

# Das Higgs-Teilchen

## Was haben wir davon?



# Einleitung

...das ich erkenne,  
was die Welt  
im Innersten  
zusammenhält

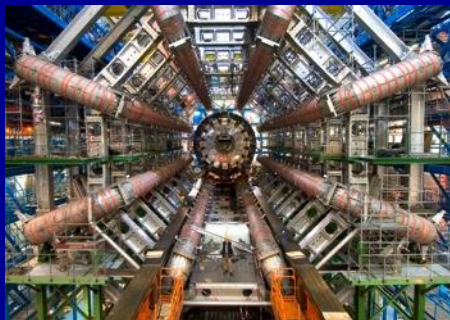
# Den Mikrokosmos beobachten

## Instrumente

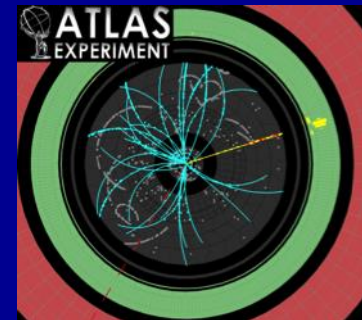
## Bilder

Lupe

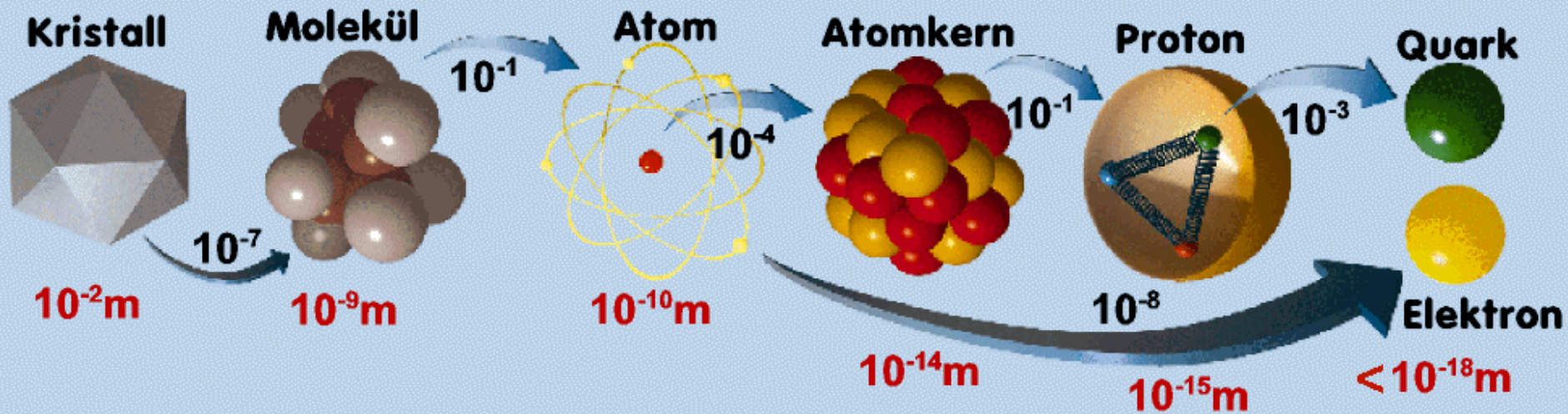
Elektron-  
mikroskop



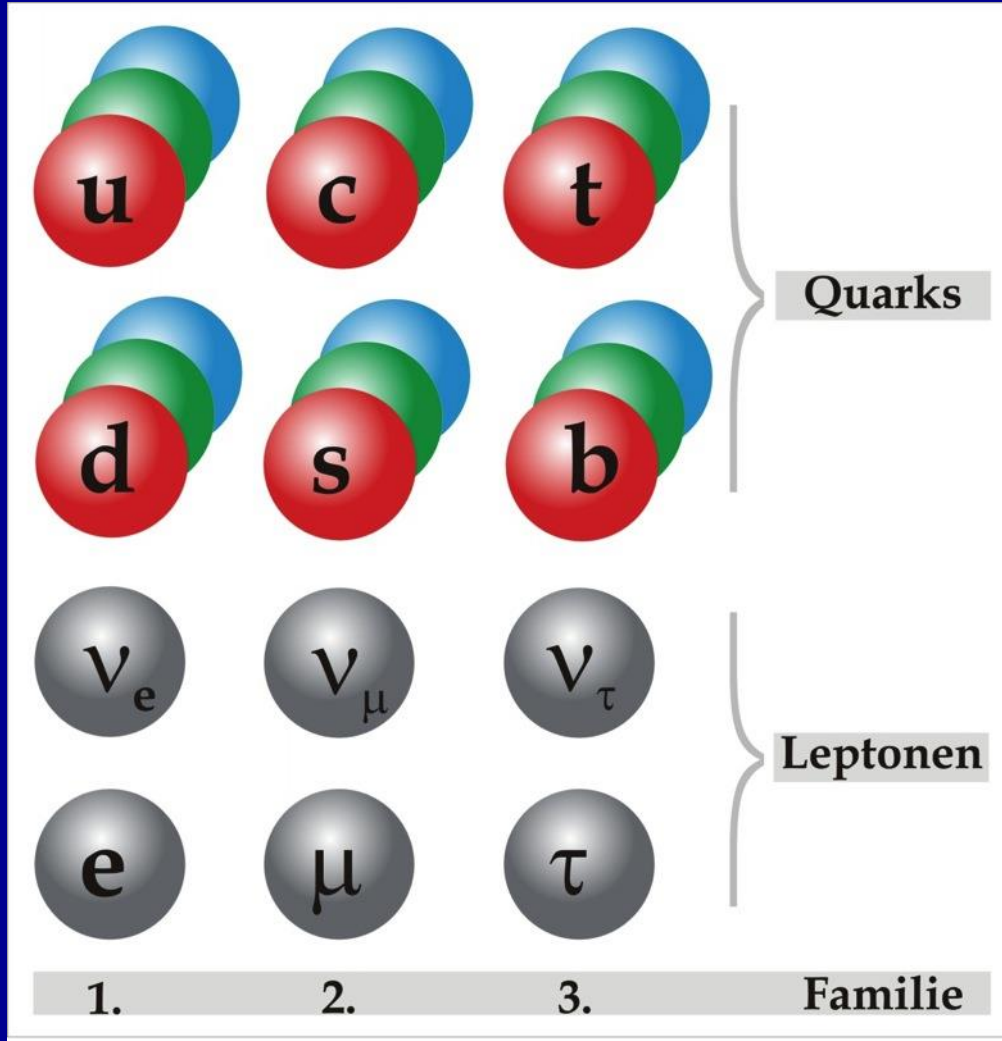
ATLAS-Detektor  
am LHC



# Ordnung! Auf jeder Skala



# Der Materiebaukasten



“Punktförmig”  
(überprüft bis  $10^{-18}\text{m}$ )

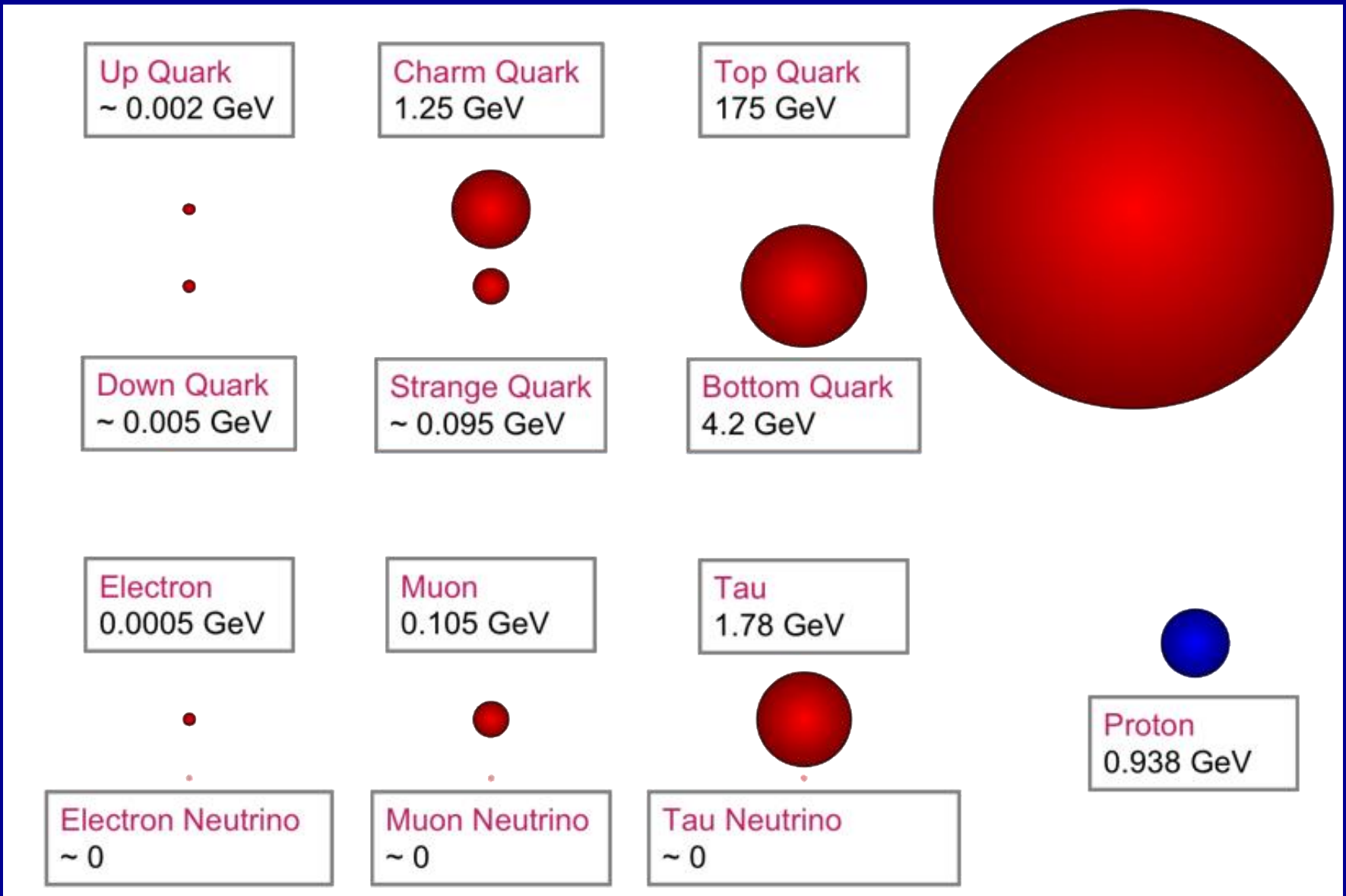
Alle experimentell  
nachgewiesen!

Unterschiede:

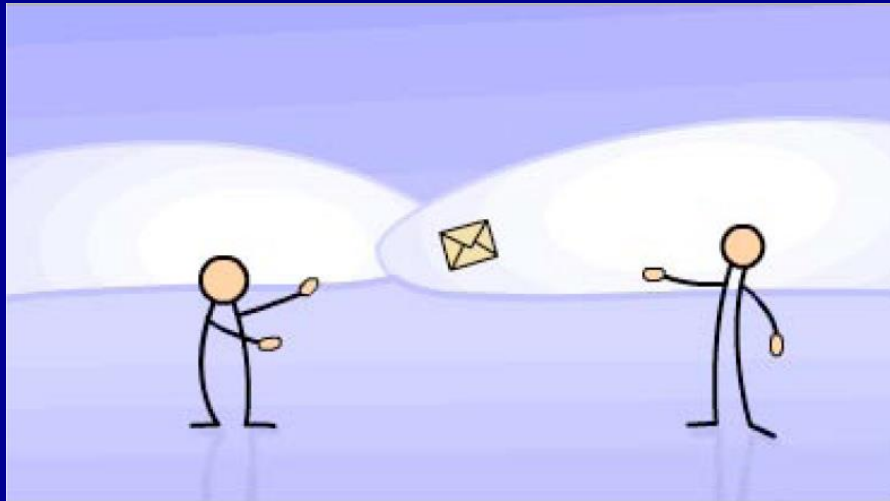
Massen +  
Kräfte, die auf die  
Bausteine wirken

+ Antiteilchen

# Die Massen der Materiebausteine



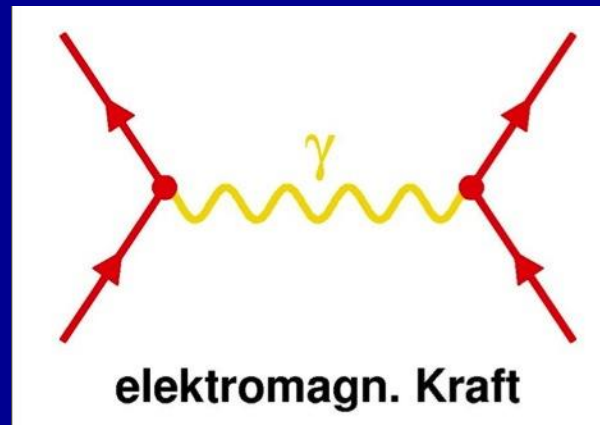
# Elementare Kräfte



Beschreibung von Kräften durch "Botenteilchen"



