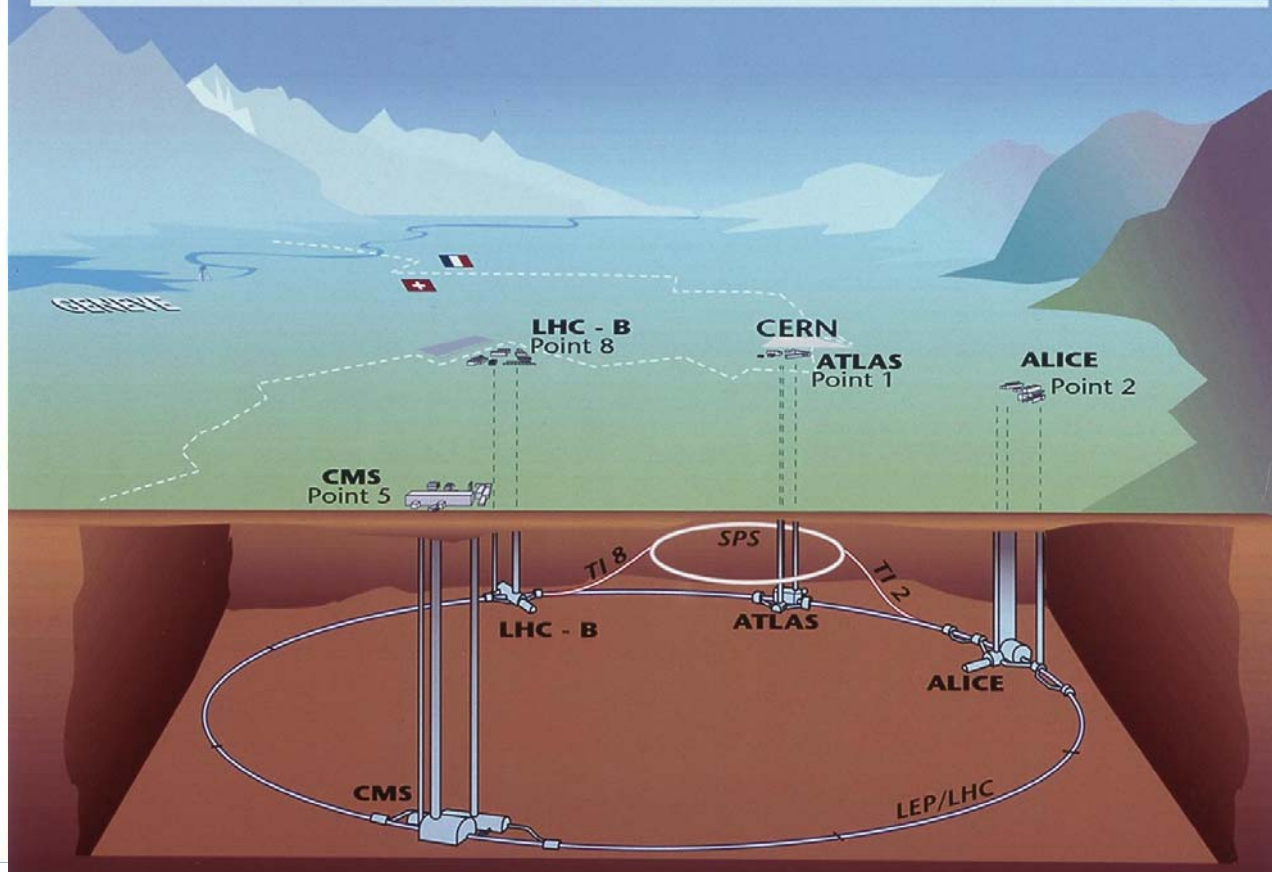
# LHC: aus der Luft





# Der LHC Beschleuniger

## Overall view of the LHC experiments.



## •Vier Experimente

### •ATLAS und CMS

-Ziel ist neue Elementarteilchen nachzuweisen, insbesondere das Higgs-Boson und supersymmetrische Teilchen zu entdecken, bei einer Schwerpunktsenergie von 14 TeV

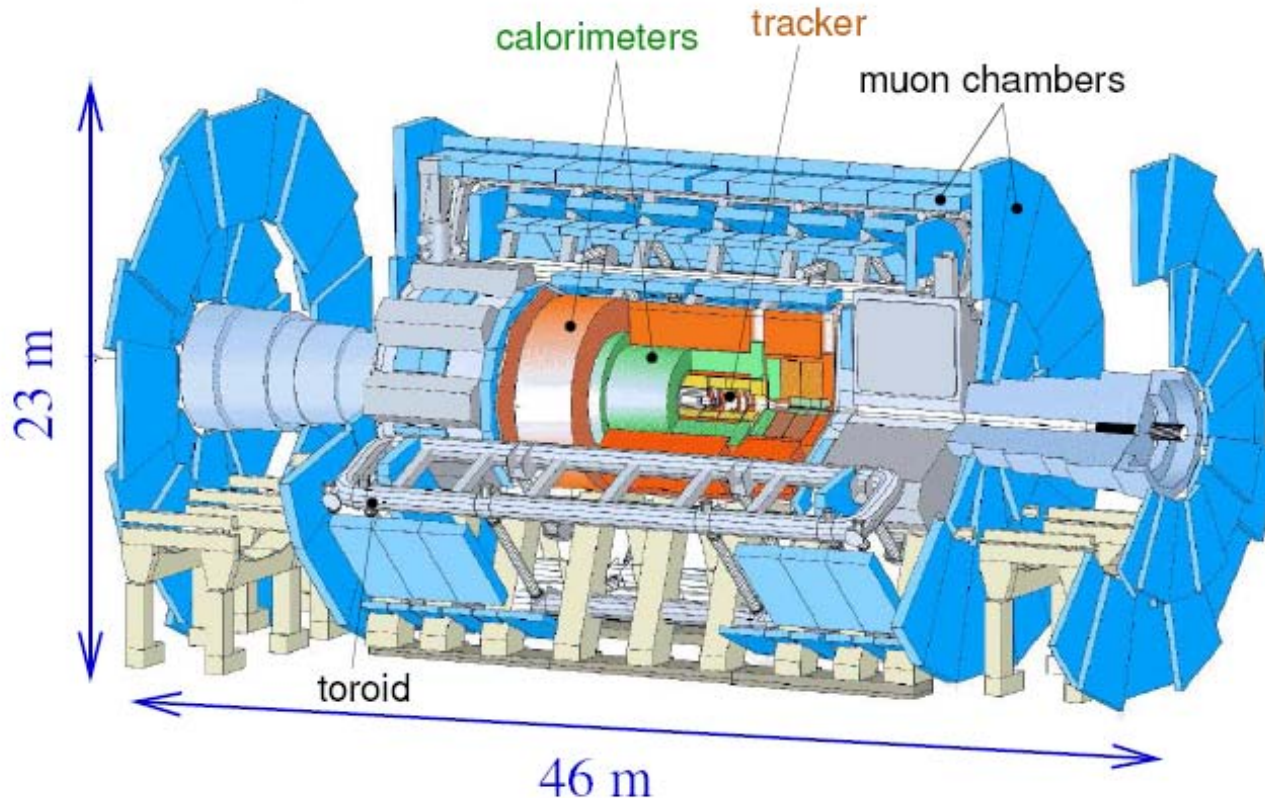
•Zusätzlich **ALICE** und **LHC-B**, die sich auf andere Schwerpunkte konzentriert haben, wie z.B. Schwerionenphysik und b-Physik

• **100m** unter der Erde

•Tunnel **27km** Umfang

# ATLAS ( A Toroidal LHC ApparatuS )

- soll hochenergetische Proton-Proton-Kollisionen untersuchen und unter anderem erstmals das Higgs-Teilchen nachweisen
- hat eine Zwiebelschalenstruktur zum Nachweis unterschiedlichster Teilchenspuren, wobei jede Schicht andere Teilchen und andere Eigenschaften misst



## •Tracker :

-Impuls, Richtung, Vertex-Position der geladenen Teilchen

## •Kalorimeters:

-Energie der e.m. und hadronischen Teilchen (außer Neutrinos, Myonen)

## •Toroid:

-erzeugt B-Feld, welches geladene Teilchen ablenkt

## •Myon Kammern:

-Myonspuren, Impuls

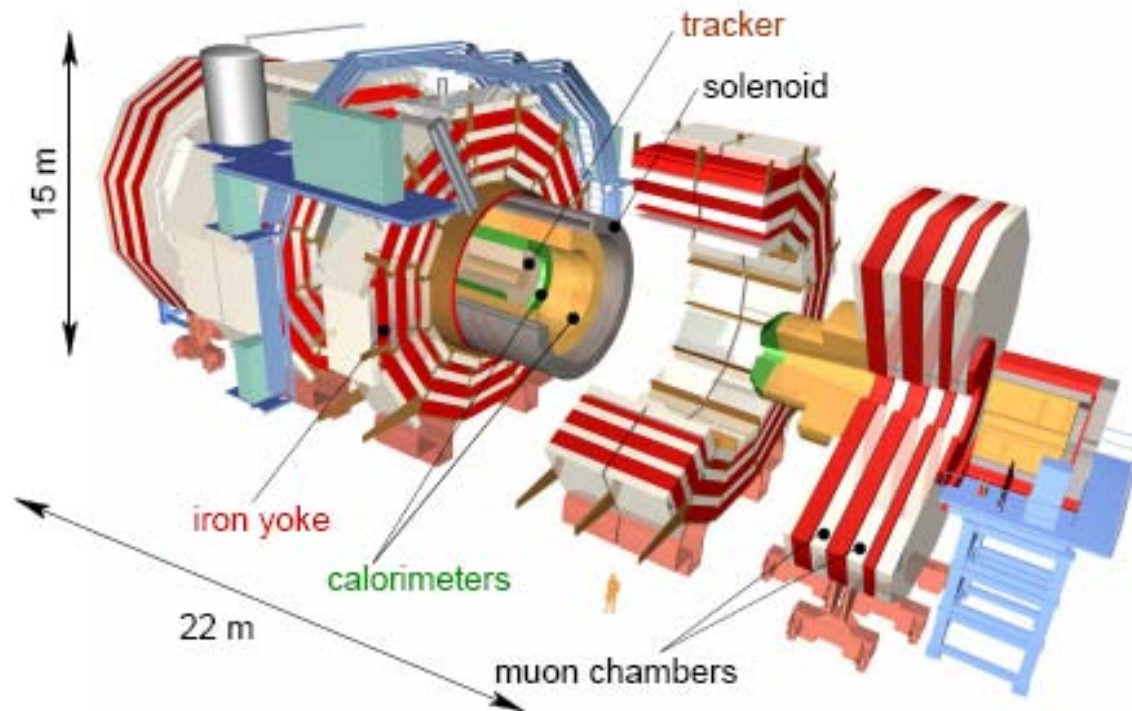
# CMS ( Compact Muon Solenoid)

- Gleiches Prinzip wie beim ATLAS

- Größte Unterschiede:

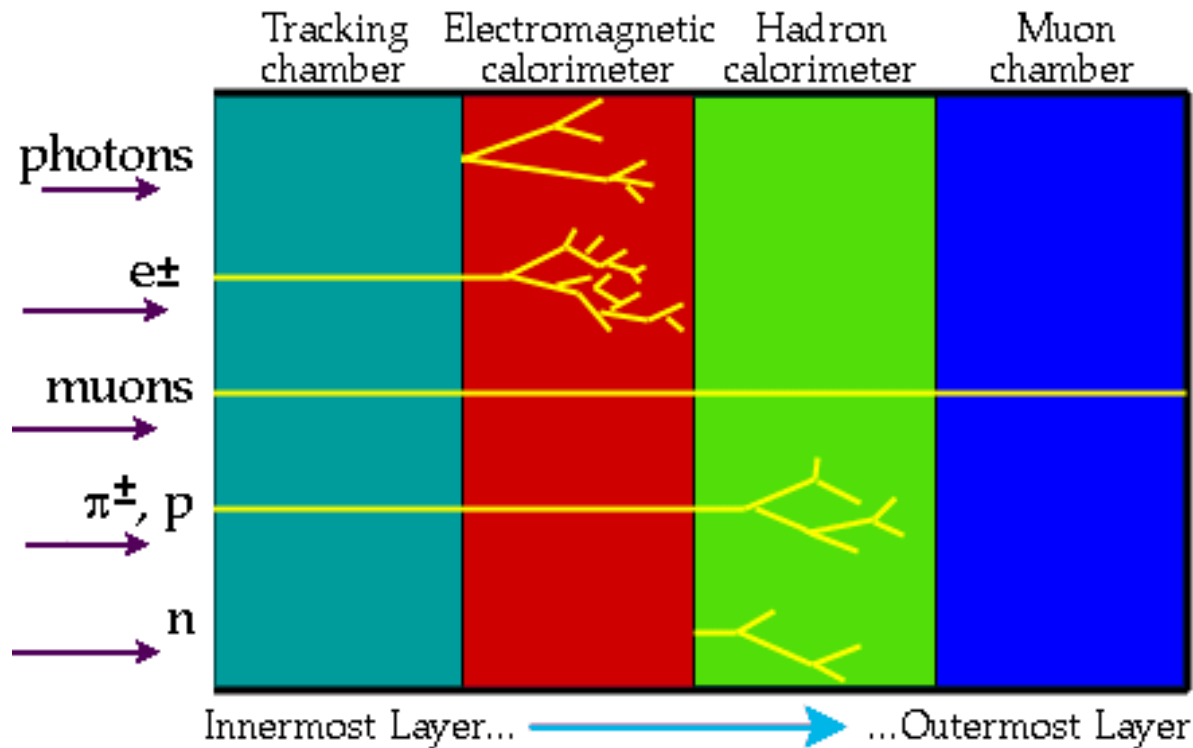
- Größeres B- Feld durch Eisenblöcke, Abstand zw. Myonkammern kleiner