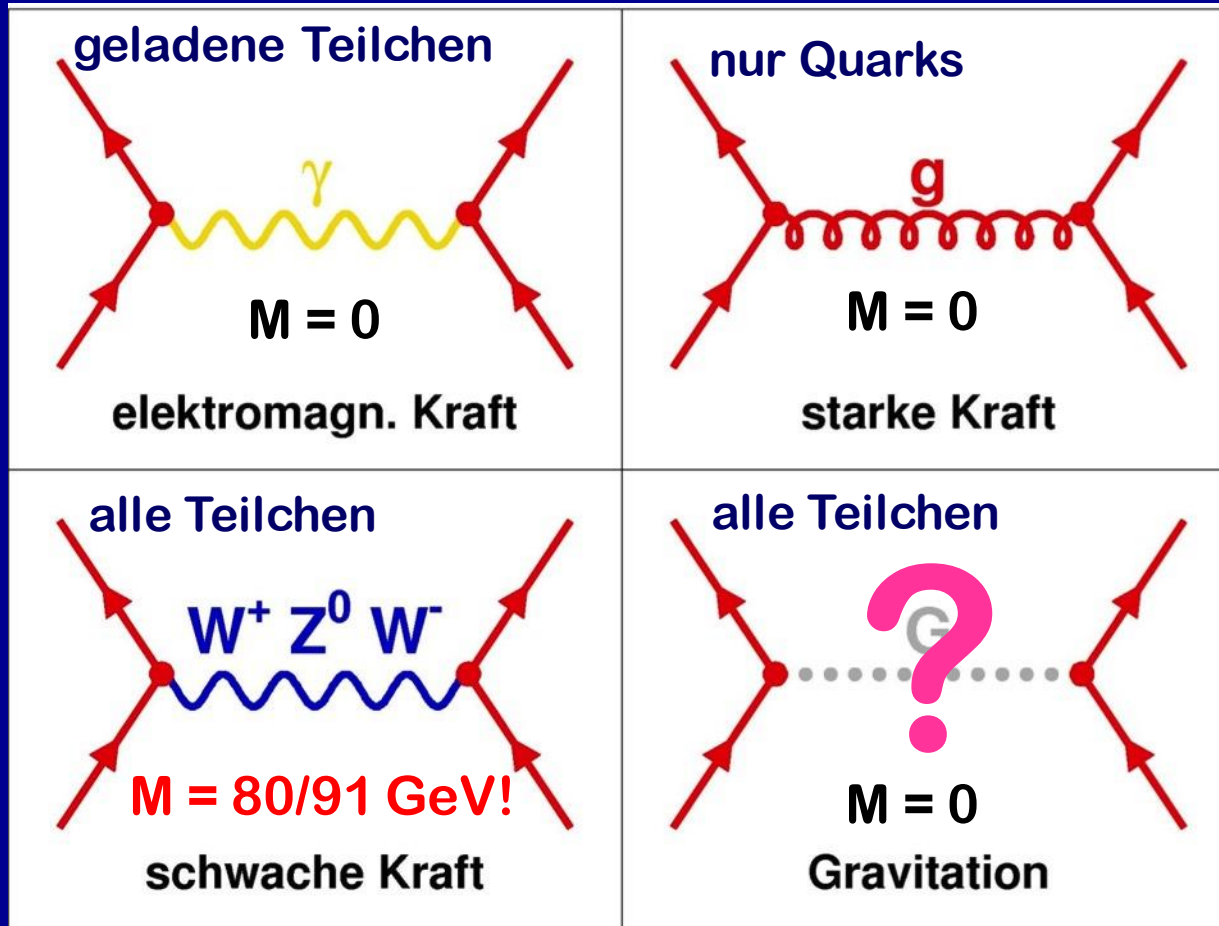
R. Feynman



elektrische und magnetische Kräfte werden durch Austausch von Photonen übermittelt

# Elementare Kräfte

vereinheitlicht:  
elektro-schwache Kraft



Austauschteilchen: "Bosonen"

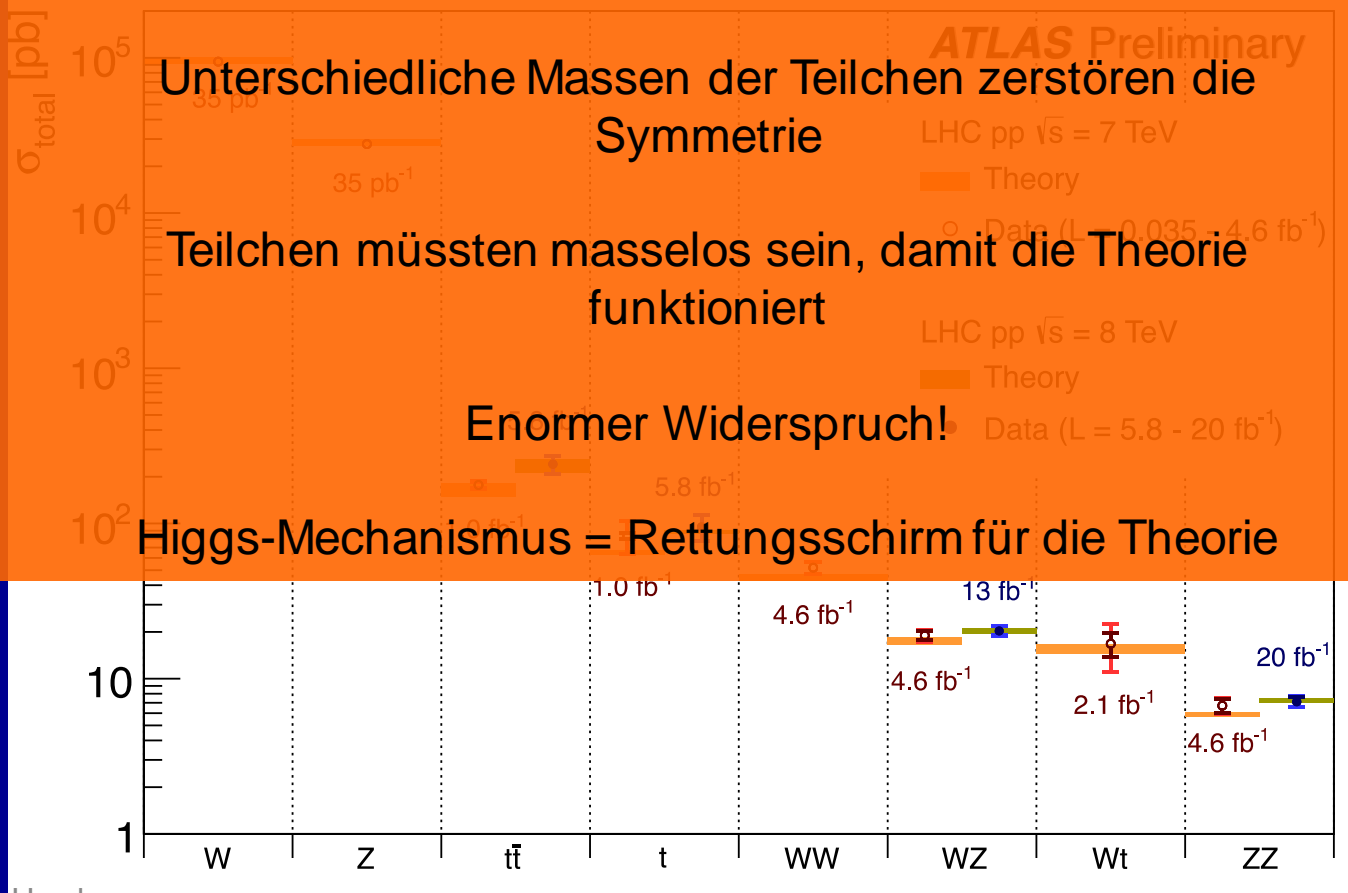
Nur die Bosonen der schwachen WW haben (viel!) Masse!



# Symmetrie

Fantastisch präzise Beschreibung der Teilchen und Kräfte durch ein „einfaches“ ästhetisches Prinzip:

Leider ist die Symmetrie, die der Theorie zu Grunde liegt in der Natur gar nicht gegeben!



# 1. Was macht der Higgs-Mechanismus?

Sein und Schein...

# Sein und Schein

Apfel

Feder

Helium-gefüllter  
Ballon

Galileo Galilei: Alle Körper fallen gleichschnell (mutig!)



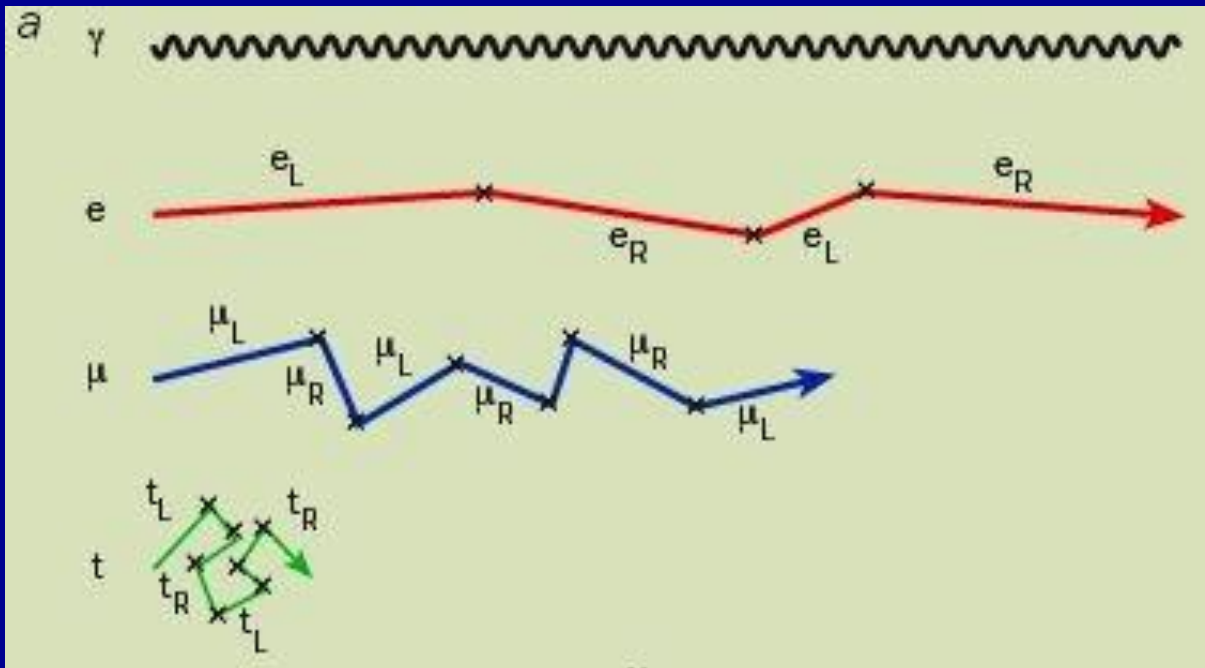
...nur, wenn man die umgebende Luft entfernt (einfach – kann man wegpumpen → Vakuum)

# Sein und Schein

Peter Higgs, Francois Englert und andere (1964!)

„Alle Teilchen sind masselos“ (auch mutig...)

...nur, wenn man das umgebende Higgs-Feld entfernt (kann man nicht, ist immer da)



Masselose Teilchen bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit

Massive Teilchen sind langsamer

Higgs: scheinbar „massive“ Teilchen werden durch das Higgs-Feld „abgebremst“

# Sein und Schein

Was stimmt also?

A) (Fast alle) Teilchen haben Masse

oder

B) Alle Teilchen sind masselos und es gibt ein Higgs-Feld, das überall ist und das man nicht „wegpumpen“ kann (Eigenschaft des Vakuums)

Entscheidung:

Wenn B) richtig ist, kann man das Higgs-Feld anregen (Energie zuführen) und es entsteht kurzfristig ein **Higgs-Teilchen**

**Die Existenz oder Nichtexistenz eines Higgs-Teilchens entscheidet zwischen A) und B)**

## 2. Was sind die Eigenschaften des Higgs-Teilchens?

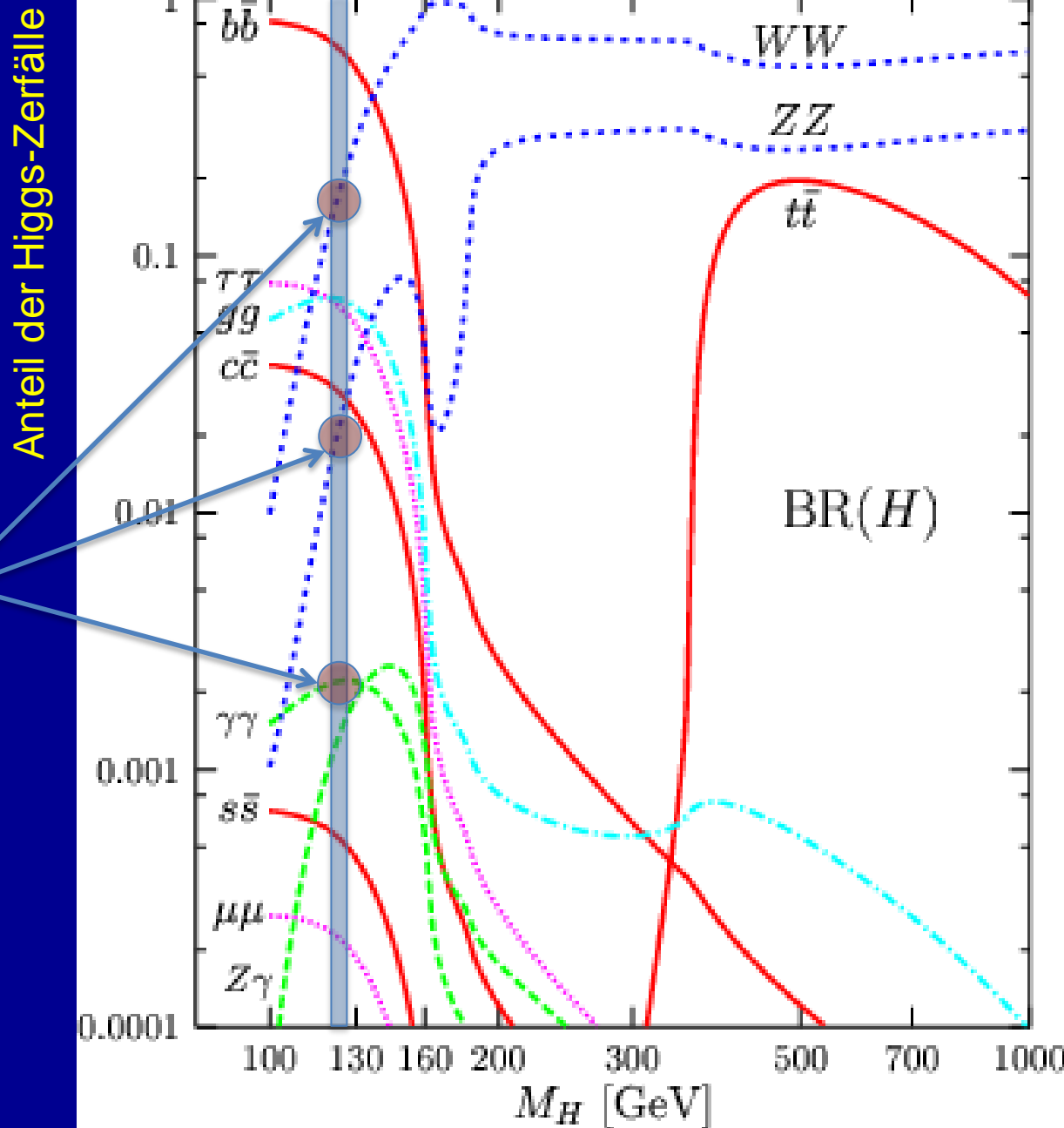
The special one...

H

# The special one

- H ist weder „Materie“ (Spin 1/2) noch „Kraft“ (Spin 1) sondern „Spin 0“
  - H wechselwirkt direkt mit allen Teilchen, die (scheinbar) Masse besitzen (umso stärker, je größer die Masse ist)
  - Deshalb kann man es direkt auch nur erzeugen, wenn man Teilchen mit viel Masse und großer Energie zur Verfügung hat  
→ geht nicht, es gibt keinen (z.B.) top-Quark-Beschleuniger
  - Produktion nur „indirekt“ möglich (erst einmal schwere „virtuelle“ Teilchen produzieren und „hoffen“, dass diese dann ein H produzieren)
  - H lebt nicht lang ( $10^{-22}$  s) – es zerfällt in Paare fast aller massiven Standard-Teilchen
- Das Higgs-Teilchen ist nicht „yet another particle“ sondern ein grundlegend neuer Baustein der Natur

# Higgs-Zerfälle



~10 versch.  
Möglichkeiten

nur für diese 3  
haben ATLAS  
und CMS bis  
jetzt starke  
Hinweise



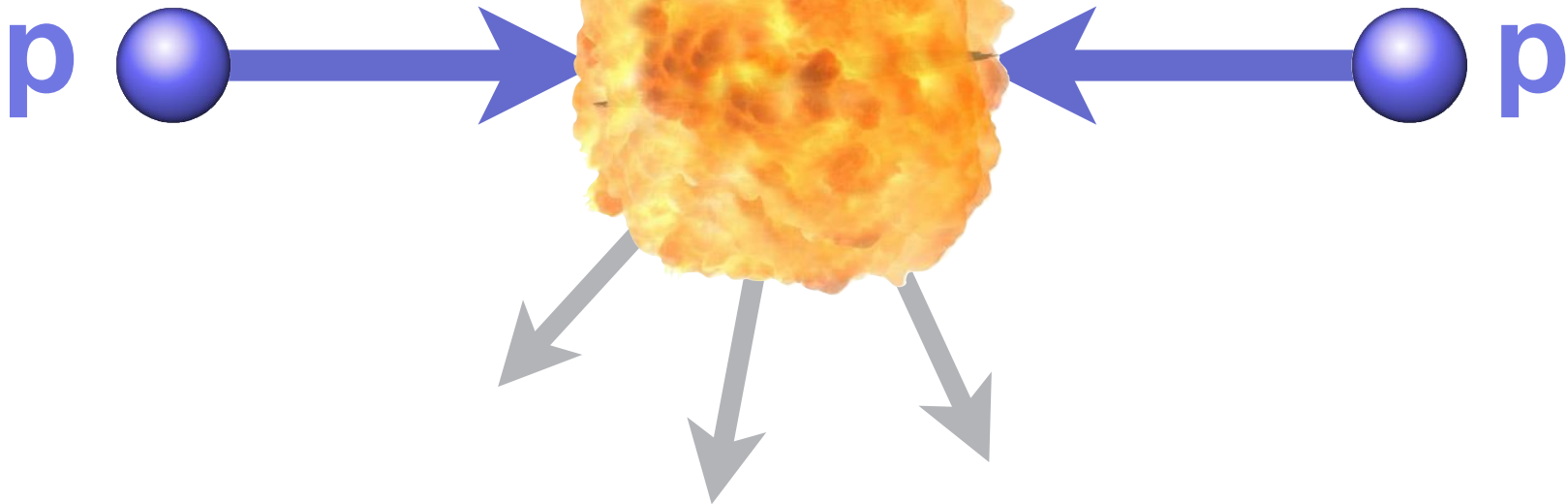
### 3. Wie kann man ein Higgs-Teilchen erzeugen?

Beschleuniger!

$E = m_{\text{Higgs}} * c^2$  - mindestens...

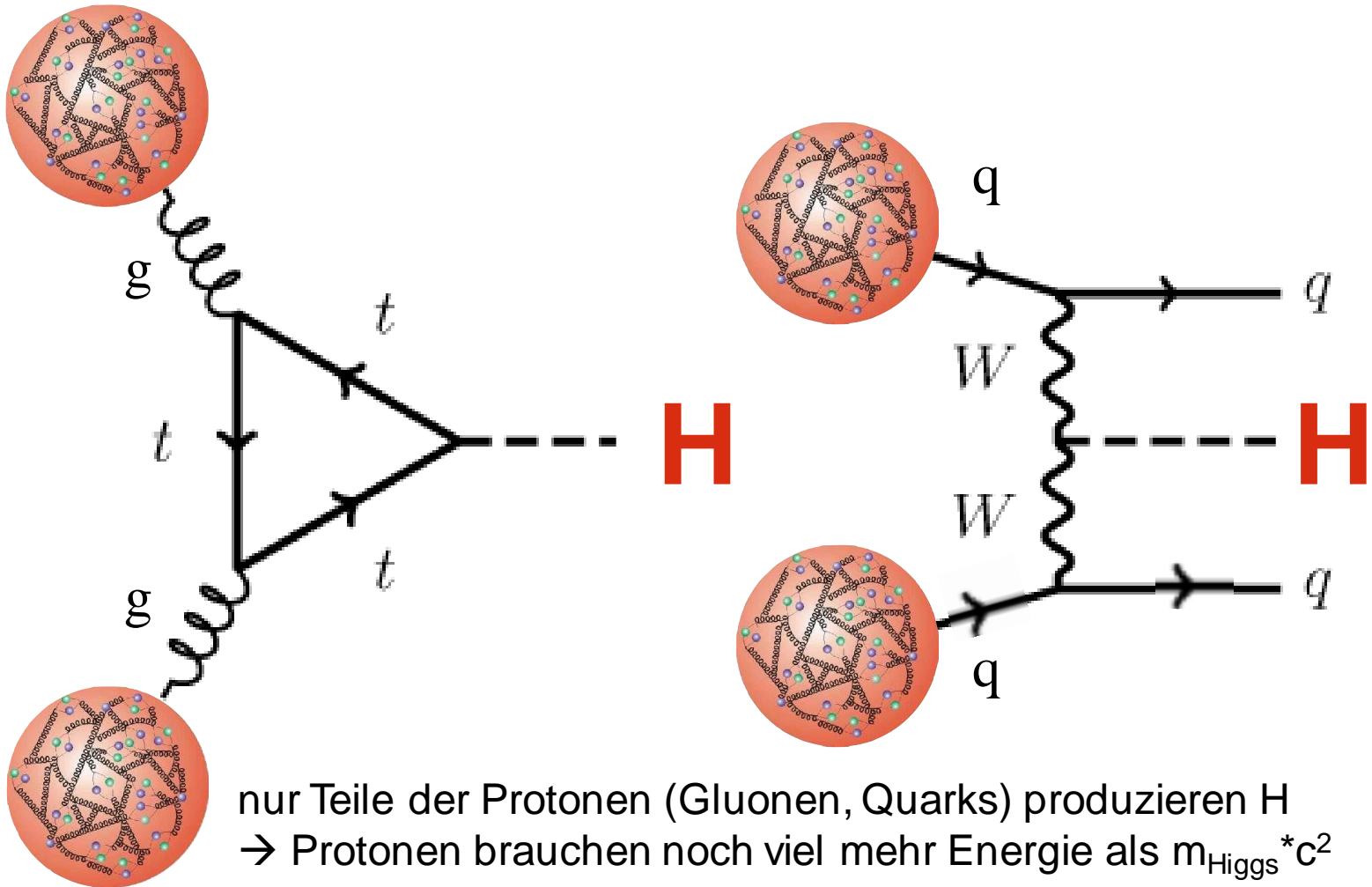
H

Energie, Scotty!



# Etwas genauer, aber ganz schön kompliziert...

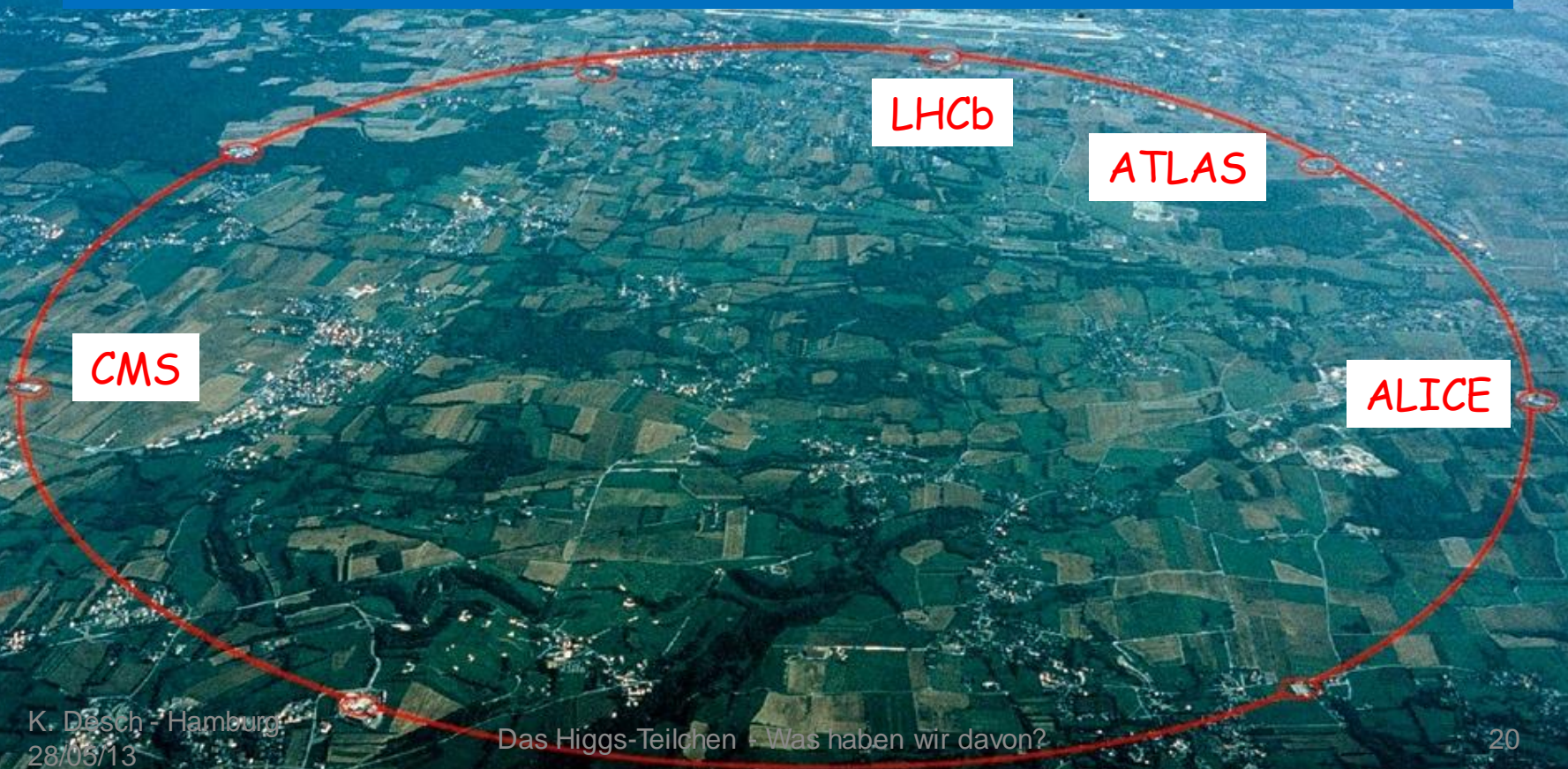
z.B.



# Der Large Hadron Collider LHC


Proton-Energie  $2 \times 4$  Teraelektronvolt (TeV)

- etwa  $1/10000$  des Protonradius auflösen
- neue Elementarteilchen produzieren die bis zu  $20 \times$  schwerer sind, als das schwerste bekannte Teilchen (top-Quark)



**Eine technologische Herausforderung:  
z.B. 1232 supraleitende Magnete (15m, 1.8 K, 8T (=9000 Ampere))**





In den letzten drei Jahren haben etwa 2 Billionen  
(2.000.000.000.000.000) Kollisionen stattgefunden

Nur eine von 2 Milliarden (2.000.000.000) Teilchenkollisionen  
am LHC enthält ein Higgs-Teilchen