- 10% bessere Kalorimetrauflösung





# Aufbau des CMS Detektors

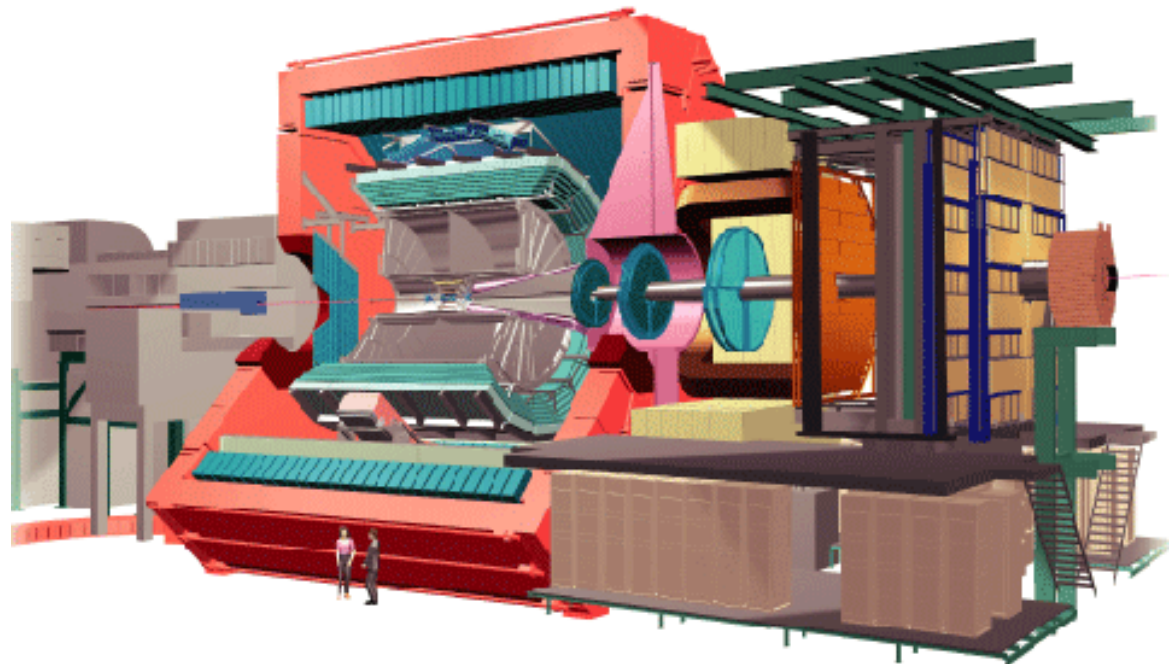


# Alice – A Large Ion Collider Exp.

Ziel:

- Erzeugung von Quark-Gluon-Plasma durch Kollision von p und Schwerionen
- Im QGP sind Quarks frei – normal gebunden (duo Meson, trio Baryon)
- Erforschen was die Quarks zusammen hält (QCD)

26m lang, 16m breit  
16m hoch  
10000t

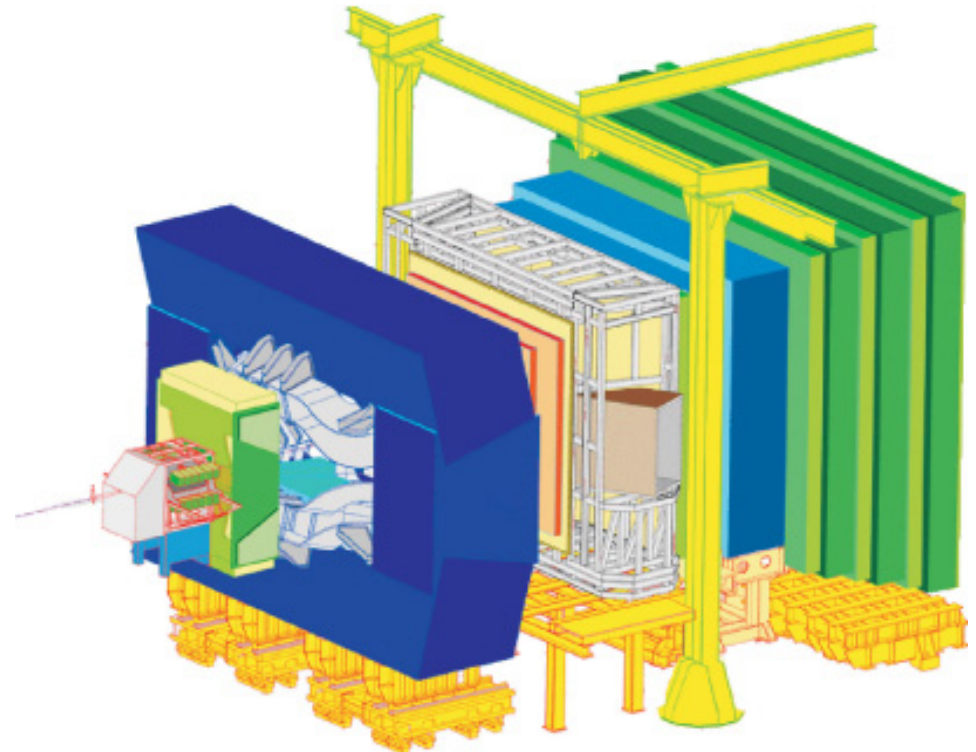


# LHCb – LHC Beauty

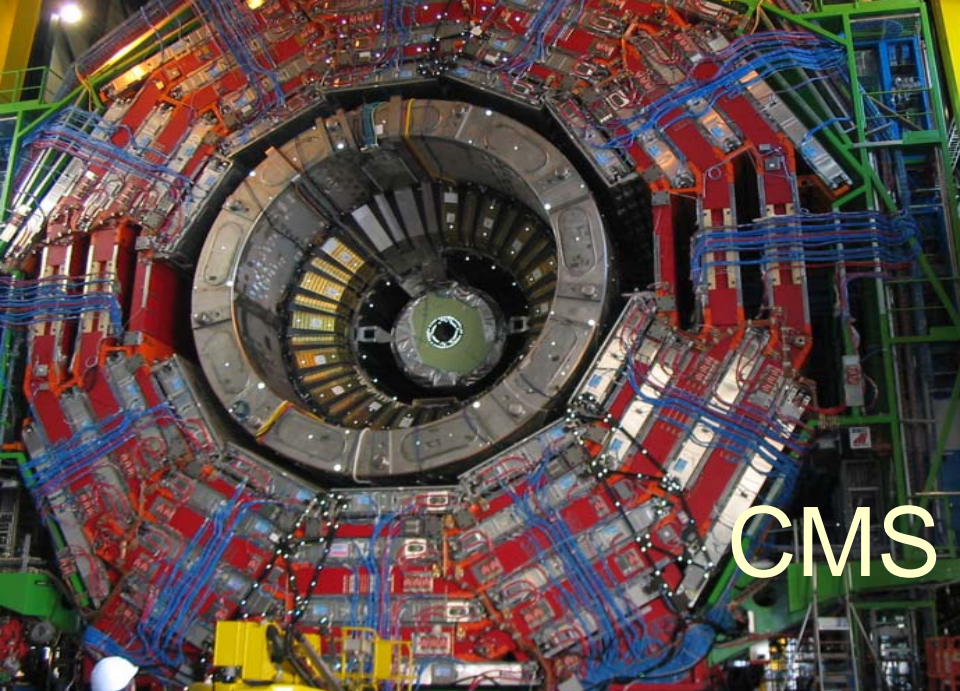
Ziel:

- Teilchen mit b-Quarks erforschen
- Interessieren sich vor allem für bestimmte Erhaltungssätze und die CP-Verletzung (C-charge, P-parity)