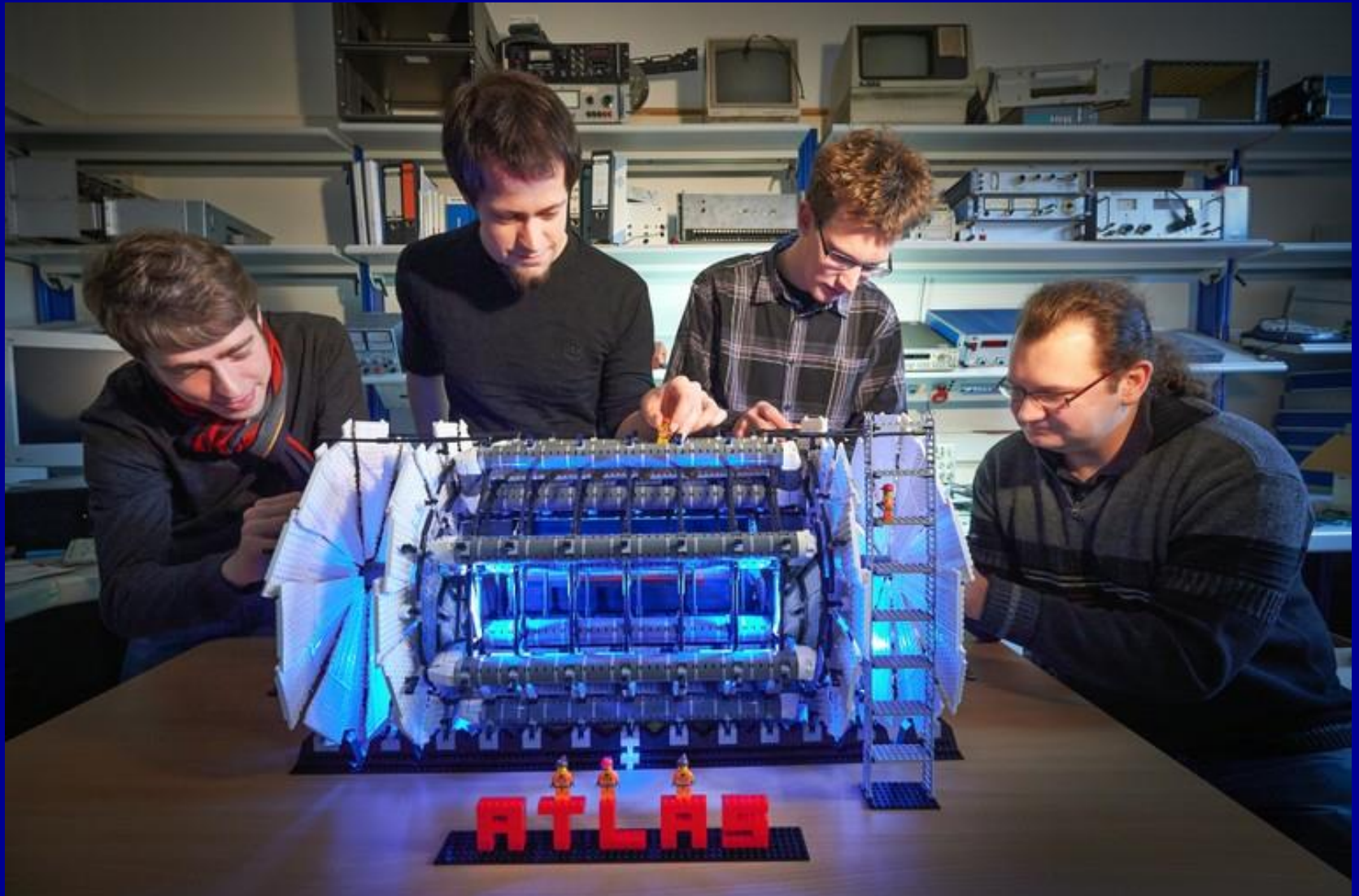
Es sind also bereits 1 Million Higgs-Teilchen produziert worden

Nur einen kleinen Bruchteil kann man erkennen...

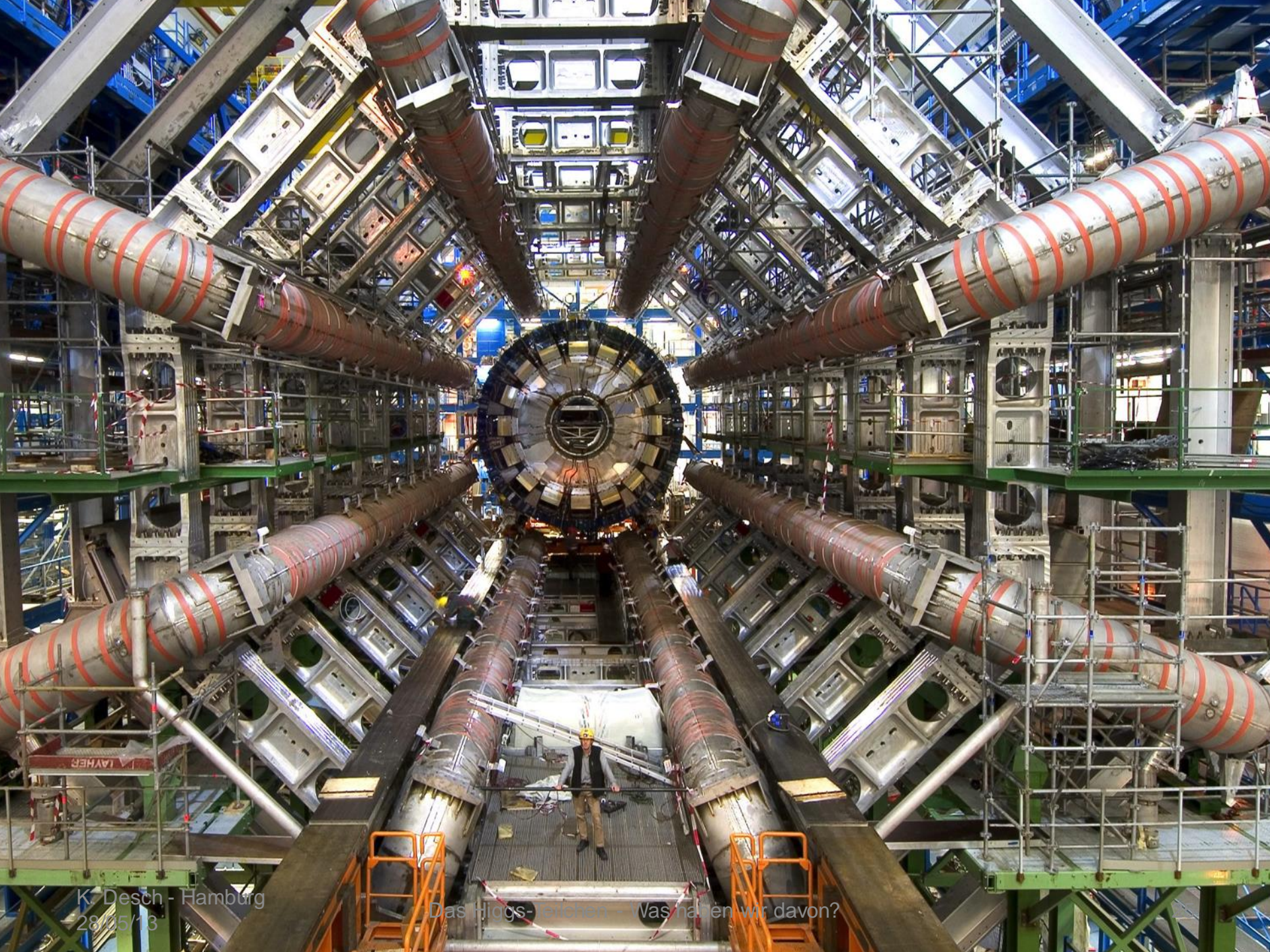
## 4. Wie kann man ein Higgs-Teilchen nachweisen?

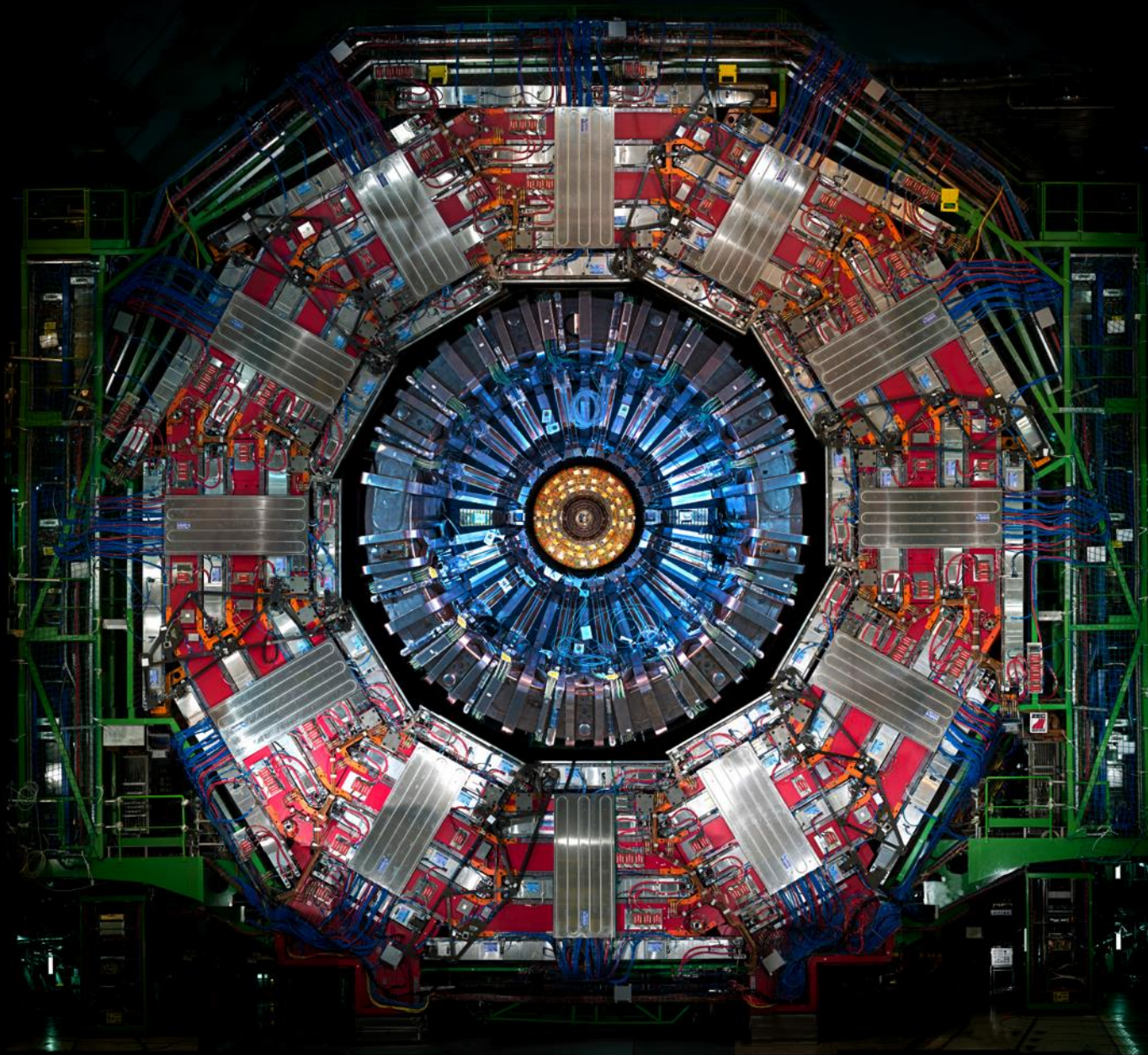
Teilchendetektoren = Superkameronas

# Das ATLAS-Experiment (als LEGO Bausatz 1:50, 8000 Teile)









# Die Experimente ATLAS und CMS sind

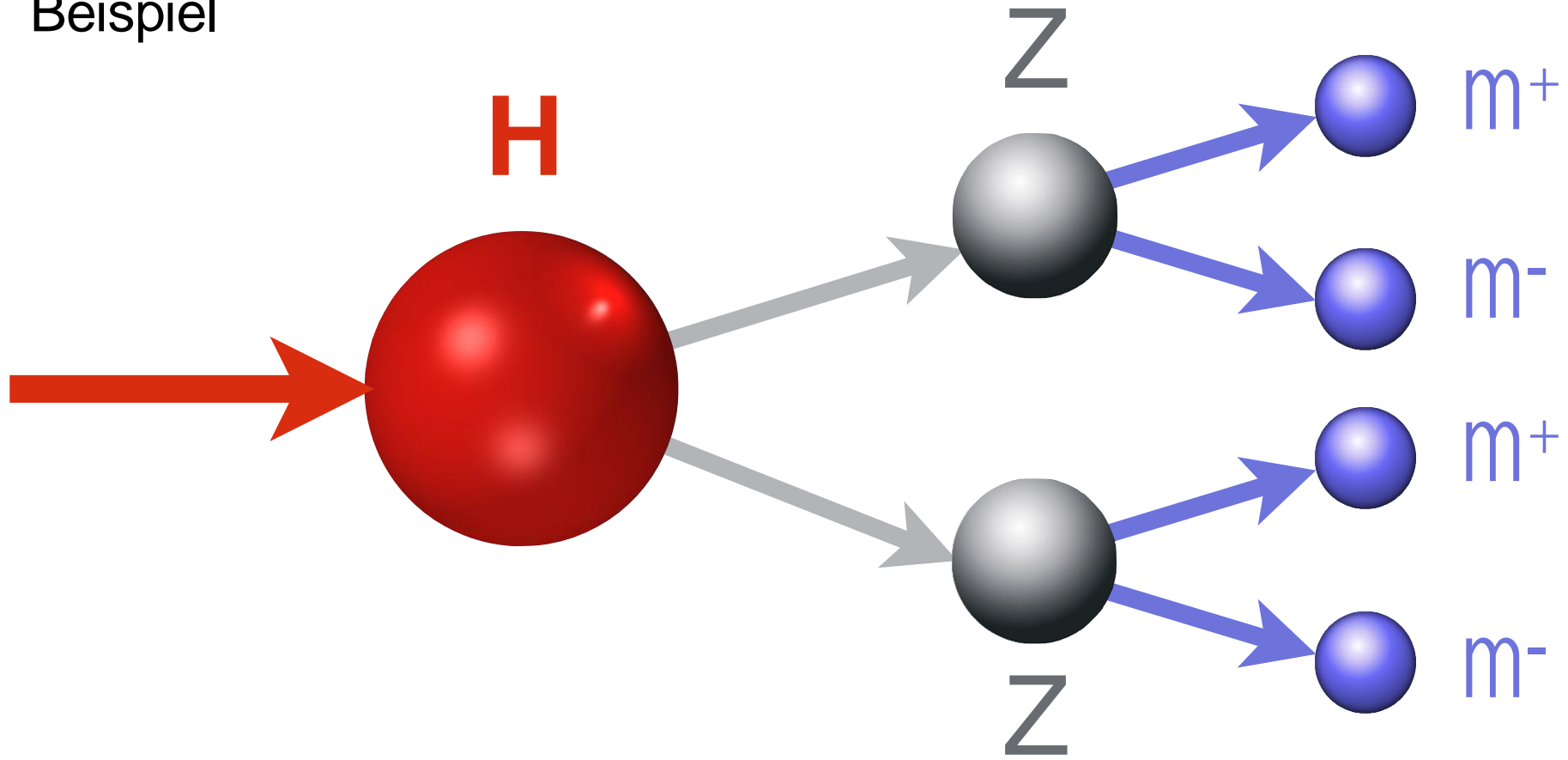
“Superkameras”, die

- 40 Millionen Bilder pro Sekunde schießen
- Jedes Bild ist bis zu 30-fach “belichtet”  
(d.h. auf jedem Bild sind bis zu 30 pp-Kollisionen)
- Jedes Bild hat etwa 100 “Megapixel” Information
- die Bilder werden in  $2.5 \mu\text{s}$  vorläufig analysiert  
und von 40.000.000 Bildern werden 39.925.000  
als “uninteressant” wieder “gelöscht”
- nach mehreren Filterschritten werden 200 Bilder pro  
Sekunde gespeichert (1 CD-ROM alle 2 Sekunden)