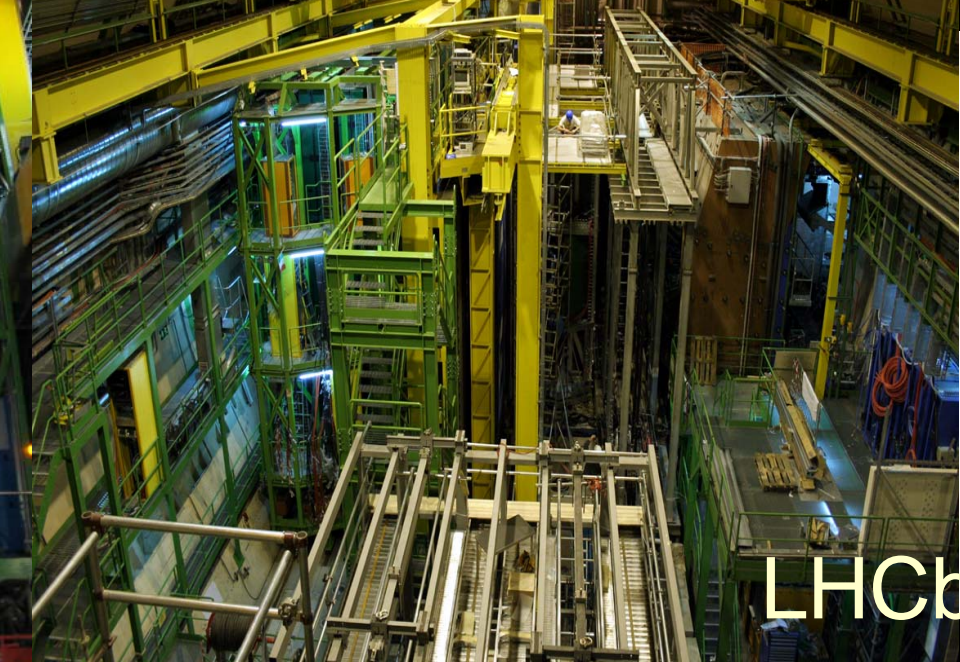
21m lang, 13m breit  
10m hoch  
5600t







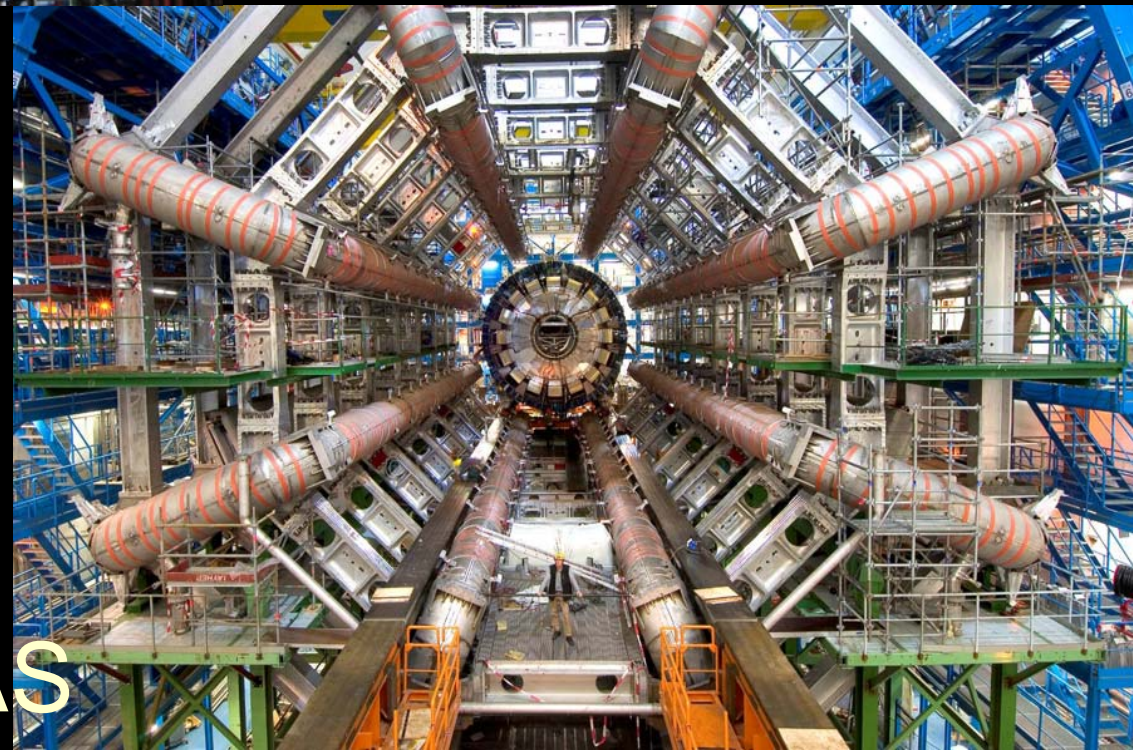
CMS



LHCb



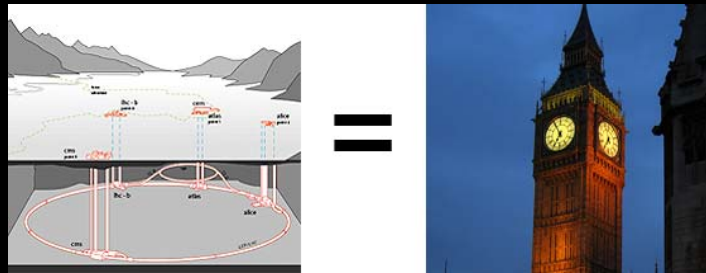
ATLAS



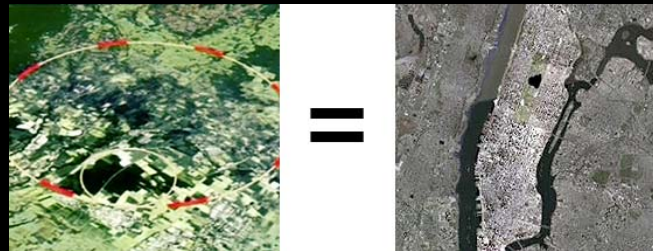


# LHC is Big....

- ATLAS is 100 meters underground, as deep as Big Ben is tall



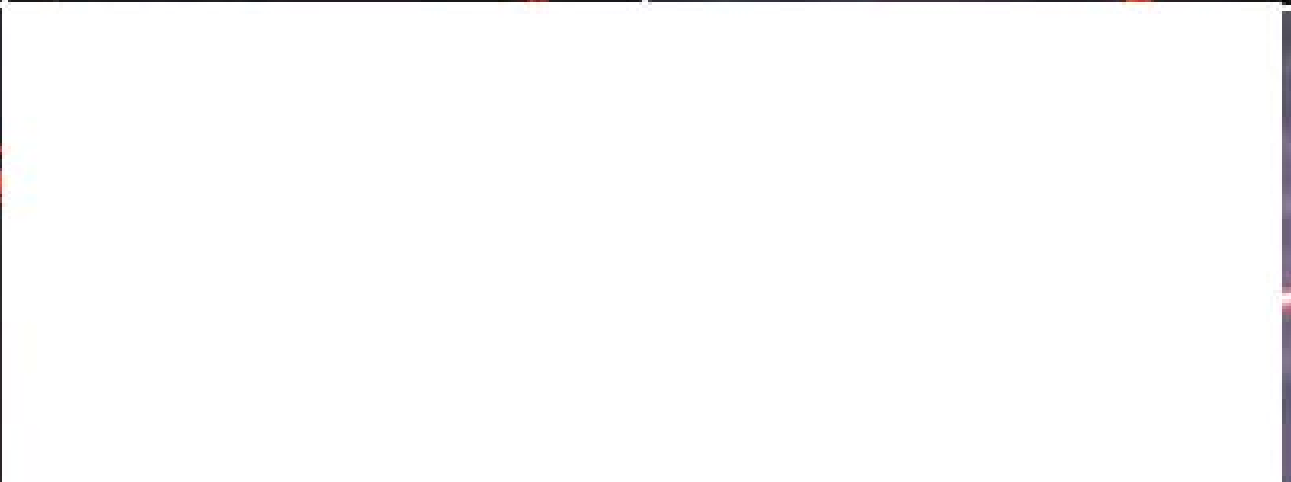
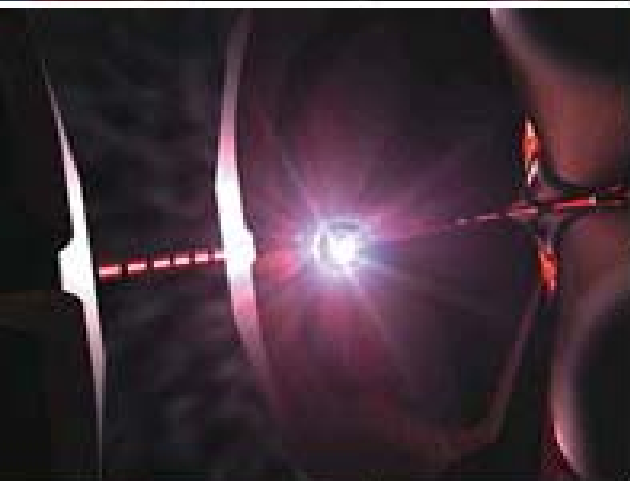
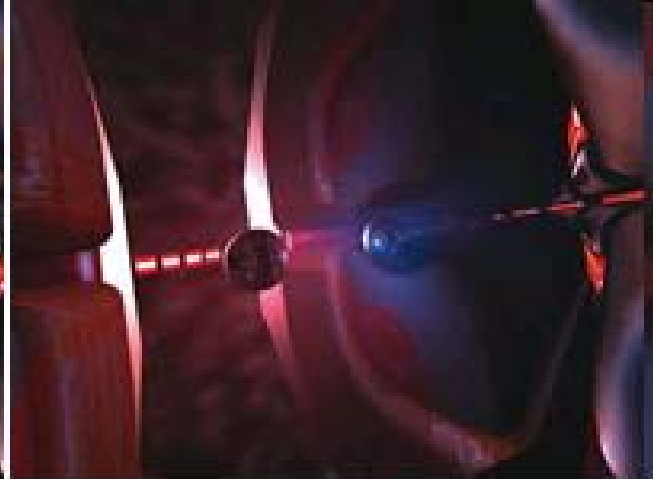
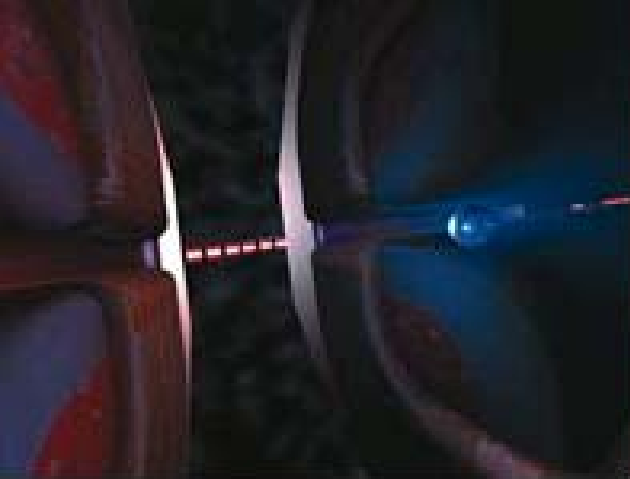
- The accelerator circumscribes 58 square kilometers, as large as the island of Manhattan



# LHC Will Require Detectors of Unprecedented Scale



- CMS is 12,000 tons (2 x's ATLAS)
- ATLAS has 8 times the volume of CMS





The image features a dark blue background with a complex, multi-layered diagram of particle tracks. A central red circle contains the text "LHC & Higgs" in white. The diagram consists of numerous overlapping circular and spiral paths, with some paths highlighted in red and others in white. The overall appearance is that of a particle detector's data visualization, possibly a bubble chamber or a similar tracking device, showing the paths of particles produced in a collision.

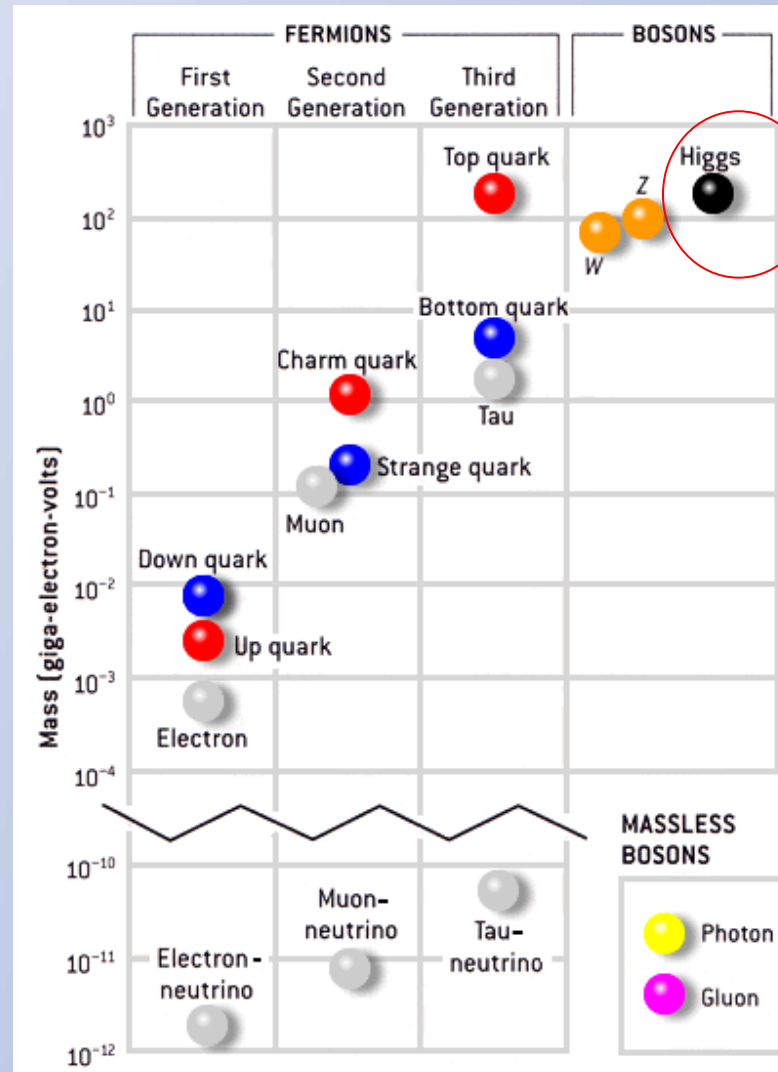
# LHC & Higgs

... the discovery at the LHC of a single Higgs boson of, say, 160 GeV and nothing else would be fully compatible with the Standard Model. This could be called a **nightmare** scenario for particle physics: the data would provide no hint whatsoever for physics beyond the Standard Model. However, we will argue below why we believe that such a scenario is very unlikely.

*Robert Harlander*

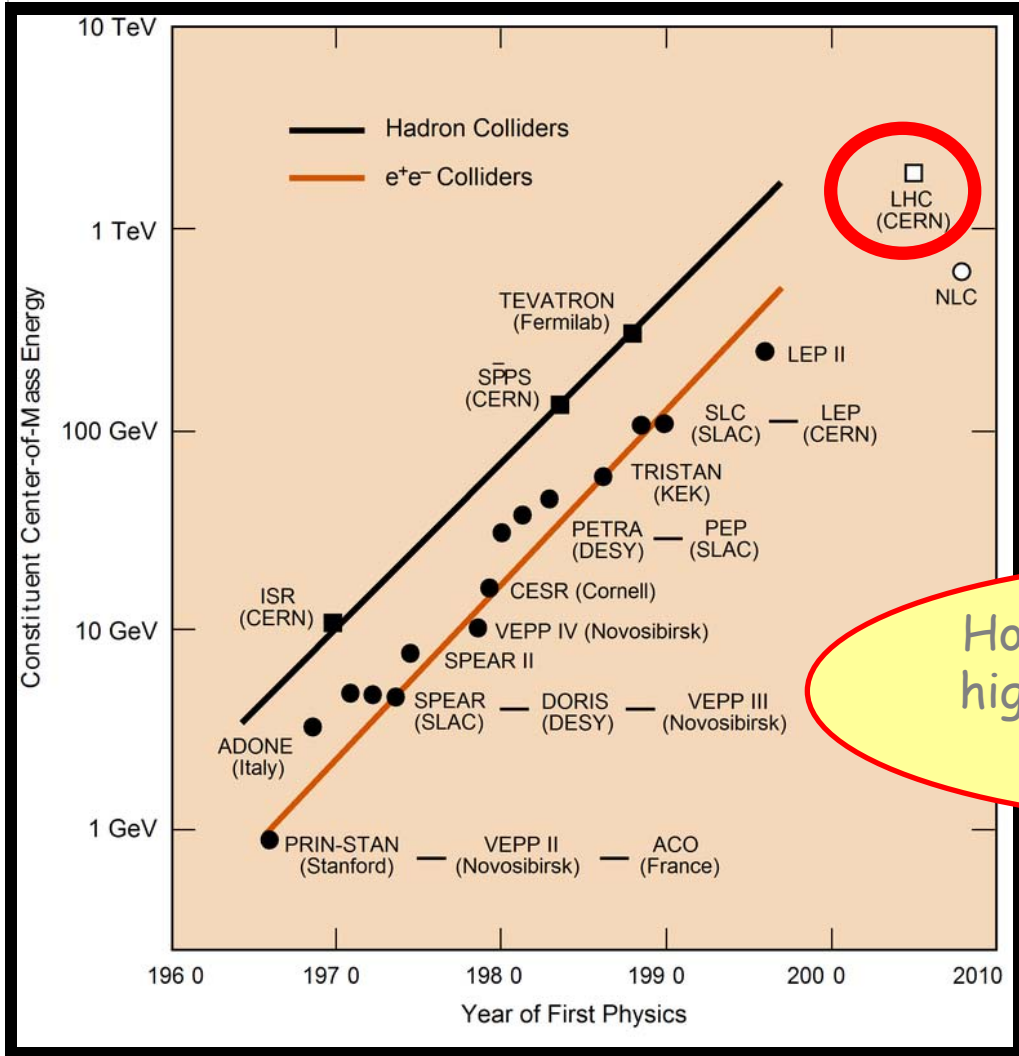
# Standardmodell

## Masse



Noch nicht gefunden!

# Is the Large Hadron Collider the Last in a Long Line of ever Higher Energy Particle Accelerators?



Presently there are no concrete plans for an accelerator to probe the next energy regime

How are we going to probe higher mass scales without higher energies?

## Materieteilchen

### 1. Familie

**u** Up-Quark

**d** Down-Quark

**e** Elektron

**$\nu_e$**  Elektron-Neutrino

### 2. Familie

**c** Charm-Quark

**s** Strange-Quark

**$\mu$**  Myon

**$\nu_\mu$**  Myon-Neutrino

### 3. Familie

**t** Top-Quark

**b** Bottom-Quark

**$\tau$**  Tauon

**$\nu_\tau$**  Tau-Neutrino

## Kraftteilchen

### Starke Kraft

**$g_1$**   **$g_5$**

**$g_2$**   **$g_6$**

**$g_3$**   **$g_7$**

**$g_4$**   **$g_8$**

8 Gluonen

### Schwache Kraft

**$W^-$**  W-Minus

**$Z^0$**  Z-Null

**$W^+$**  W-Plus

### Elektromagnetische Kraft

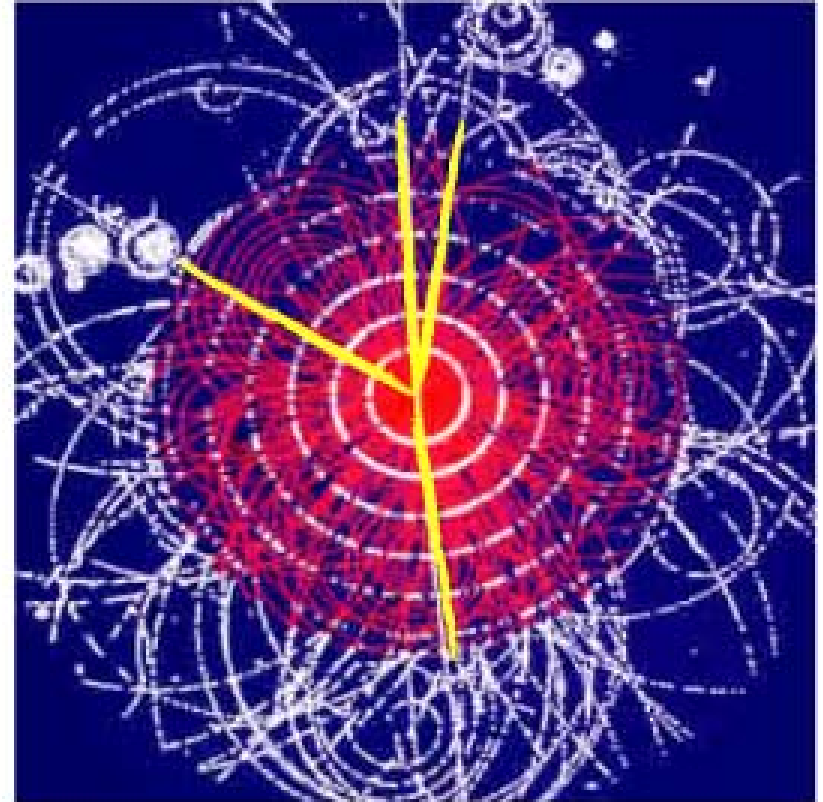
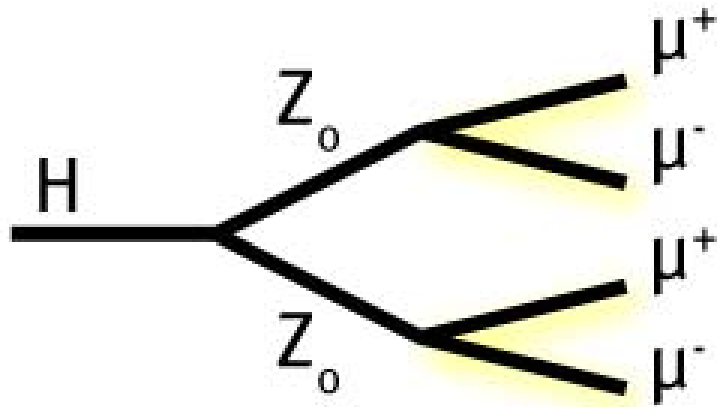
**$\gamma$**  Photon

## Massenerzeugung

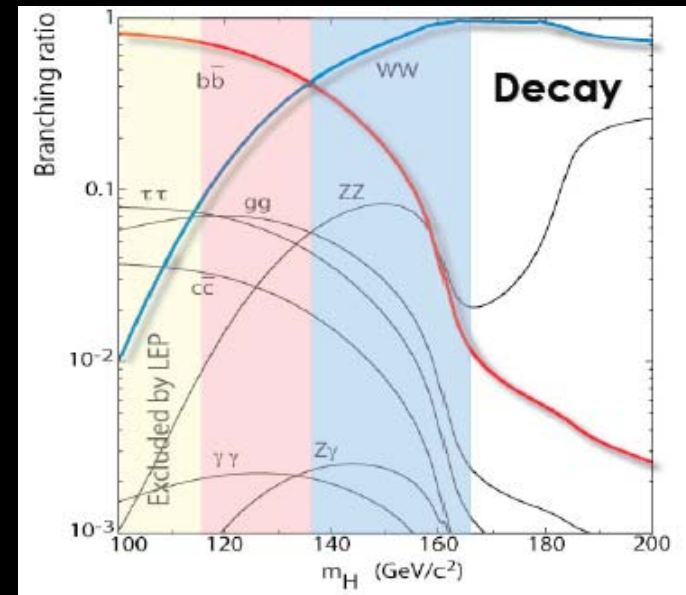
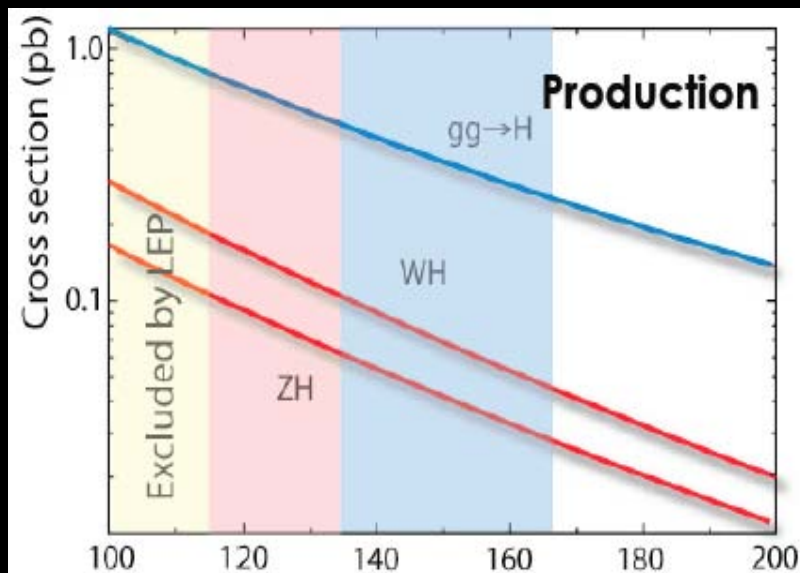




# Möglicher Zerfall eines Higgs-Teilchens



# Higgs at the Tevatron



High mass: Look for  $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$

Large  $gg \rightarrow H$  production rate

Low Mass:  $H \rightarrow b\bar{b}$ , Huge QCD  $b\bar{b}$  background

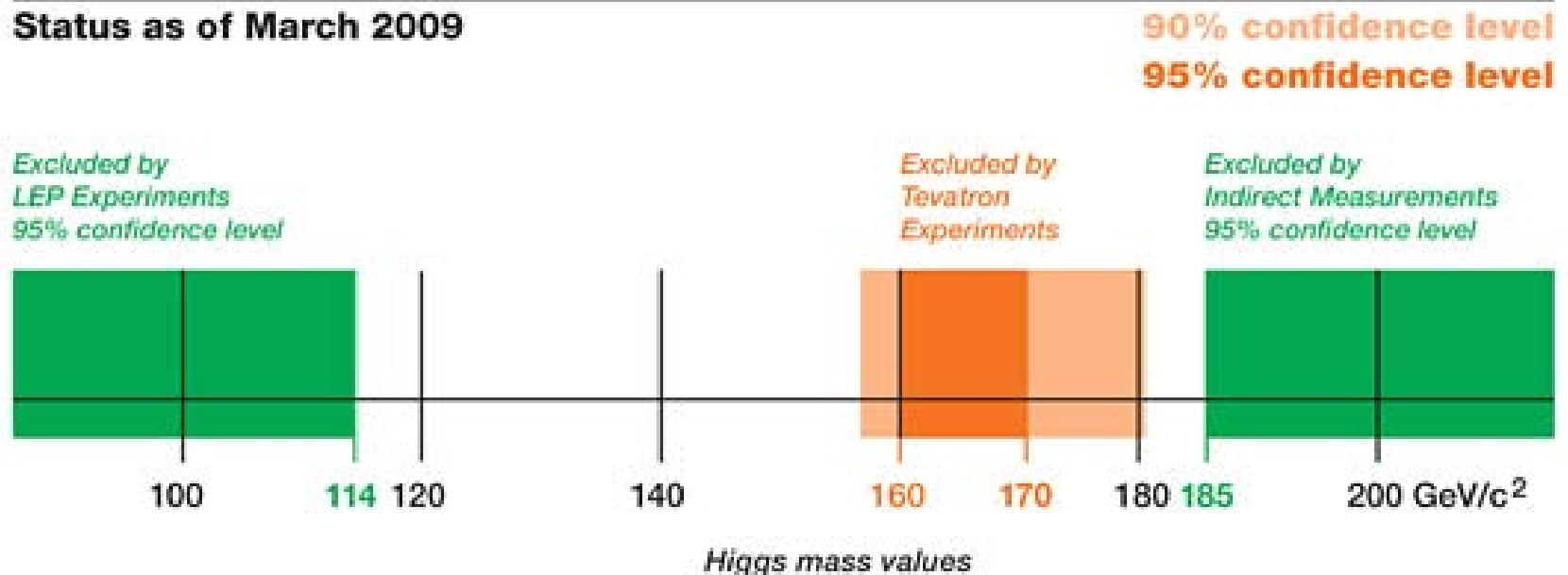
Use associated production with W or Z

# SM Higgs Searches at Tevatron

- Assumes Standard Model !!!!

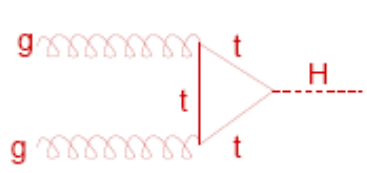
## Search for the Higgs Particle

Status as of March 2009

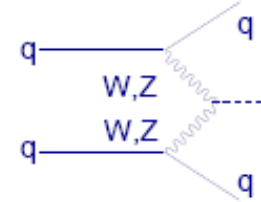


# Higgs-Produktion in pp-Kollisionen

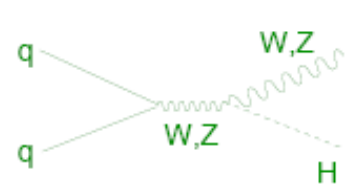
gluon-gluon fusion



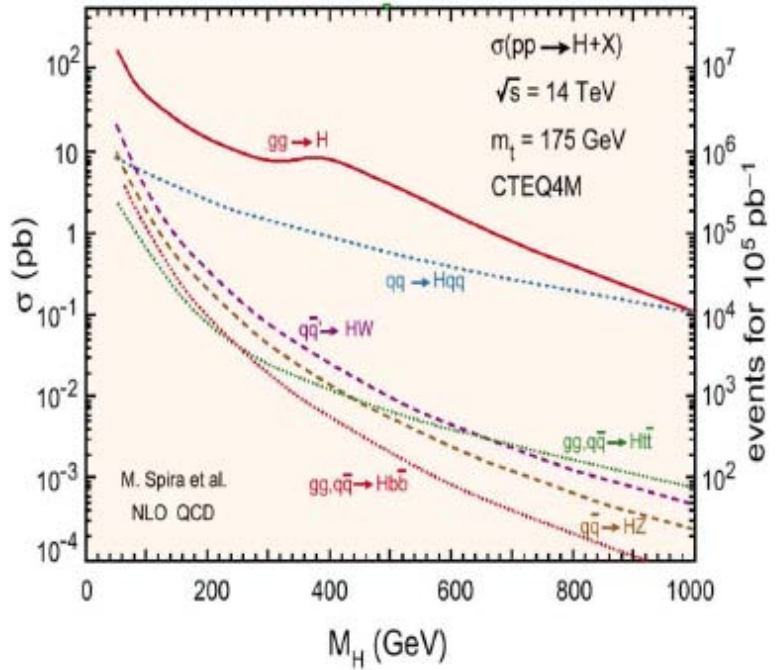
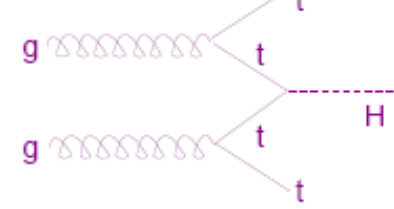
vector boson fusion, VBF



Higgs-Strahlung



associated production

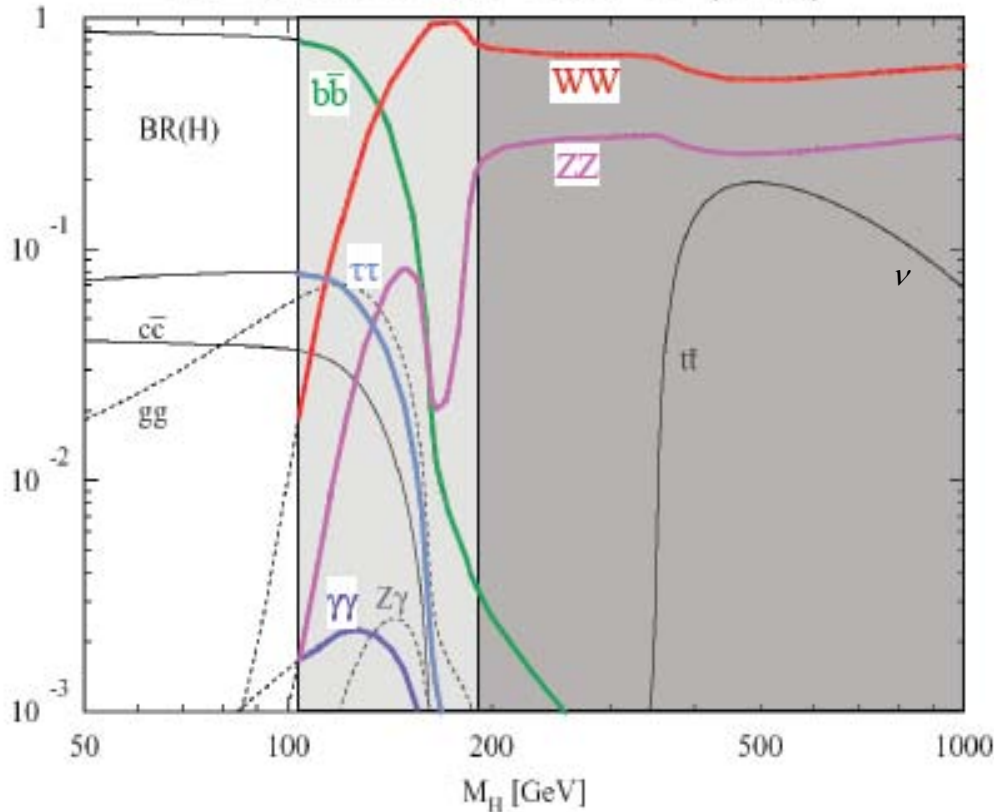


Pro Jahr können 10 000 – 1 000 000 Higgs Bosonen erzeugt werden  
 ( im Vergleich zum Untergrundprozesse, um Faktor 100 000 kleiner )