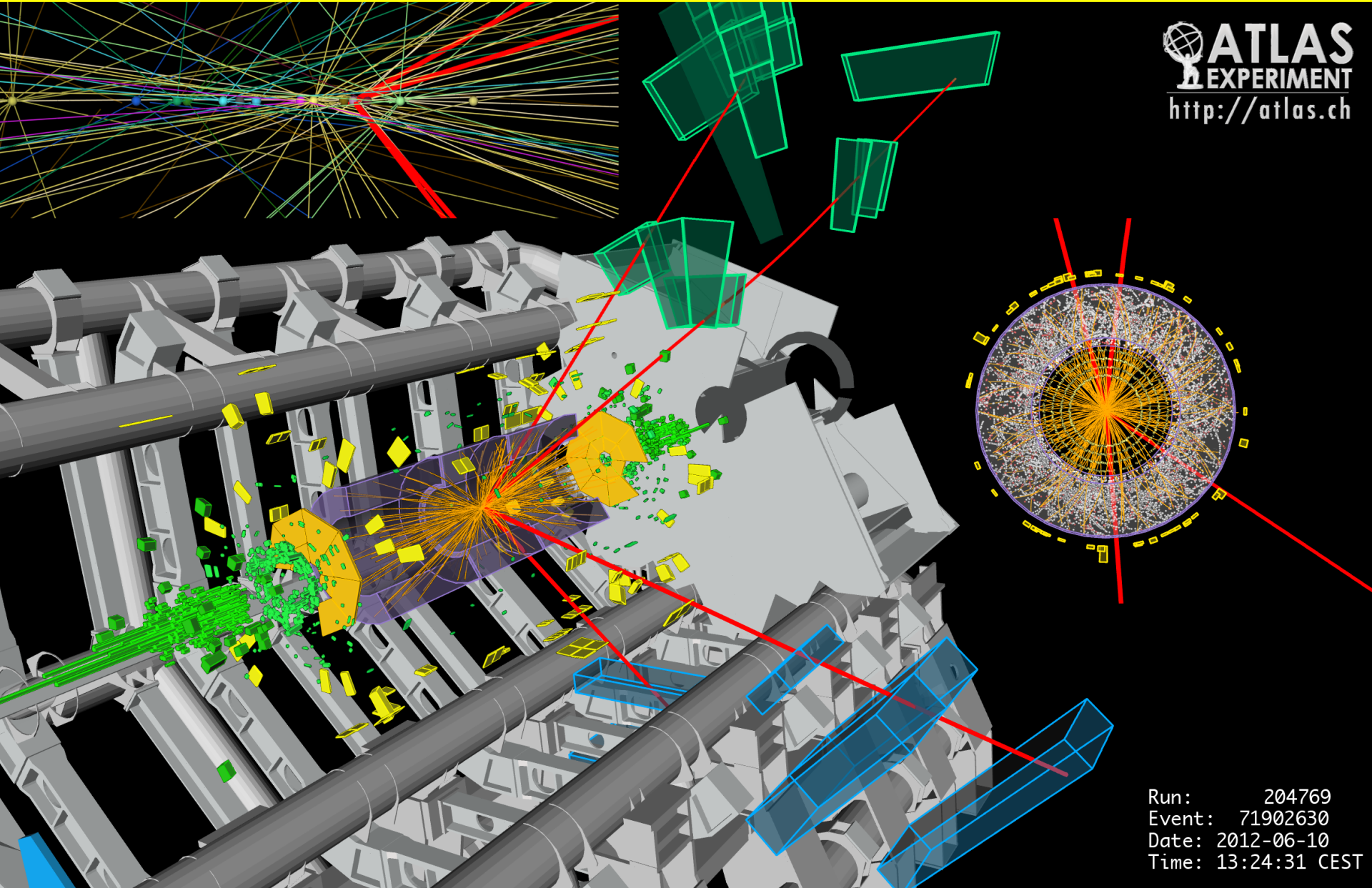
# Wonach wird gesucht?

## Zerfallsprodukte des Higgs-Teilchens

Beispiel

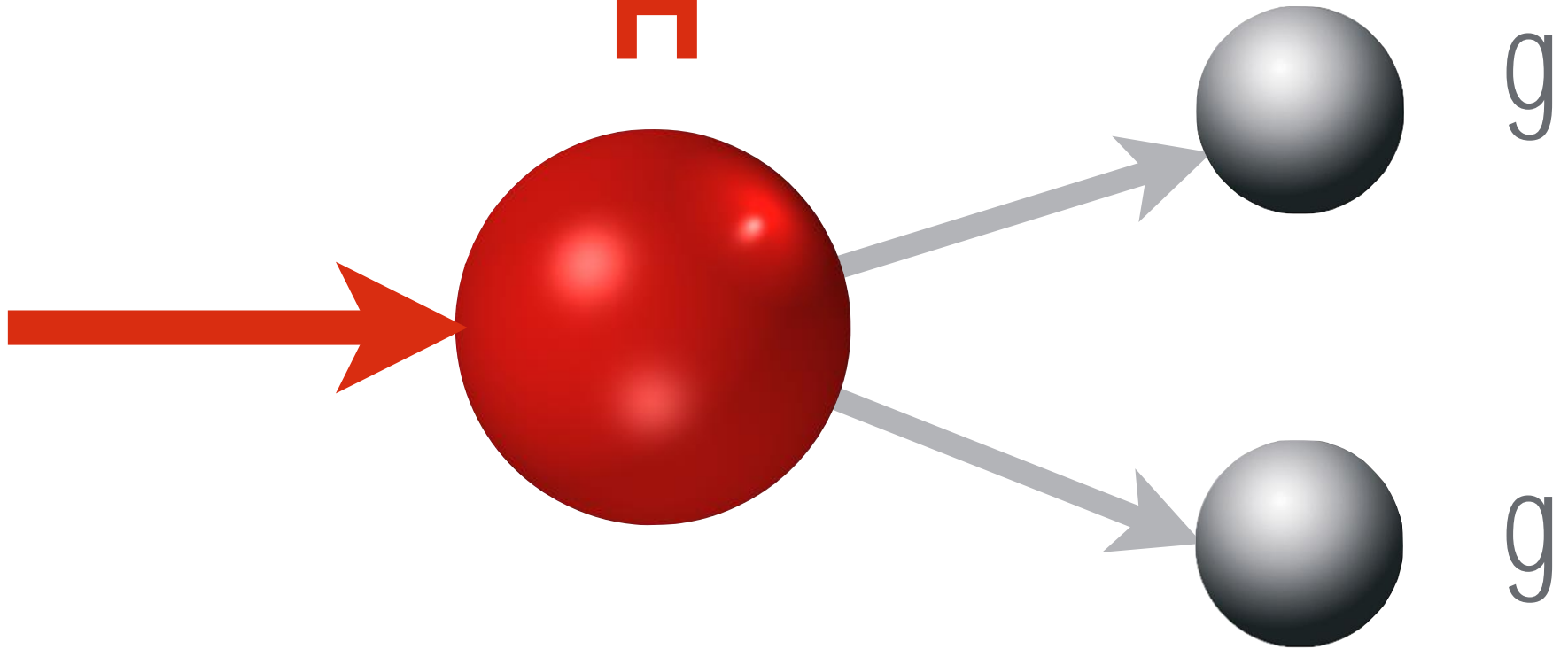


# Kandidat für einen Higgszerfall in vier Myonen (ATLAS)



Beispiel

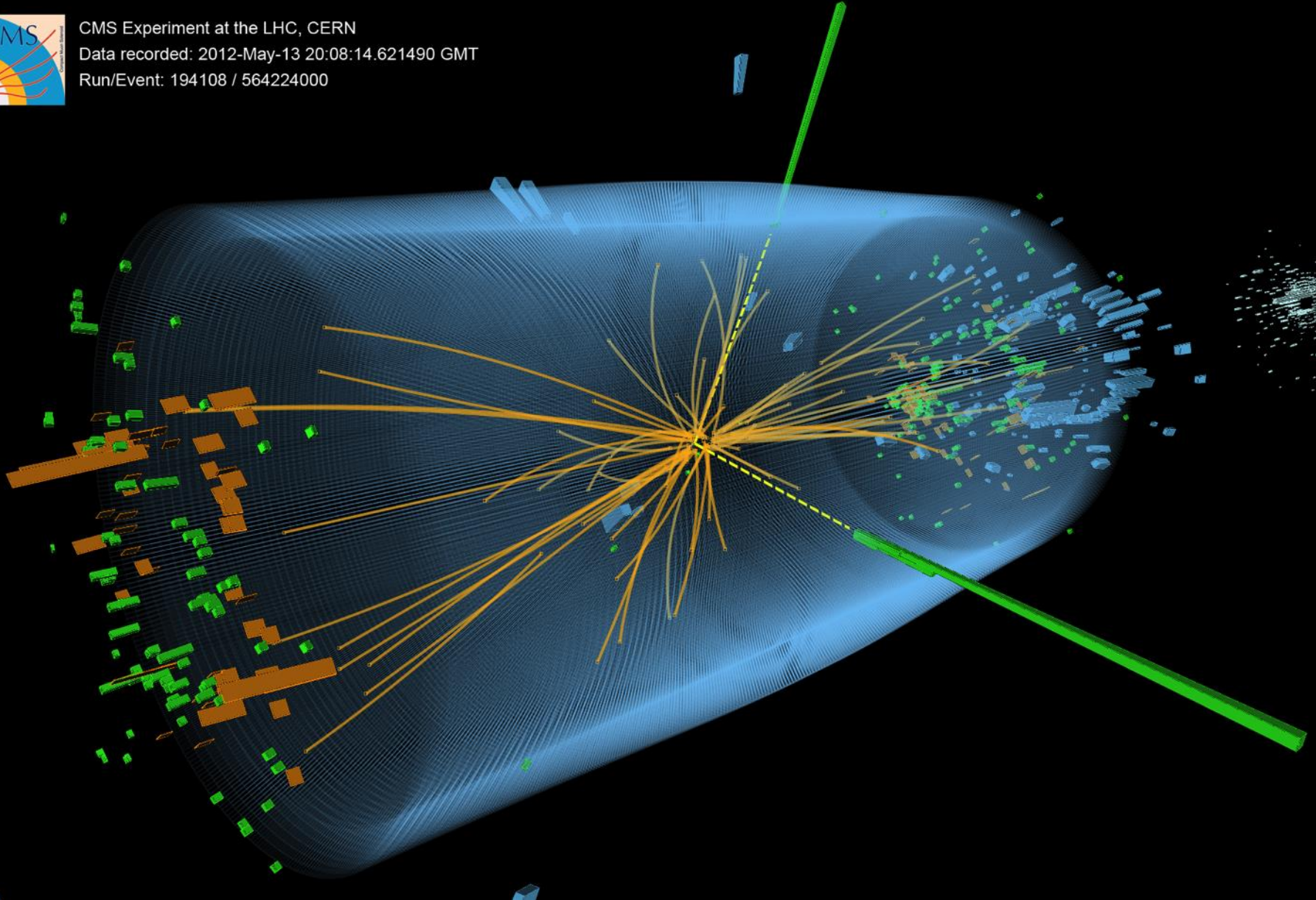
H



# Kandidat für einen Higgszerfall in zwei Photonen (CMS)



CMS Experiment at the LHC, CERN  
Data recorded: 2012-May-13 20:08:14.621490 GMT  
Run/Event: 194108 / 564224000



## 5. Warum mussten die LHC-Experimente drei Jahre lang messen?

„Eine Schwalbe macht noch keinen Sommer“



Ist dies wirklich ein Higgs  $\rightarrow$  Photon+Photon – Ereignis?

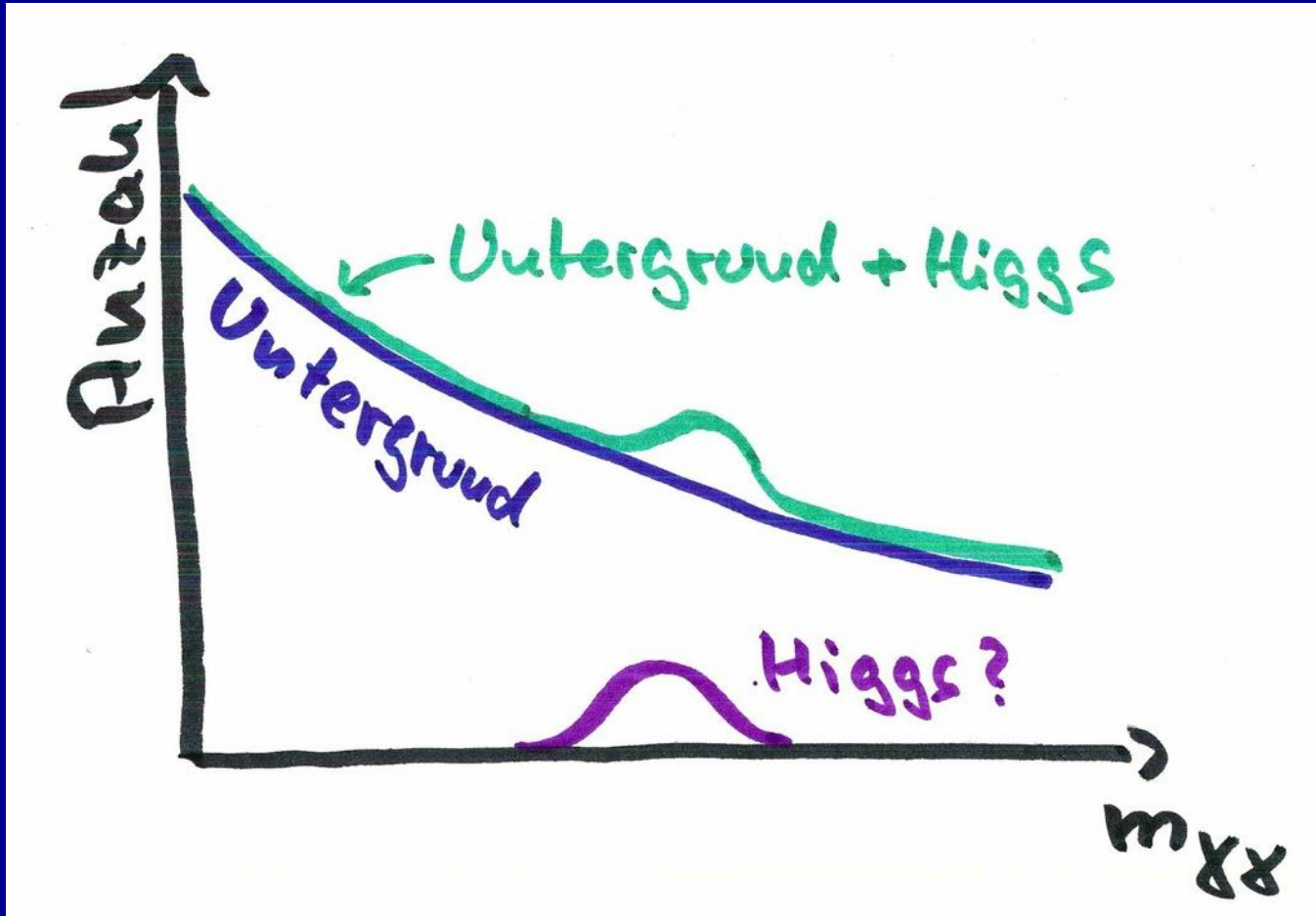
Kann anhand eines Ereignisses nicht entschieden werden!