# Zerfallskanäle

- Am LHC stehen mehrere Zerfallskanäle des Higgs-Bosons zur Untersuchung, die komplett von der Higgs-Masse abhängen

M. Spira Fortsch. Phys. 46 (1998)



**Geringe Masse**  $m_H < 2m_Z$

- $H \rightarrow b\bar{b}$ ,  $\bar{H} \rightarrow \gamma\gamma$ , **Untergrund !!**
- $H \rightarrow \tau^+\tau^-$  (via VBF),
- $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ ,
- $H \rightarrow WW^* \rightarrow 2l2\nu$  (via VBF)

**Große Masse**  $m_H > 180 \text{ GeV}$

- Der Goldene Kanal :

$$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$$

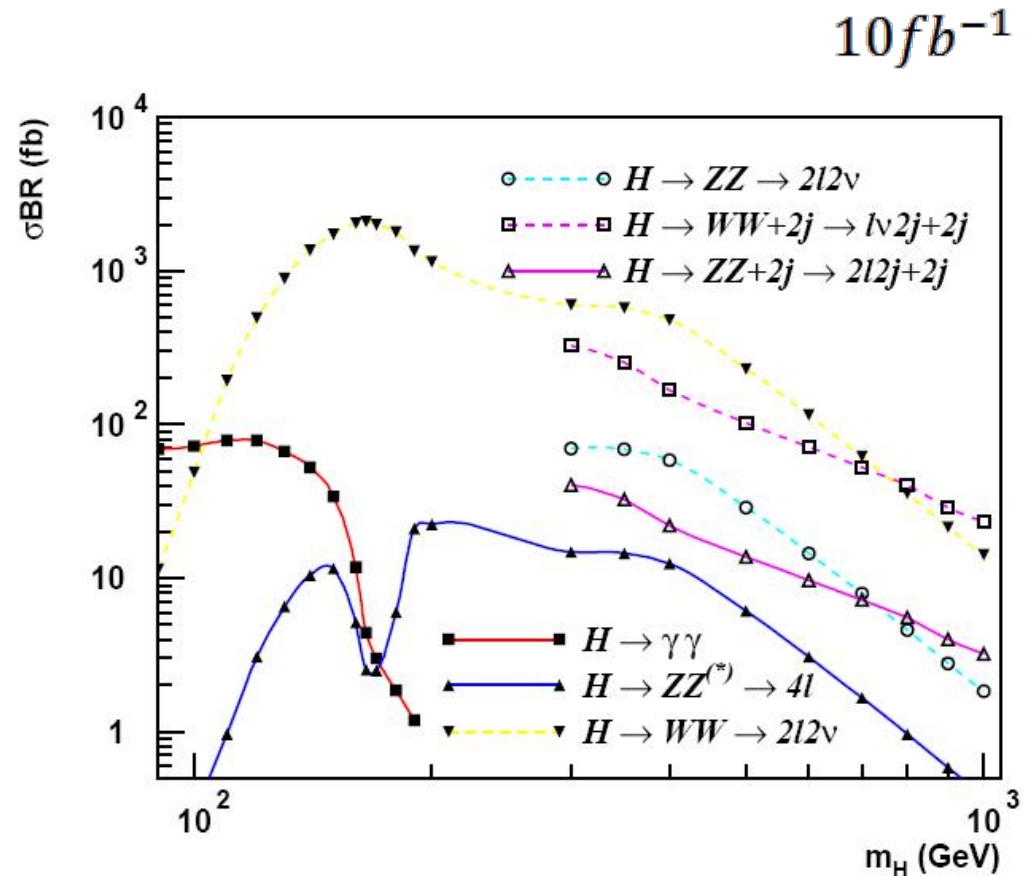
(  $H \rightarrow WW^* \rightarrow 2l2\nu$  schwieriger wegen  $2\nu$  )

- Bei sehr große Masse  $m_H \geq 800 \text{ GeV}$

$$H \rightarrow WW \rightarrow l\nu jj$$

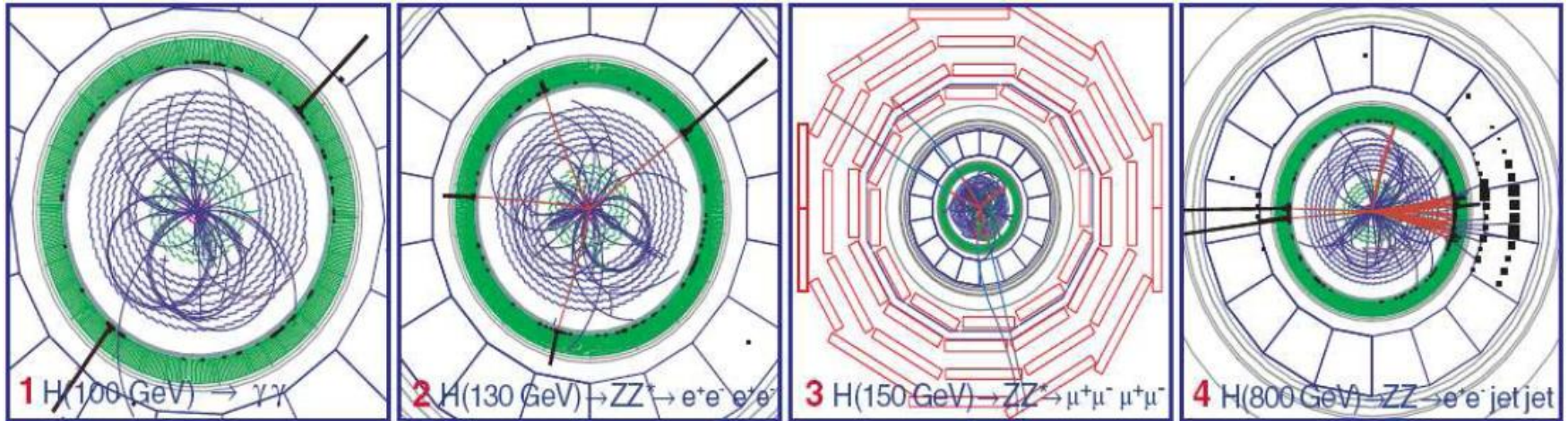
# Erwartete Detektion am ALTAS

- Linien = detektierbar
- Rest mit Neutrinos = nicht direkt detektierbar
- $H \rightarrow \gamma\gamma$  einige hunderte bis 150GeV
- Bester Kanal  $H \rightarrow 4l$ 
  - schwächer aber komplettes Spektrum

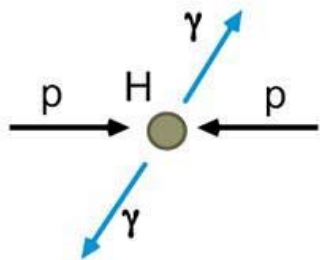




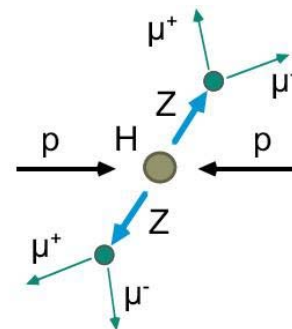
# CMS – Simulationen von Zerfällen bei verschiedener H-Masse



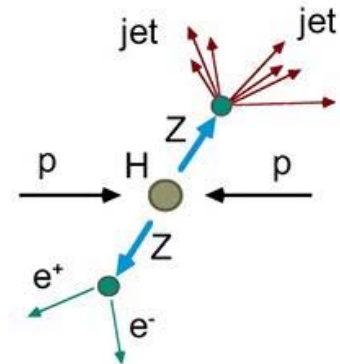
80-140 GeV  
 $H \rightarrow \gamma\gamma$



130-700 GeV  
 $H \rightarrow l^+l^-l^+l^-$



0,5-1 TeV  
 $qqH \rightarrow l^+l^-jj$



# Strategie für die Higgs-Suche

- Wie wird ein Higgs-Boson in den verschiedenen Kanälen gesucht?
  - Suche Signal mit bestimmten Zerfallsprodukte
  - Welche Untergrundprozesse gleiche Endprodukte ergeben
  - Unterscheiden zw. Signal und Untergrund, Suche nach den richtigen Auswahlkriterien

# Signifikanz & Signale

- Ziel der Detektoren ATLAS und CMS - Sicherstellung das Higgs entdeckt werden kann (100GeV-1TeV)

- Signalsignifikanz:  $\sigma_S = \frac{N_{Signal}}{\sqrt{N_{Hintergrund}}}$  (im Signalbereich)

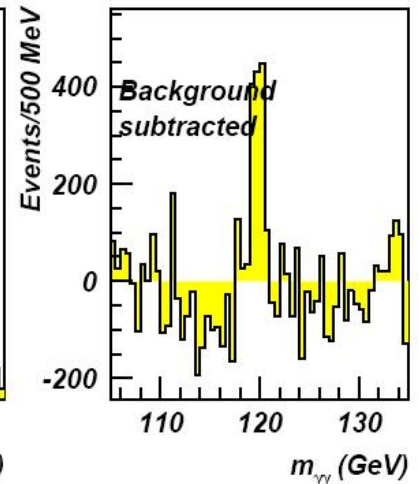
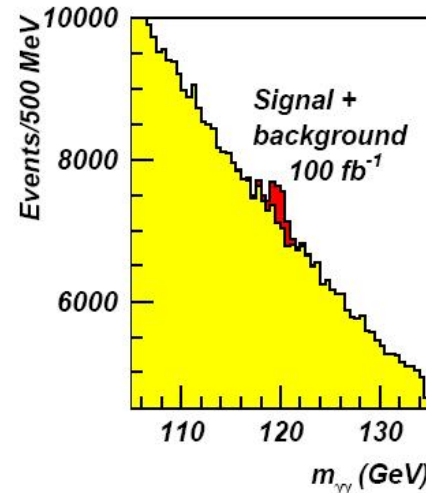
- $\sigma_S > 5$  bestätigte Entdeckung

- 2 hochpräzise Entdeckungskanäle

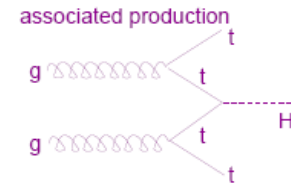
$H \rightarrow 4l, H \rightarrow \gamma\gamma$

- z.B. 120GeV Higgs in CMS

$H \rightarrow \gamma\gamma; 100fb^{-1}; \sigma_S = 10,3$



# Zerfallskanal $t\bar{t}H, H \rightarrow b\bar{b}$



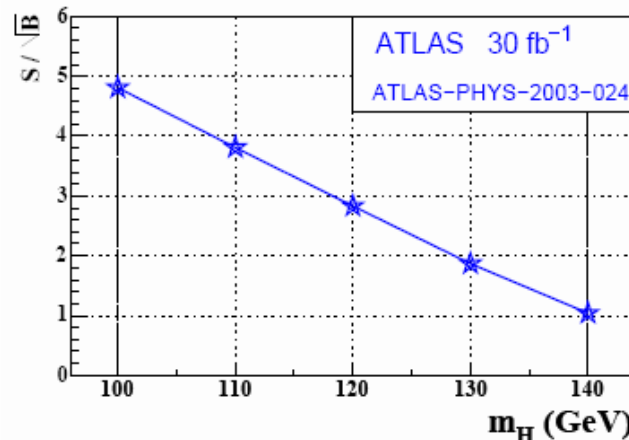
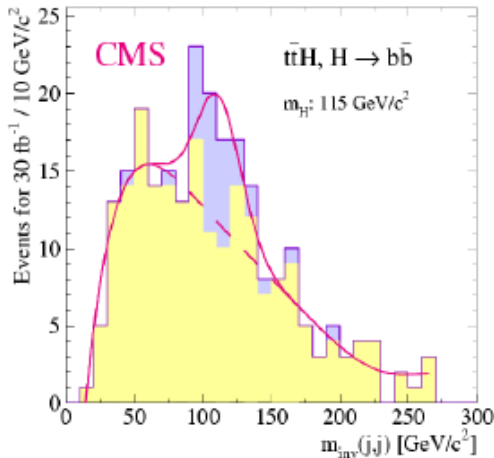
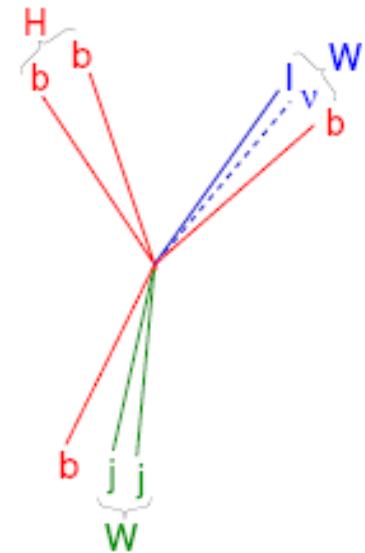
- Assoziierter Produktionsprozess für niedrige Higgs-Masse ( 120 GeV ), Endprodukte

- 1.)  $t \rightarrow Wb \rightarrow l\nu b$
- 2.)  $t \rightarrow Wb \rightarrow jjb$

- Präzise Messung des primären und sekundären Vertexes, Bestimmung des 4b Jets ( bestimmt, ob ein b-Jet oder ein leichter Jet ist )

- Sehr guter Verständnis des Untergrundes (  $ttbb, ttjj, Ztt$  )

- Endprodukte:



Signal significance ( $S/\sqrt{B}$ ) at  $30 \text{ fb}^{-1}$ :  $3.4\sigma$  for  $m_H = 115 \text{ GeV}$

# Zerfallskanal

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

Signal

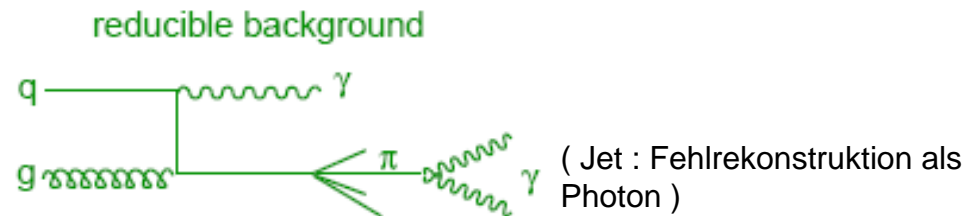


- Die Wahrscheinlichkeit für den Zerfall ist  $10^3$  kleiner als bei  $H \rightarrow b\bar{b}$ , aber der Kanal ist trotzdem mindestens genau so gut; Untergrund leichter zu unterdrücken, weil wir die Photonen viel besser rekonstruieren können

## Untergrundprozesse :

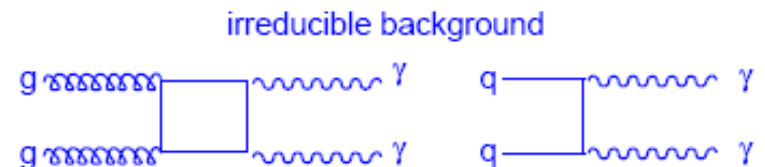
- Reduzierbar (Unterscheidung vom Signal)

$$qg \rightarrow q\gamma \rightarrow q\gamma\gamma$$

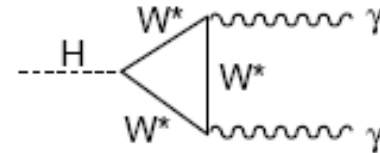


- Nicht reduzierbar (gar kein Unterschied zum Signal)

$$gg \rightarrow \gamma\gamma, q\bar{q} \rightarrow \gamma\gamma$$



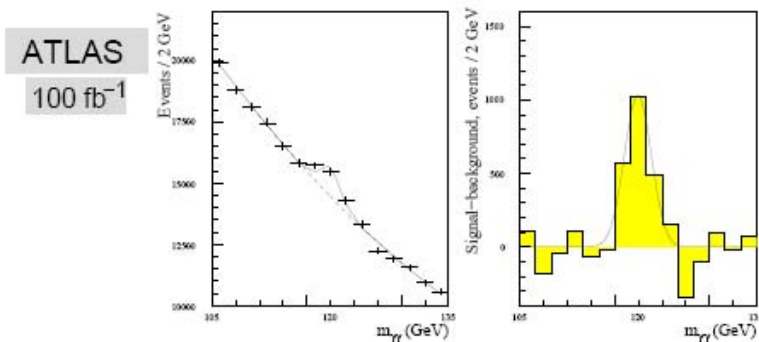
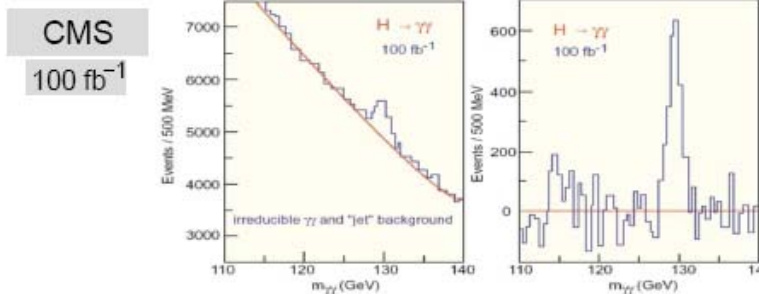
# Zerfallskanal



## Ergebnisse aus der Simulation

Signal significance ( $S/\sqrt{B}$ ) at  $100 \text{ fb}^{-1}$ :  $3-4\sigma$  for  $m_H < 150 \text{ GeV}$

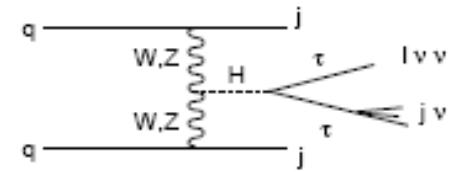
CMS has a 10% better calorimeter resolution than ATLAS.



# Zerfallskanal

$$qqH, H \rightarrow \tau^+ \tau^-$$

Signal

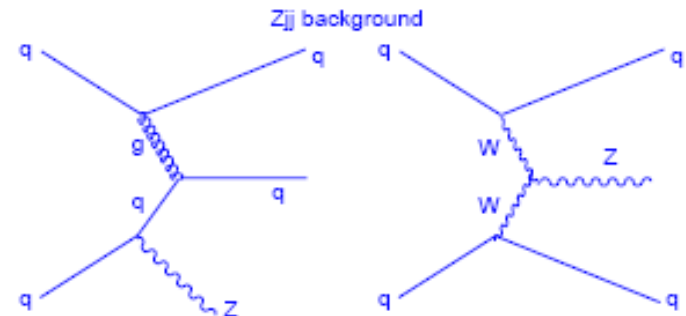


## ■ Signal ( nur in VBF untersuchen)

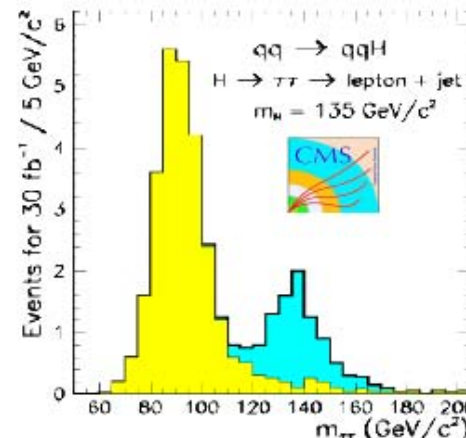
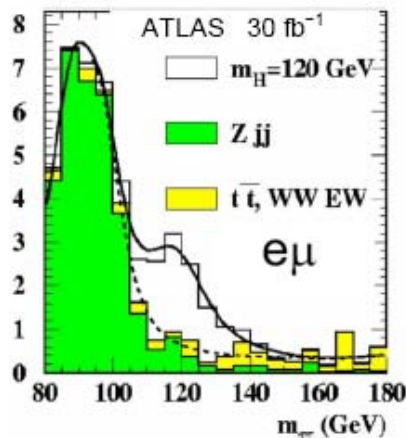
- **Typisch** : Die Jets fliegen in Entgegengesetzte Vorwärts Richtung
- Keine in Zentralen Bereich

## ■ Untergrundprozesse $Zjj, t\bar{t}+jets, WWjj$

- **Typisch**: Jets kommen aus alle Richtungen, manche sogar mehr im zentralen Bereich



Signal significance ( $S/\sqrt{B}$ ) at  $40 \text{ fb}^{-1}$ :  $>5\sigma$  for  $m_H < 140 \text{ GeV}$

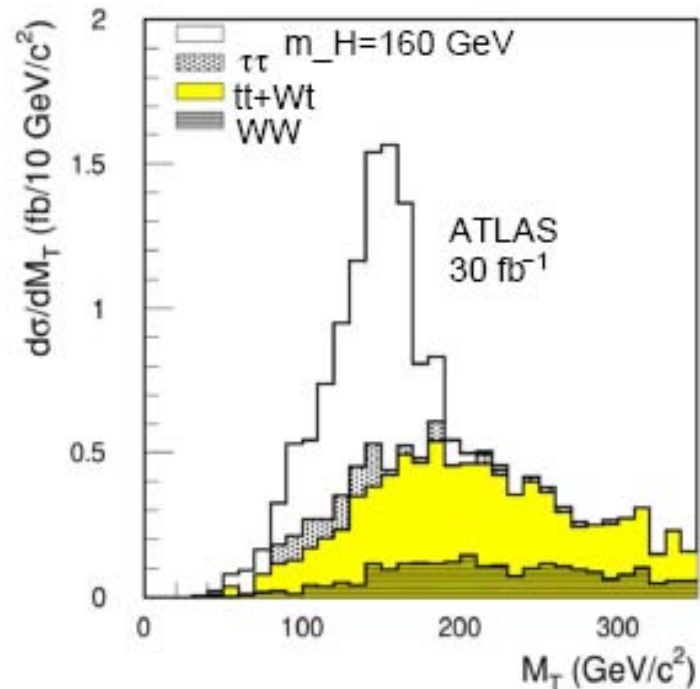


Man kann das Signal sehr gut vom Untergrund trennen



# Zerfallskanal $(qq)H, H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow l\nu l\nu$

- hauptsächlich durch VBF
- Der wichtigste Kanal im Bereich von  $m_H = 170\text{GeV}$
- Erforderlich ist eine sehr gute Messung der Fehlende Energie
- Dominierende Untergrundprozesse :  $WW, WbW\bar{b}$  Drell-Yan  $ee, \mu\mu$   $t\bar{t}, \tau\tau$



• Bemerkung : Ein Kanal, der eine sehr schnelle Entdeckung ermöglicht, aber keine präzise Messung der Masse ( $M_T(\text{GeV}/c^2)$  von beiden Neutrinos )

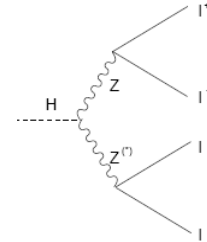
• Die Signal Signifikanz für  $m_H \approx 170\text{GeV}$  ist  $5\sigma$  für  $10\text{fb}^{-1}$

# Zerfallskanal

$$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$$

- Relativ „sauberer“ Endzustand

- Ein Paar mit  $m_{2l}$  -peak bei der Z-Resonanz



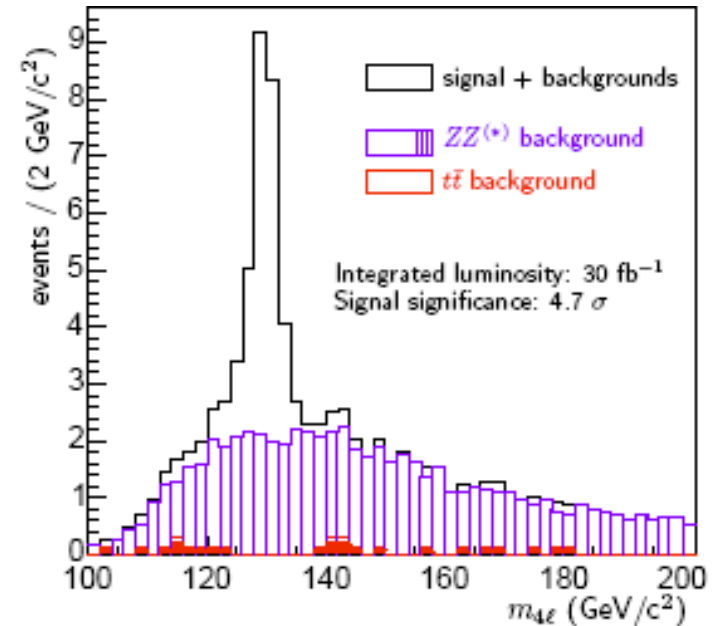
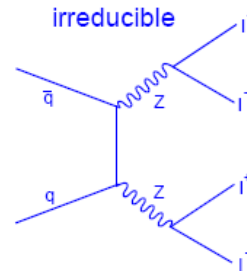
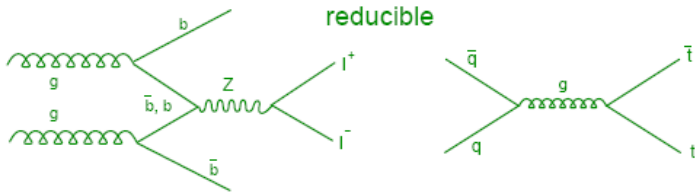
Signal

- Reduzierbarer Untergrund :  $Zb\bar{b}, t\bar{t}$

- Die Leptonen sind von einem Jet umgeben-> leicht zur unterscheiden vom Signal

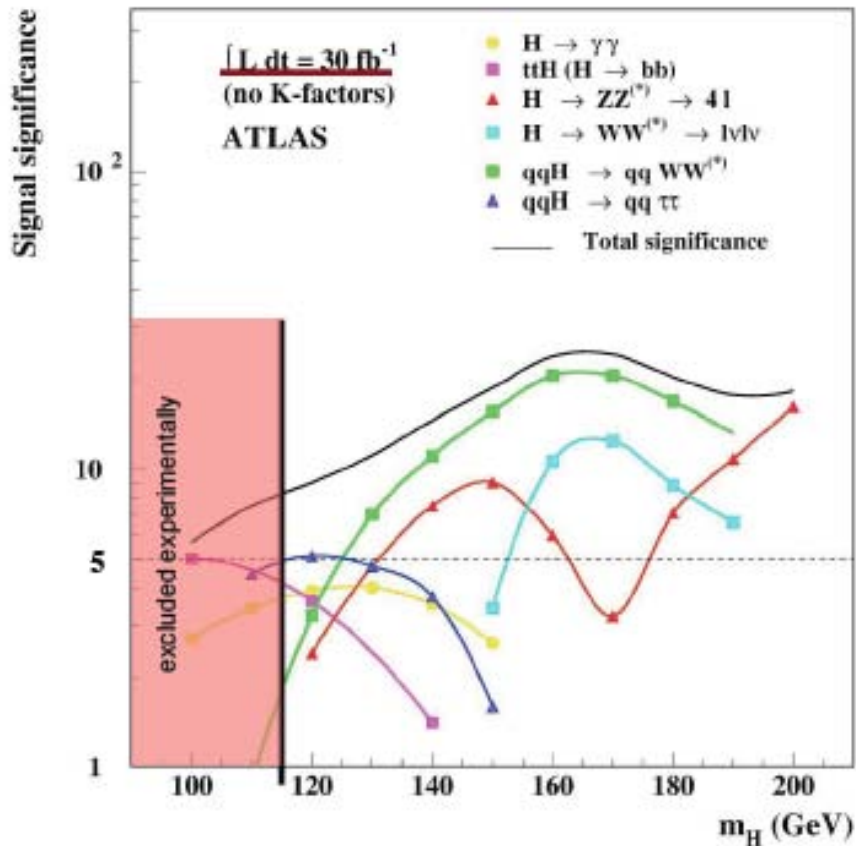
- Nicht reduzierbarer Untergrund :  $ZZ \rightarrow 4l$