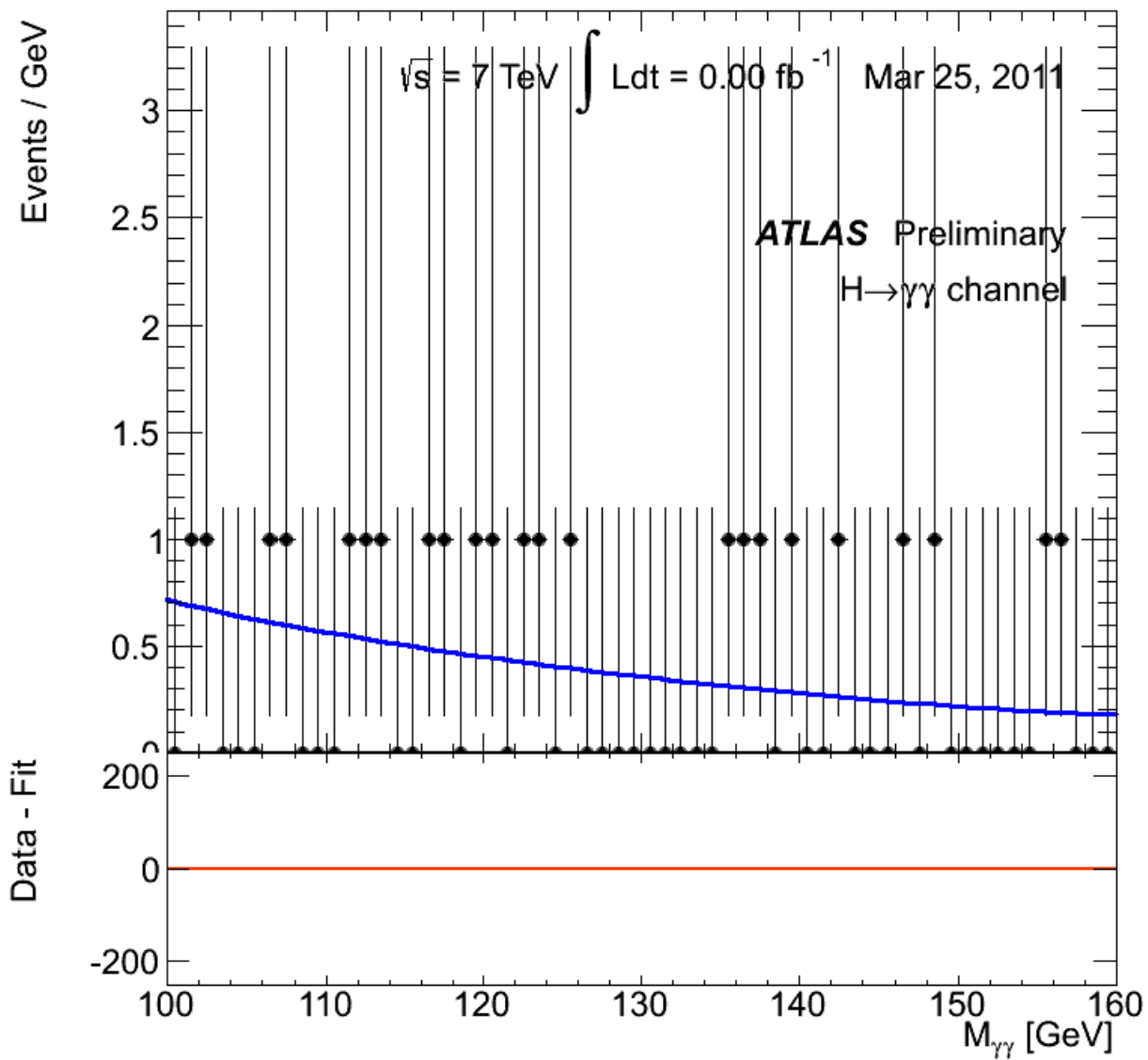
Andere Möglichkeiten (“Untergrund”):

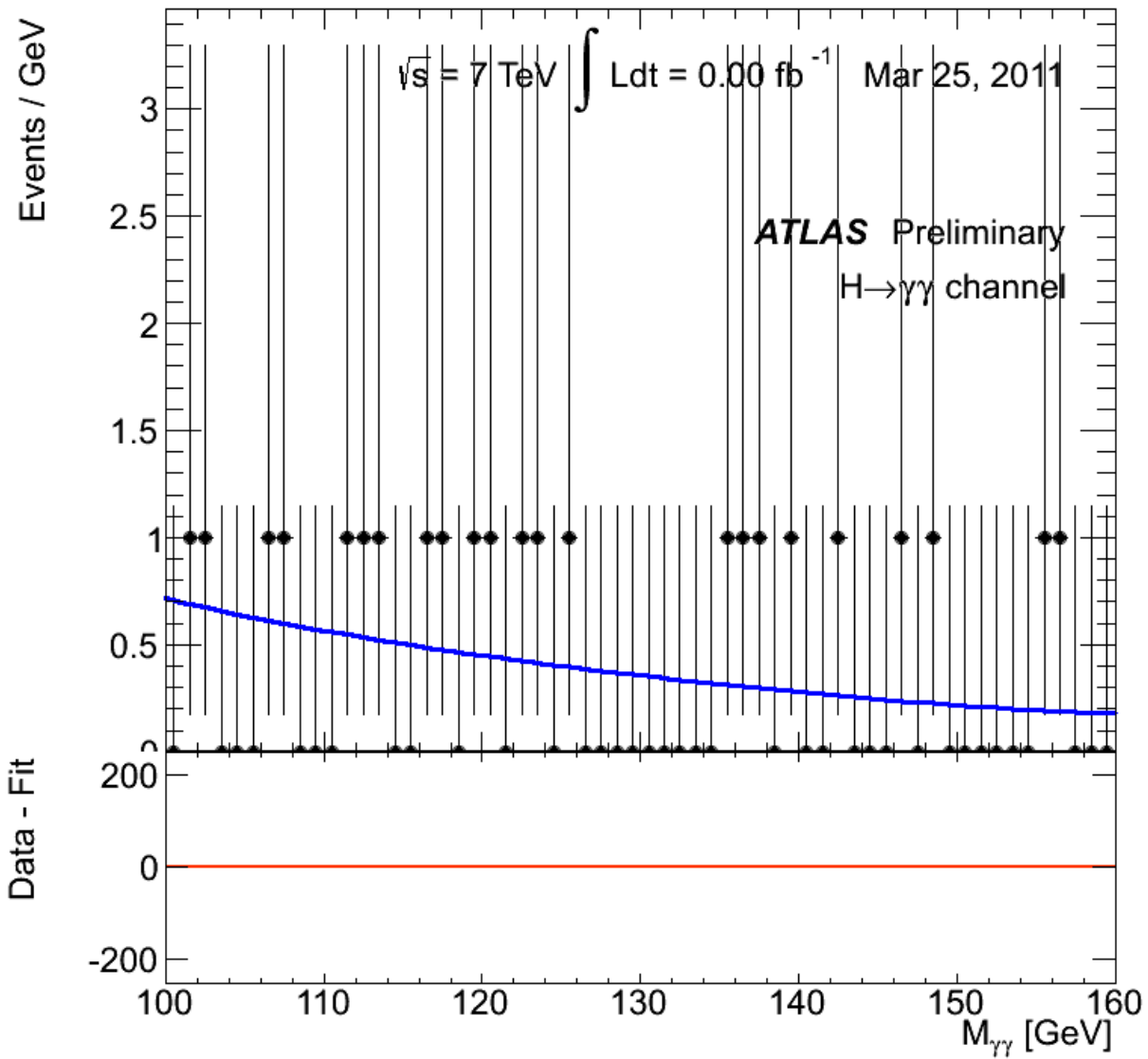
1. Es ist wirklich ein Photon+Photon-Ereignis, stammt aber nicht aus einem Higgs-Zerfall, sondern aus einem anderen (uninteressanten) Prozess, z.B.  $q + \text{anti-}q \rightarrow \gamma\gamma$
  2. Mindestens einer der beiden Photon-Kandidaten ist gar kein Photon sondern wurde nur fälschlich als solches identifiziert (“fake”)
- $\rightarrow$  Nachweis eines neuen Teilchens (Higgs?) kann nur **statistisch** erfolgen (“mehr Ereignisse als vom Untergrund erwartet”)