- Sehr klein



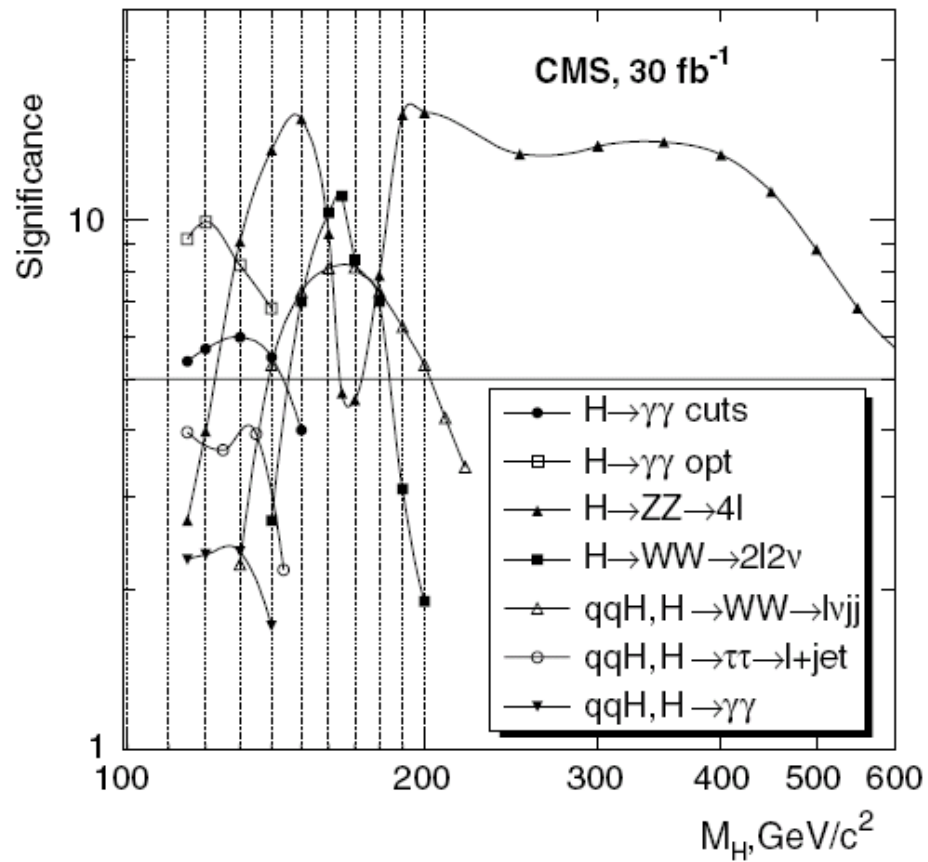
Signal significance for  $H \rightarrow 4l$  at  $30 \text{ fb}^{-1}$ : 3-5 $\sigma$  for  $m_H < 200 \text{ GeV}$ .

# Entdeckungspotential für geringe Higgs-Masse



• Zeigt die Signal Signifikanz für jeden einzigen Zerfallskanal, in Abhängigkeit von der niedrigen ( zw. 114 und etwa 200 GeV ) Higgsmassen und die gesamte Signal Signifikanz, wenn man alle Kanäle zusammen addiert.

Erforderlich ist die Kombination aus allen Kanälen für die  $5\sigma$  Signifikanz in den ersten drei Jahre



**Figure 9.** Signal significance for a Standard Model Higgs boson. The first four channels correspond to gluon-fusion modes, the other ones are WBF. From [86].

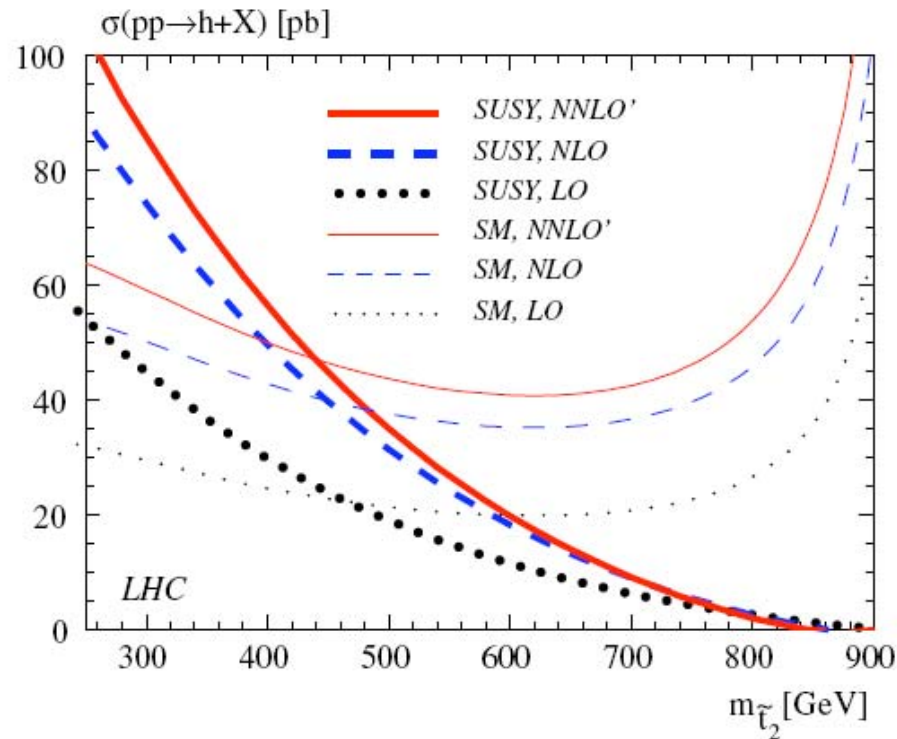


Figure 17. Thick lines: gluon-fusion cross section in the MSSM (for details, see [143, 144]). The thin lines show the result when the squark effects are neglected.

**In SUSY: Higgs Produktion mit Bottom Quarks kann signifikanten Beitrag zu gesamtem Higgs-Produktions Wirkungsquerschnitt leisten – kann Sogar die Komponente der Gluon-Verschmelzung übersteigen**

# Ausblick

- Die LHC – Detektoren (ATLAS, CMS) sind für die Higgs-Suche  $5\sigma$  konstruiert, so dass sie das ganze Massenspektrum abdecken
- Die  $5\sigma$  - Signal Signifikanz kann im ganzen Massenbereich schon nach einem Jahr erreicht werden ( wenn alles gut läuft.. )



A complex visualization of particle detector data, likely from the LHC. It features a central red circular region with concentric rings, surrounded by a dense network of white and blue lines and nodes, resembling a particle collision event or detector structure. The background is dark blue.

LHC wird hochgefahren

- **19.11.09 11:43 Gestern wurde der LHC zum Betrieb freigegeben. Die Teams bereiten jetzt die ersten zirkulierenden Strahlen des Jahres 2009 vor.**
- 20.11.09 12:31 Die Betriebsmannschaft bereitet den LHC vor und sie werden versuchen den ersten Strahlen kreisen zu lassen. Das kann jederzeit, Tag und Nacht, geschehen!
- 17:55 "Wenn alles gut geht, fangen wir heute abend an Teilchen in den LHC zu injizieren", sagte CERN Generaldirektor Rolf-Dieter Heuer.
- 19:09 Der Strahl im Uhrzeigersinn ist gerade halb um den LHC gekreist.**
- 19:23 Der Strahl Punkt 5 (das CMS-Experiment) und passiert und ist bei Punkt 6 angekommen.
- 19:34 Quench (Magnetproblem) in einem Sektor. Soll in Kürze behoben sein.
- 19:44 Quench ist beseitigt, alle Magnete wieder im Betrieb, der Start geht weiter.
- 20:27 Der Strahl ist soeben bei Punkt 7 angekommen - nur noch drei Sektoren sind übrig!
- 20:30 Strahl ist bei Punkt 8 - noch zwei Sektoren!
- 20:33 Nur noch ein Sektor!
- 20:38 Wir haben den Ring geschafft!**
- 21:15 Die Teams arbeiten daran die Strahlqualität zu verbessern, bevor sie den Strahl gegen die Uhrzeigerrichtung injizieren. Strahl 1 hat mehrere Runden im LHC gedreht.
- 21:26 Mehr als 500 Runden, die Umlaufbahn verbessert sich schnell.**

21:55 Die Hohlraumresonatoren sind eingeschaltet! Wir warten auf eine gute Strahlqualität bevor wir versuchen den Strahl zu fixieren.

**22:02 Wir haben ihn fixiert! Erster zirkulierender Strahl 2009!**

22:03 Jetzt gehts schnell: 100 000 Runden!

**22:07 10 000 000 Runden**

**22:34 Vorbereitung der Magnete für Strahl 2.**

**23:12 Willkommen, Strahl 2! Ein Sektor ist geschafft.**

23:14 Bis Punkt 6 und weiter zu Punkt 5 (CMS-Experiment).

23:17 Strahl 2 bei Punkt 5 - wieder eine halbe Runde, aber dieses Mal gegen den Uhrzeigersinn.

23:20 Strahl 2 bis Sektor 3 - geschafft!

23:26 Jetzt ist er bei Sektor 2.

**23:35 Bei Punkt 1 (ATLAS-Experiment) - nur noch ein Sektor ist übrig.**

23:52 Zweiter Kreis ist geschlossen!! Die Hüte fliegen durch die Luft im Kontrollzentrum des CERN.

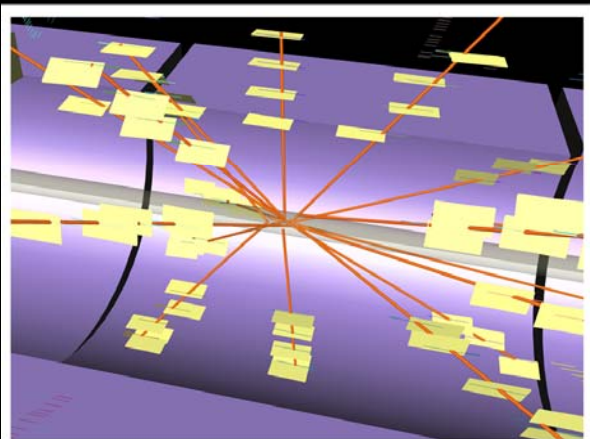
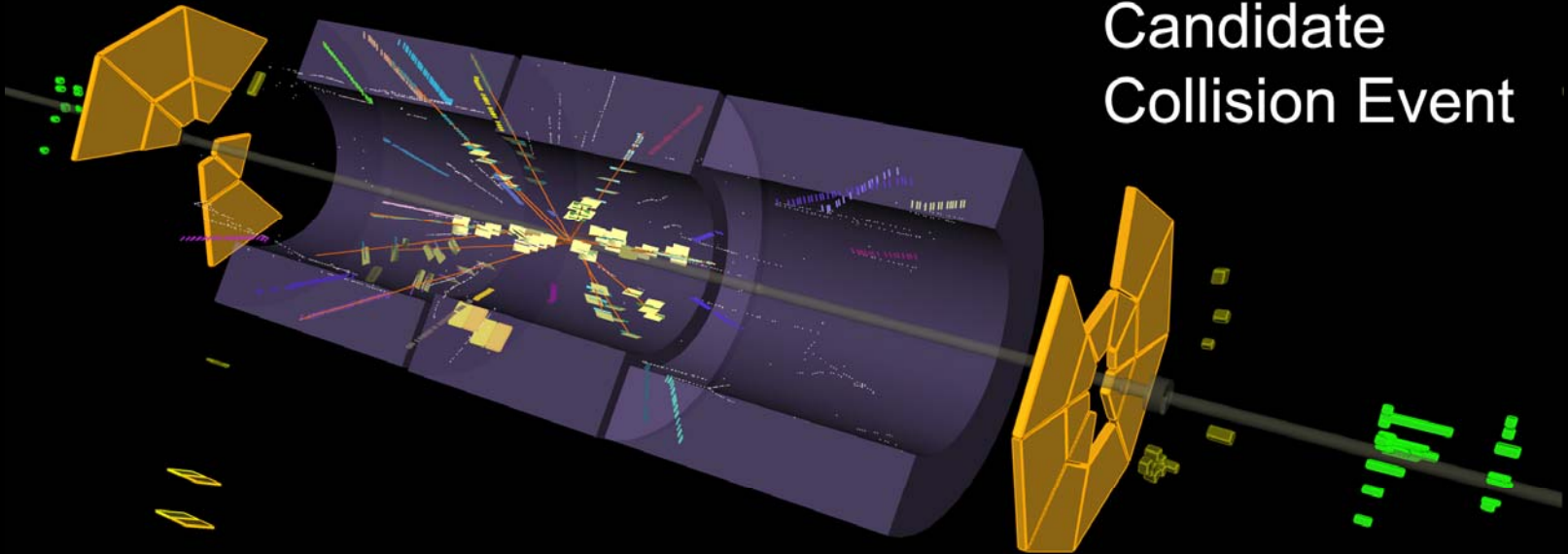
23:54 Die Resonatoren sind bereit, man kann versuchen Strahl 2 zu fixieren.

21.11.09 0:11 Strahl 2 ist fixiert!

0:27 Ordnungsgemäßer Betrieb von Strahl 2: er wird alle 100 000 Runden vernichtet und dann neu injiziert.

**0:31 Meine Damen und Herren, es ist fast schon Zeit ins Bett zu gehen. Der LHC ist an und läuft regulär. Das Betriebsteam stellt kontrollierbare Strahlen ein und testet sie.**

# Candidate Collision Event



 **ATLAS**  
EXPERIMENT

2009-11-23, 14:22 CET

Run 140541, Event 171897

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



Delay  
3.0s

Run

Event

Mon Nov 23 19:20:55 2009 CEST

Lumi block id: 25

Event Filtering is OFF



Summary View

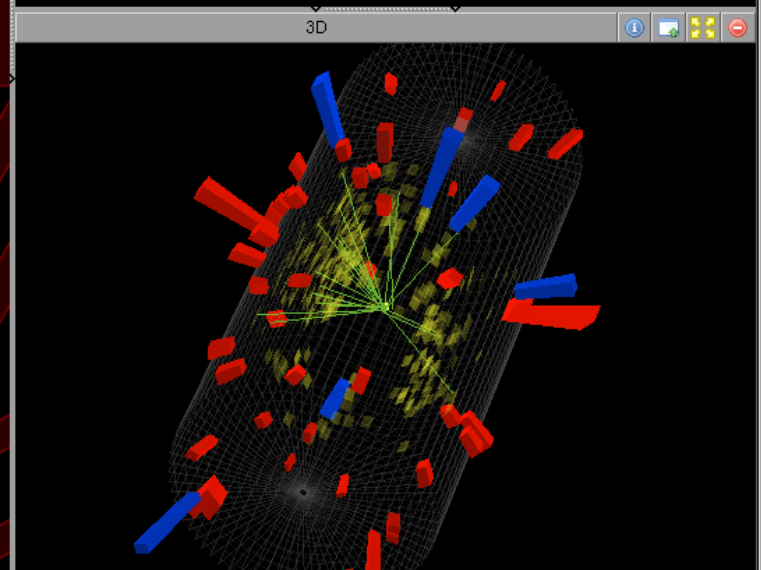
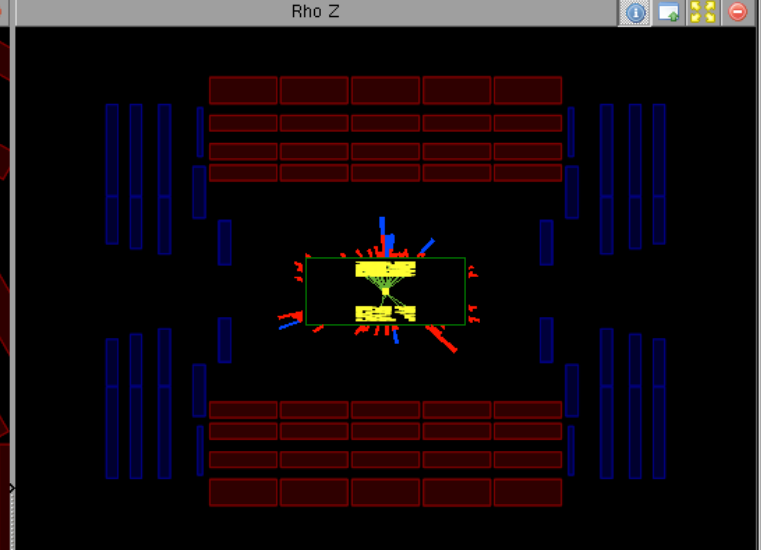
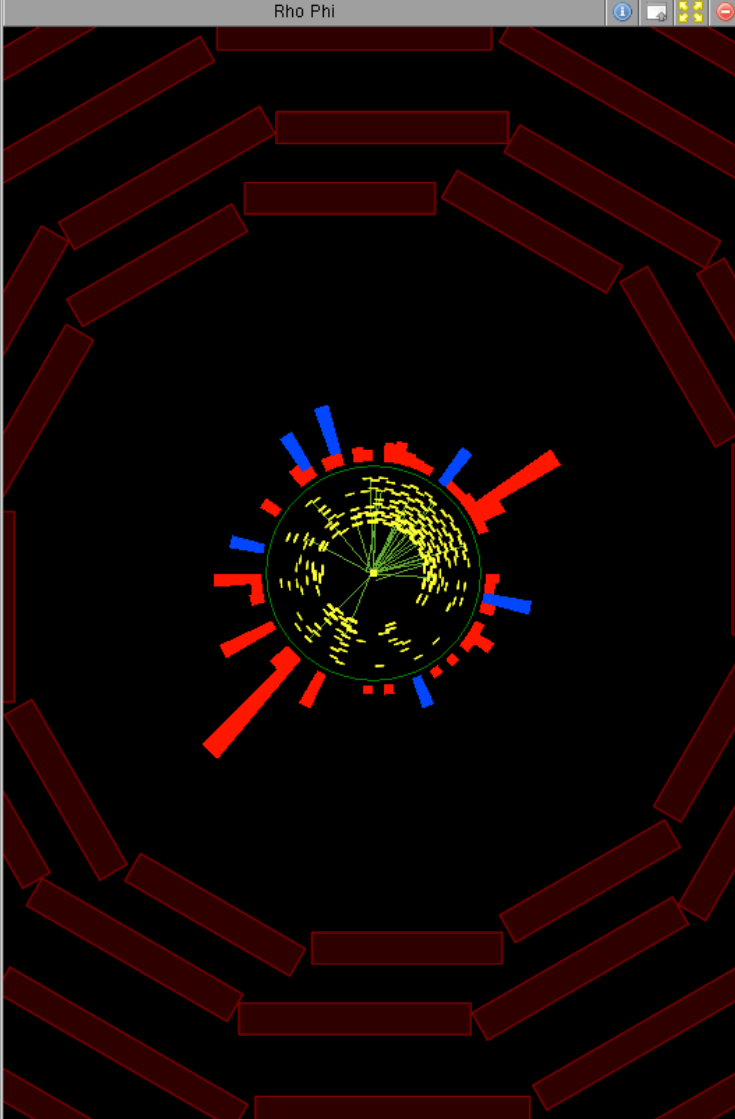
Views

Add Collection

- ECal
- HCal
- Jets
- Tracks

	pt	eta	phi
<input checked="" type="checkbox"/> Track 0	4.9	-0.2	0.3
<input checked="" type="checkbox"/> Track 1	5.0	-0.1	0.2
<input checked="" type="checkbox"/> Track 2	3.7	-0.8	0.3
<input checked="" type="checkbox"/> Track 3	4.0	-0.7	0.3
<input checked="" type="checkbox"/> Track 4	4.6	-0.4	0.6
<input checked="" type="checkbox"/> Track 5	4.8	-0.3	0.6
<input checked="" type="checkbox"/> Track 6	4.9	-0.2	1.0
<input checked="" type="checkbox"/> Track 7	5.0	-0.1	1.1
<input checked="" type="checkbox"/> Track 8	4.4	-0.5	1.1
<input checked="" type="checkbox"/> Track 9	3.0	-1.1	1.1
<input checked="" type="checkbox"/> Track 10	3.0	-1.1	1.0
<input checked="" type="checkbox"/> Track 11	5.0	-0.1	1.2
<input checked="" type="checkbox"/> Track 12	4.1	-0.7	1.5
<input checked="" type="checkbox"/> Track 13	3.6	-0.9	2.8
<input checked="" type="checkbox"/> Track 14	4.9	-0.2	-2.3
<input checked="" type="checkbox"/> Track 15	3.5	0.9	0.4
<input checked="" type="checkbox"/> Track 16	3.7	0.8	0.7
<input checked="" type="checkbox"/> Track 17	5.0	0.1	0.8
<input checked="" type="checkbox"/> Track 18	3.6	0.8	0.9
<input checked="" type="checkbox"/> Track 19	4.3	0.6	1.4
<input checked="" type="checkbox"/> Track 20	4.6	0.4	1.8
<input checked="" type="checkbox"/> Track 21	3.0	1.1	1.9
<input checked="" type="checkbox"/> Track 22	4.6	0.4	2.3
<input checked="" type="checkbox"/> Track 23	3.6	0.9	-2.0
<input checked="" type="checkbox"/> Track 24	2.8	1.2	-0.1

- Muons
- Electrons
- Vertices
- DT-segments
- CSC-segments
- Photons
- MET
- siStripClusters

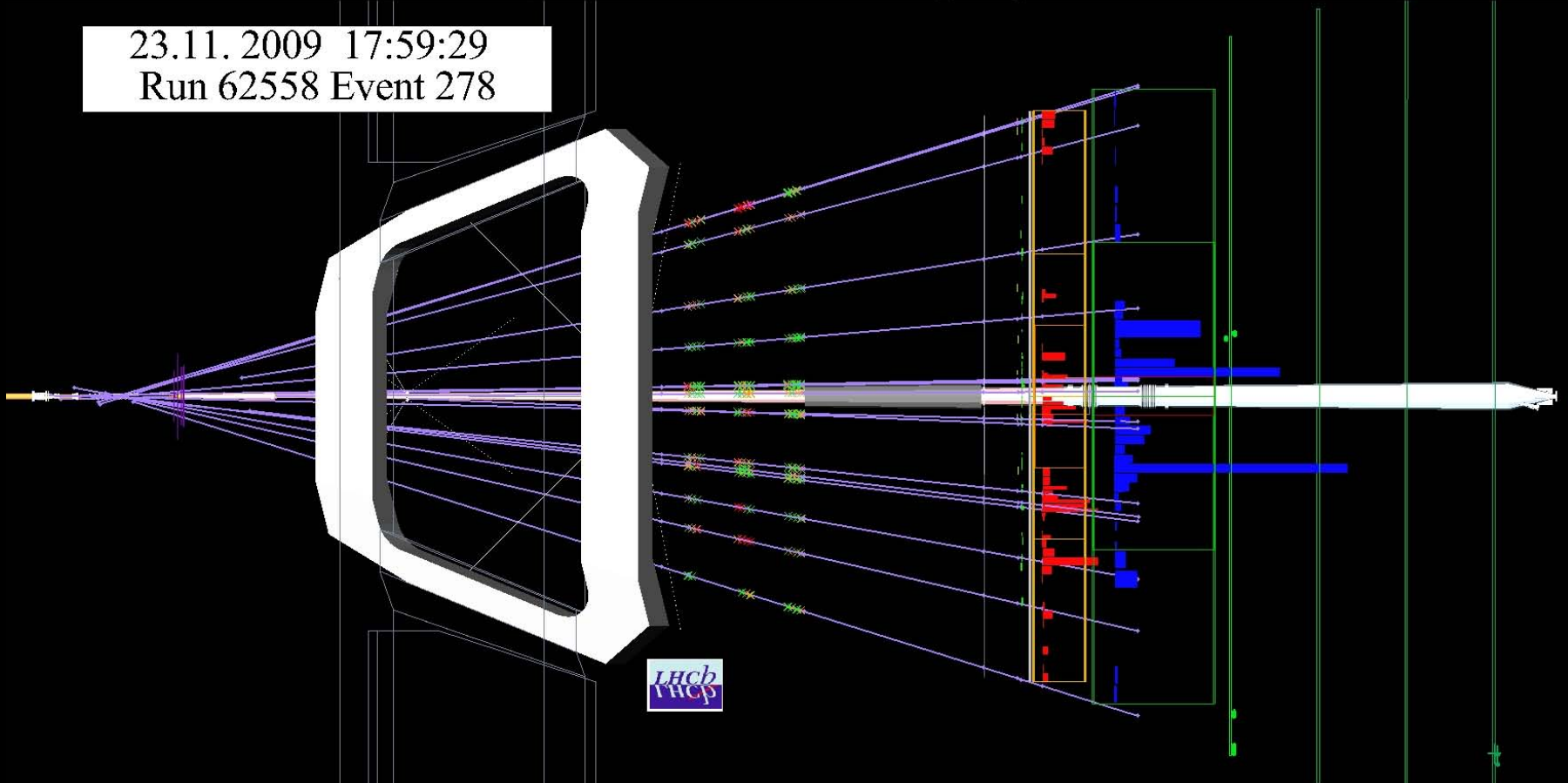






# LHCb Event Display

23.11.2009 17:59:29  
Run 62558 Event 278



# LHC - die Hüte fliegen



# Collider Physics Timeline



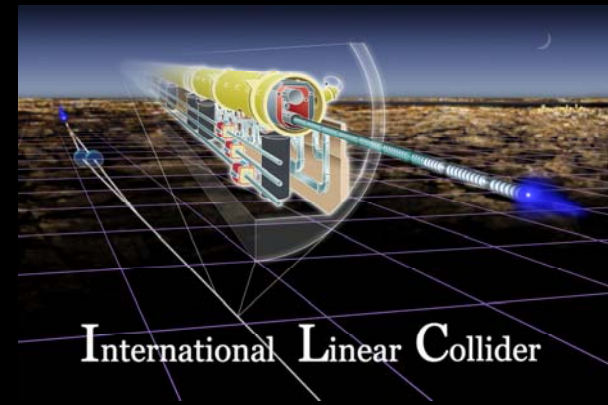
2009

Tevatron

LHC

LHC Upgrade

ILC



International Linear Collider

# In 14 Tagen ...



- 30.10. Gamma-Ray Bursts
- 13.11. GUT & TOE (Stringtheorie, etc.)
- 27.11. LHC & Higgs
- **11.12. Higgs & Stringtheorie & Supersymmetrie**

Winterferien: 23.12.-06.01.10

- 08.01.10 Higgs & die Inflation
- 22.01.10 Zeit & Lichtgeschwindigkeit
- 05.02.10