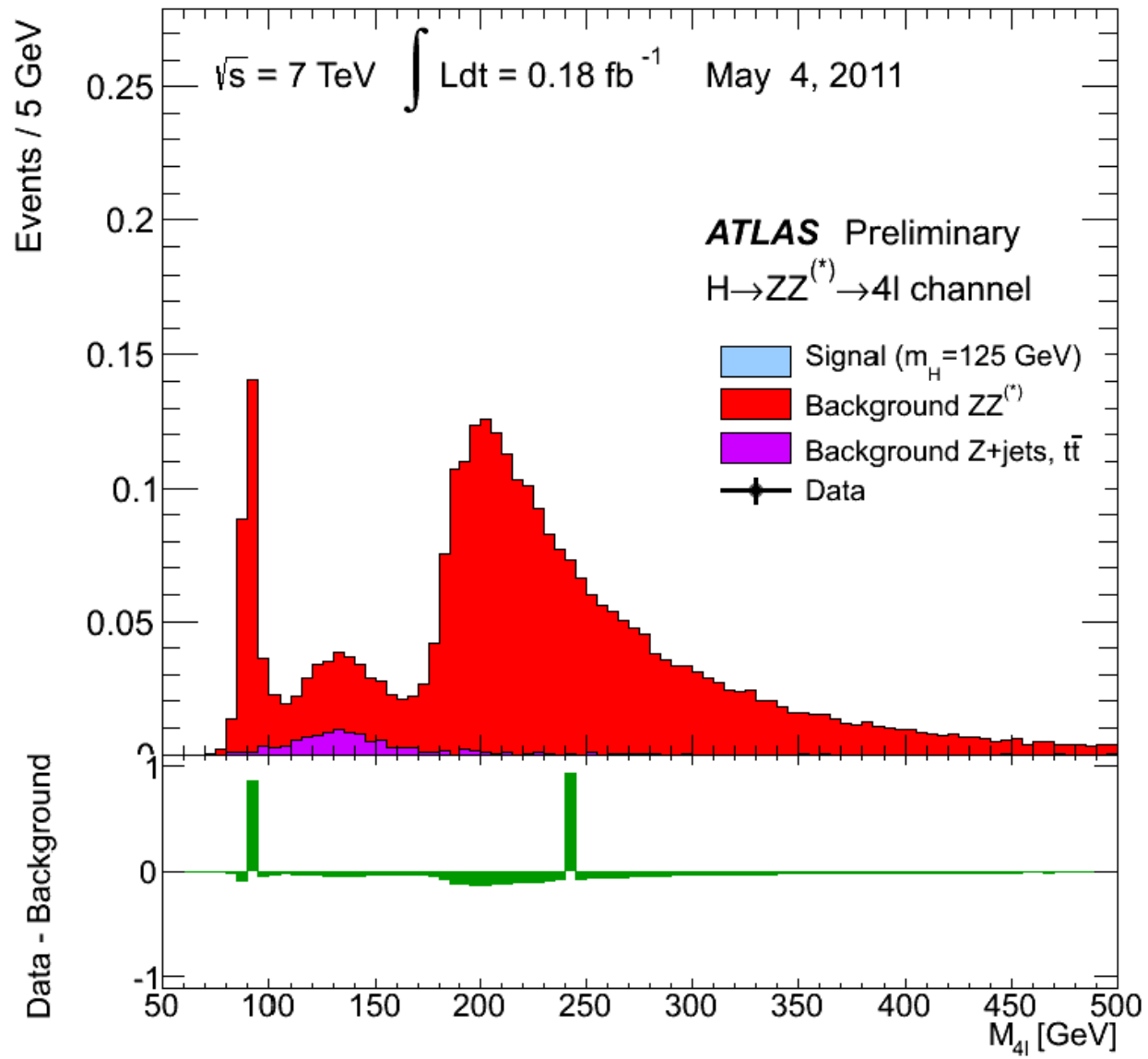
# Den Untergrund reduzieren

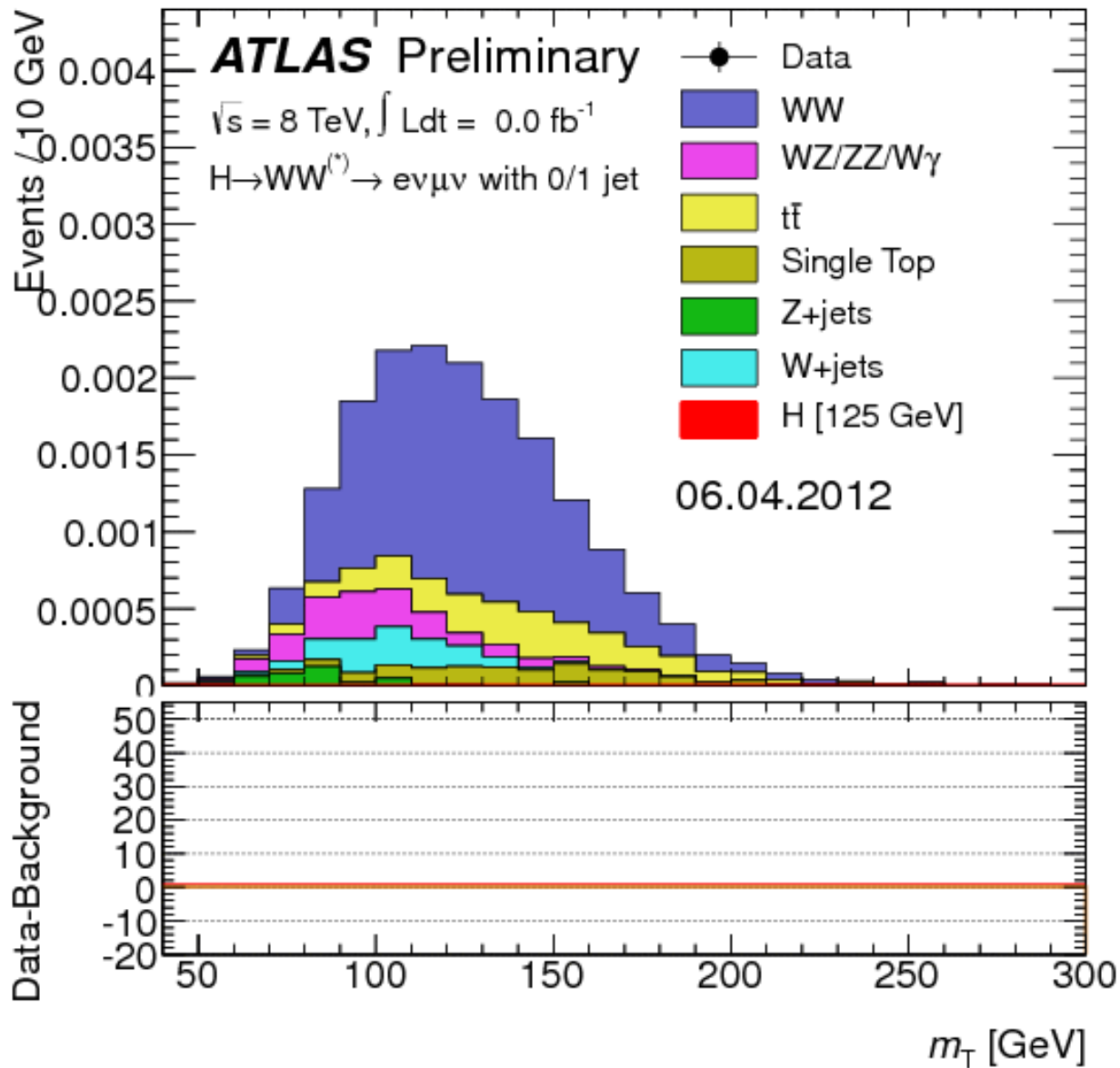
Alle „Higgs“-Ereignisse sollten bei der gleichen Masse liegen  
Die Masse kann man aus den gemessenen Photonen rekonstruieren  
– der Untergrund ist (meistens) breit verteilt „bump hunt“











# 4. Juli 2012

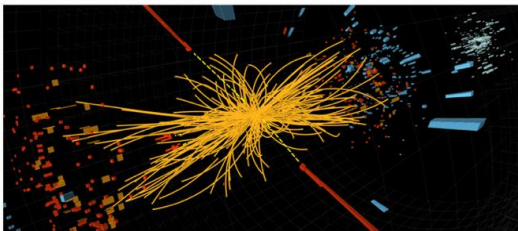


## Higgs within reach

Our understanding of the universe is about to change...

The **ATLAS** and **CMS** experiments at CERN today presented their latest results in the search for the long-sought **Higgs boson**. Both experiments see strong indications for the presence of a new particle, which could be the Higgs boson, in the mass region around 126 gigaelectronvolts (GeV).

The experiments found hints of the new particle by analysing trillions of proton-proton collisions from the **Large Hadron Collider (LHC)** in 2011 and 2012. The **Standard Model** of particle physics predicts that a Higgs boson would decay into different particles – which the LHC experiments then detect.



A proton-proton collision event in the CMS experiment, producing two high-energy photons (red towers). This is what we would expect to see from the decay of a Higgs boson but it is also consistent with background Standard Model physics processes. © CERN 2012

Both ATLAS and CMS gave the level of significance of the result as 5 sigma on the scale that particle physicists use to describe the certainty of a discovery. One sigma means the results could be random fluctuations in the data, 3 sigma counts as an observation and a 5-sigma result is a discovery. The results presented today are preliminary, as the data from 2012 is still under analysis. The complete analysis is expected to be published around the end of July.



# Was wir bis jetzt über das neue Teilchen wissen:

- Es existiert ein neues Teilchen mit einer Masse  $\sim m_{\text{top}}/\sqrt{2}$
- Es zerfällt in Paare von Photonen, Z-Bosonen, W-Bosonen
- Es sieht so aus, als ob es „Spin-0“ besitzt (noch nicht ganz sicher....)
- Messgenauigkeit noch nicht sehr groß – bis jetzt sind alle gemessenen Eigenschaften **konsistent** mit den Vorhersagen des Standard-Modells-Higgs (aber auch mit denen erweiterter Theorien und Modelle)

„If it looks like a duck, swims like a duck, and quacks like a duck, then it probably is a duck“

[http://en.wikipedia.org/wiki/Duck\\_test](http://en.wikipedia.org/wiki/Duck_test)

aber es gibt viele Enten...



6. Was müssen wir über das „Higgs“  
noch alles herausfinden?

It's only the beginning

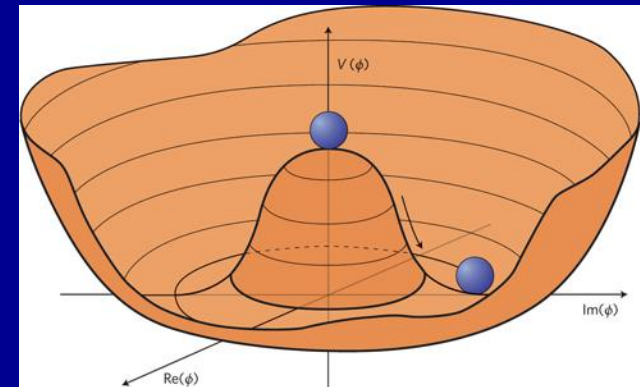
# Wir sind erst am Anfang der Erforschung des neuen Teilchens!

Wenn der LHC in 2015 wieder anläuft, werden die Experimente versuchen, ein Maximum an Information zu sammeln.

Ein ganzes Feld neuer, spannender Fragen, z.B.

- Wechselwirkt („koppelt“) das neue Teilchen auch mit „Materie“ (Spin-1/2) ?
- Ist die Kopplung proportional zur Masse?
- Wie lang lebt das Teilchen?  
(kürze Lebensdauer  $\rightarrow$  unbeobachtete Zerfälle)
- Koppelt das Teilchen auch an sich selbst?  
(entscheidender aber schwieriger Test)
- Gibt es weitere Higgs-Teilchen?  
(viele neue Modelle sagen 5 oder mehr Higgs-Teilchen vorher)

u.v.m.

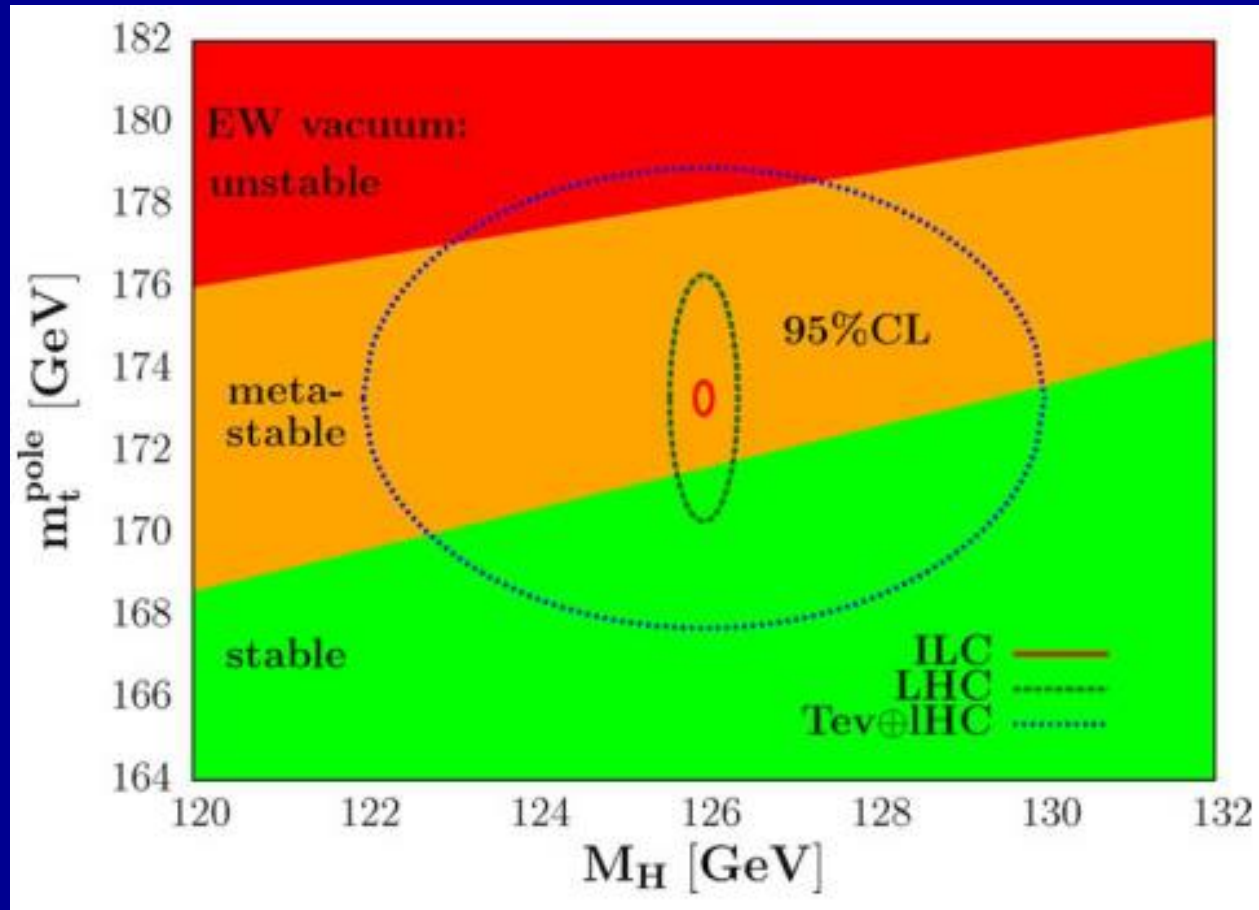


## 7. Warum ist das eigentlich wichtig? (Teil 1)

- Higgs als Fenster für neue Physik
- Higgs und unser Universum

ein paar Beispiele...

# Ist unser Universum "stabil"?

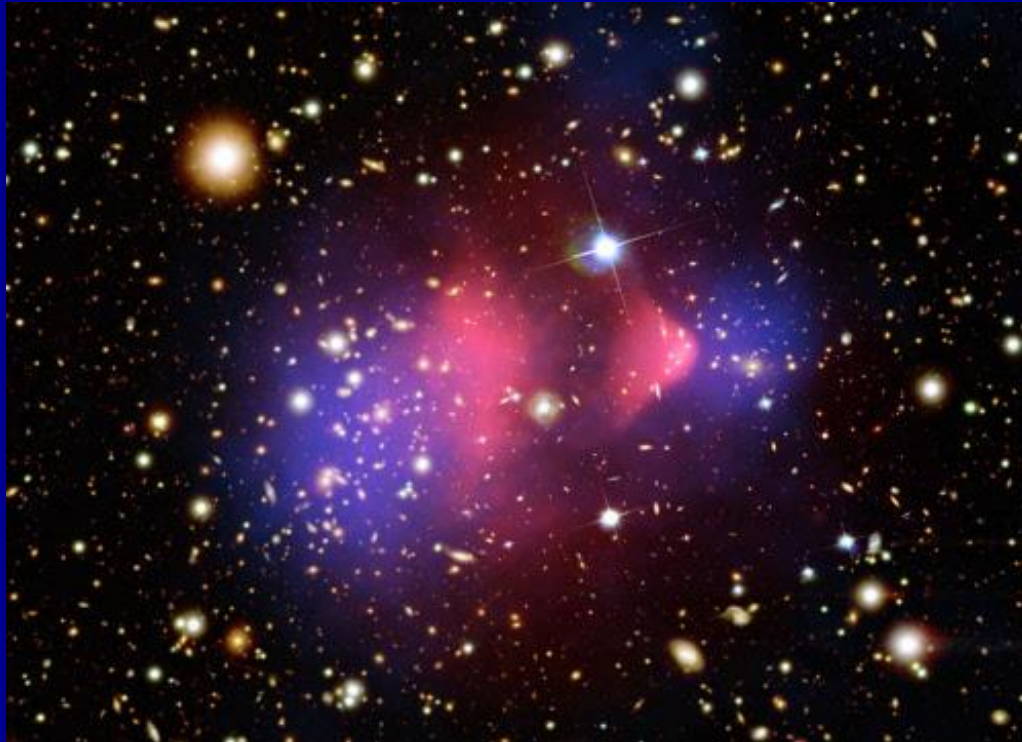


Higgs-Boson und Top-Quark haben ein enges „Verhältnis“  
„Zu leichtes“ Higgs-Boson führt zu instabilem Vakuum (keine Angst... □ )

# Wohin ist die Antimaterie verschwunden?

Die Eigenschaften des Higgs-Teilchens könnten einen neuen Weg zur Erklärung dieser dringenden Frage liefern....

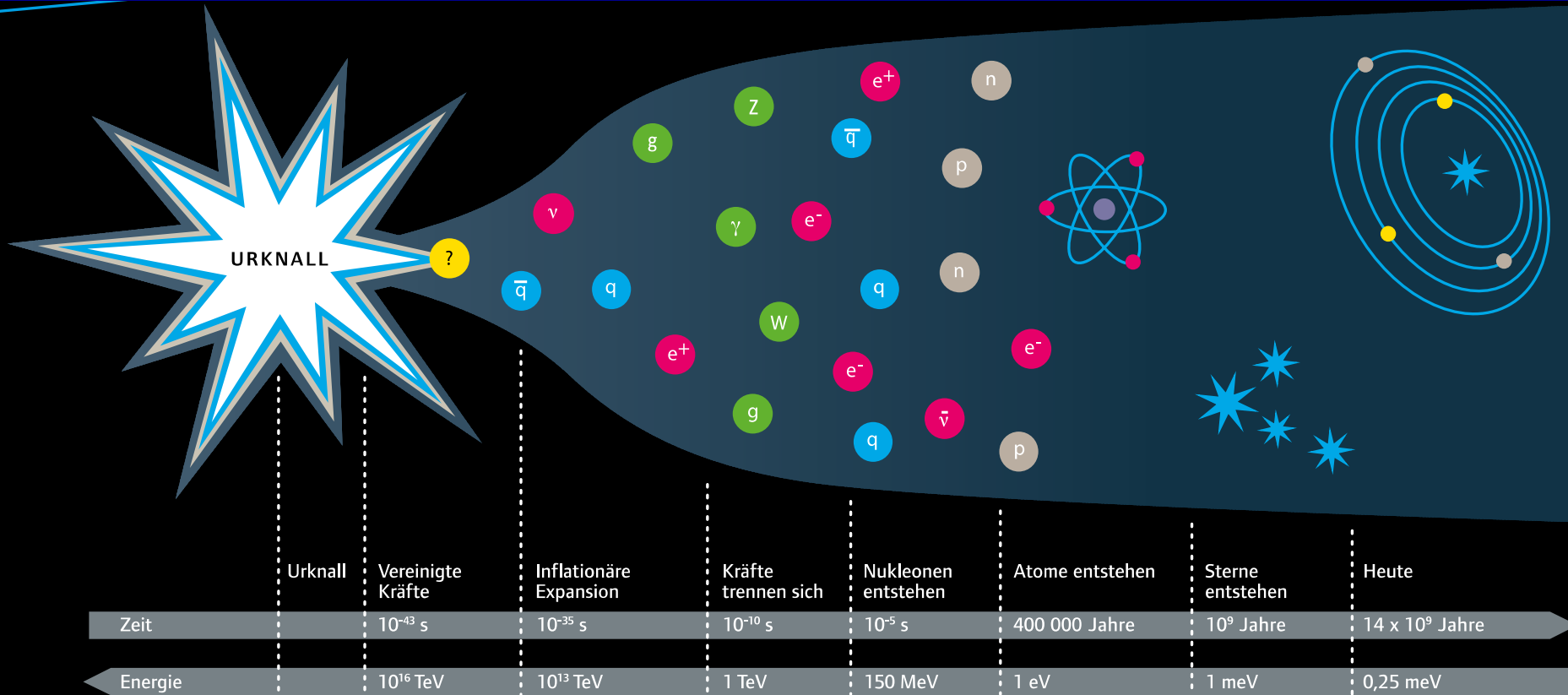
# Higgs und Dunkle Materie



Nein: das Higgs ist kein Kandidat für die Dunkle Materie im Universum!

Aber: da die Teilchen der Dunklen Materie „Masse“ haben, könnte das Higgs-Teilchen zu einem kleinen Teil in sie zerfallen...

# Higgs und Dunkle Materie



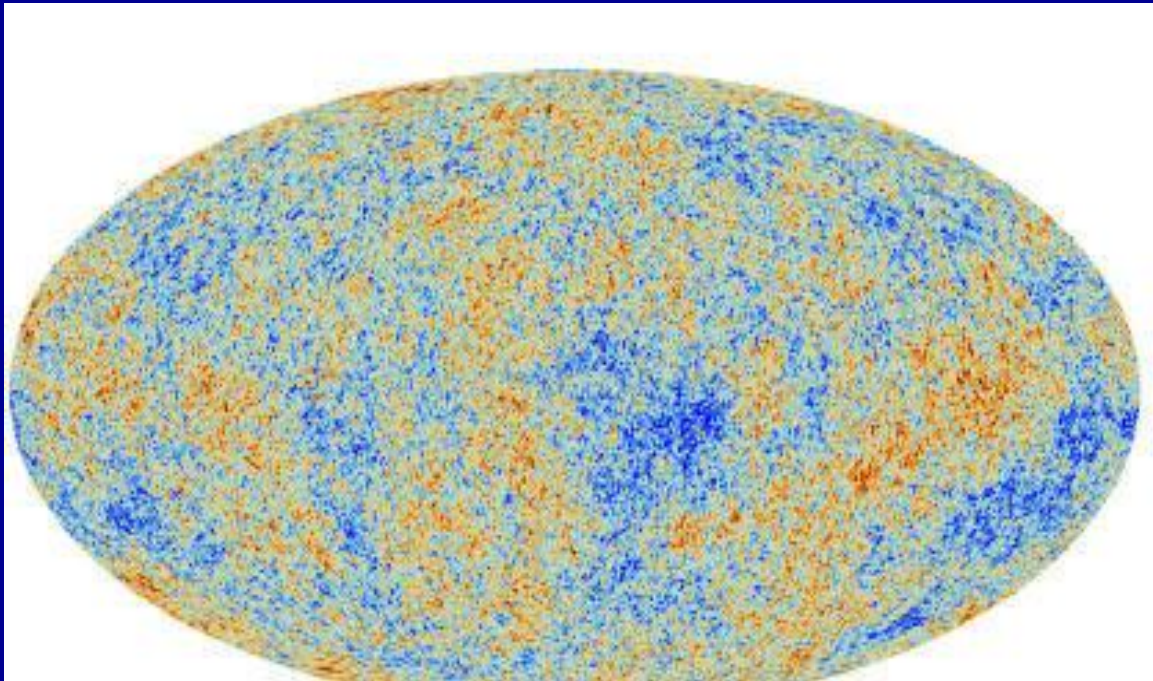
Prozesse mit Higgs-Teilchen im frühen Universum beeinflussen die Menge an Dunkler Materie, die wir heute beobachten

# Higgs und Dunkle Energie

Unser Universum expandiert beschleunigt!  
Wir haben keine Ahnung warum! (= „Dunkle Energie“)

Das Higgs-Feld trägt zur „Dunklen Energie“ bei – leider  $10^{120}$  mal zu viel!!!

Wenn wir das Higgs-Teilchen besser verstehen, beginnen wir vielleicht zu verstehen,  
wo der Denkfehler liegt...





## 7. Warum ist das eigentlich wichtig? (Teil 2)

### - „Higgs“<sup>\*</sup> und die Gesellschaft

\* „Higgs“  $\triangleq$  Experimente der Teilchenphysik

# „Higgs“ ist Grundlagenforschung Neugier - Weltbild - Kultur



# „Higgs“ ist globale Forschung Zusammenarbeit zwischen Kulturen



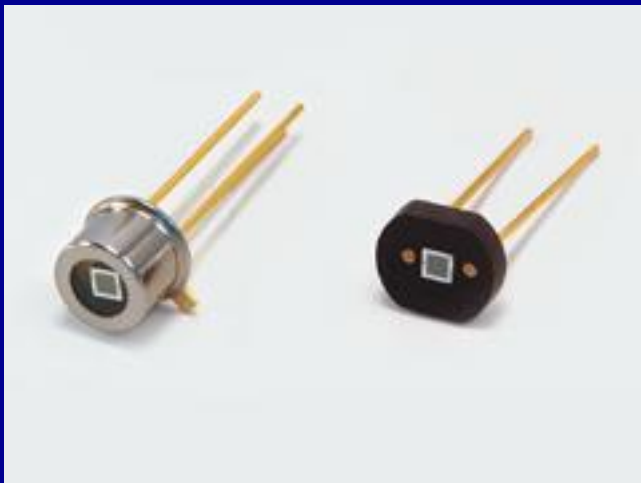
# „Higgs“ liefert Ideen + Technologie

Forschung an der Grenze des technisch möglichen → Innovation

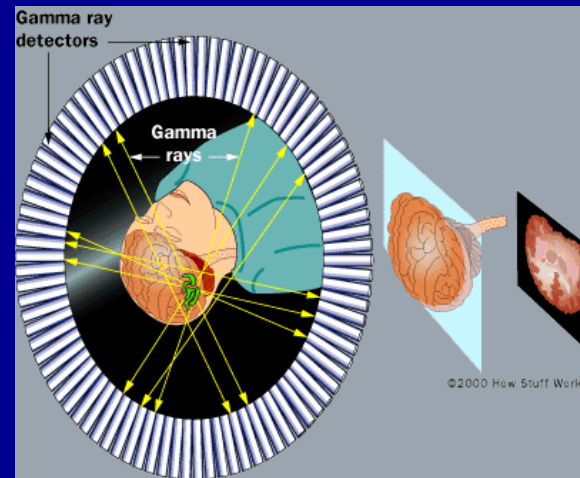
Viele Beispiele von Neuentwicklungen aus der Teilchenphysik in andere Gebiete

- World Wide Web
- Beschleuniger für Medizin (Tumorthherapie), Biochemie, Materialforschung (XFEL)
- Detektoren für verbesserte Diagnose, Hirnforschung, ...
- Organisation globaler Großprojekte

Beispiel: neue PET-Detektoren



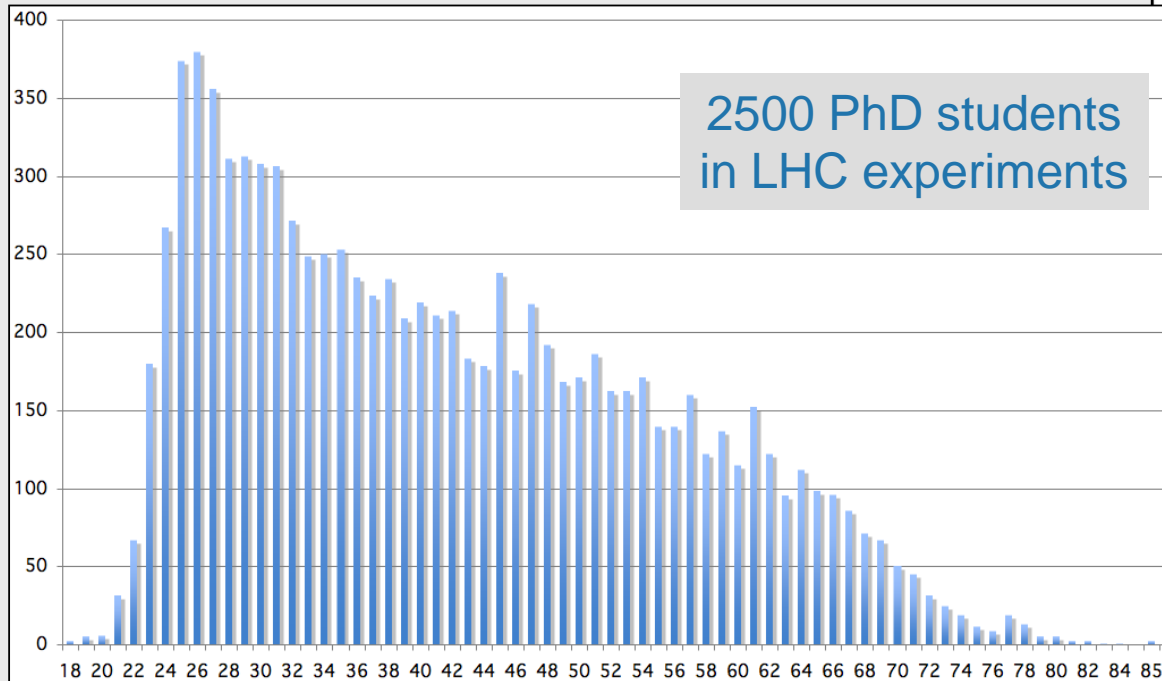
Silizium-Photomultiplier



Prof. E. Garutti,  
Uni Hamburg

# „Higgs“ ist Herausforderung für junge WissenschaftlerInnen

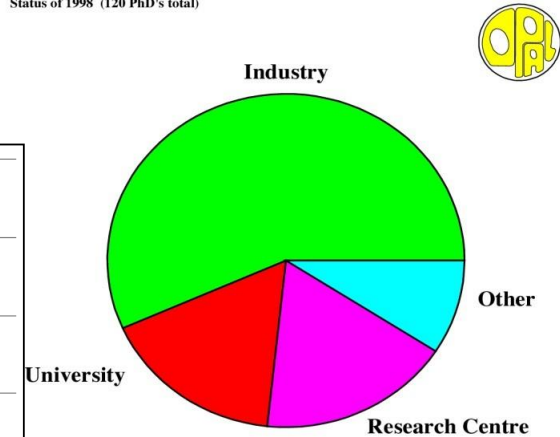
Survey in March 2009



They do not all stay: where do they go?

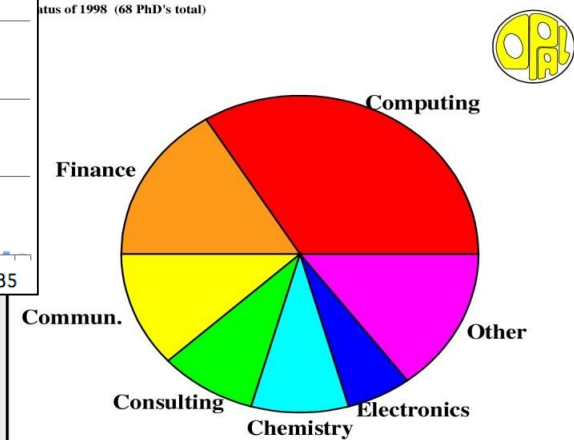


Status of 1998 (120 PhD's total)



Whereabouts of PhD's

Status of 1998 (68 PhD's total)



Whereabouts of PhD's in Industry

# 8. Warum sind diese Woche über 300 Physiker aus aller Welt in Hamburg und was hat das mit dem Higgs zu tun?

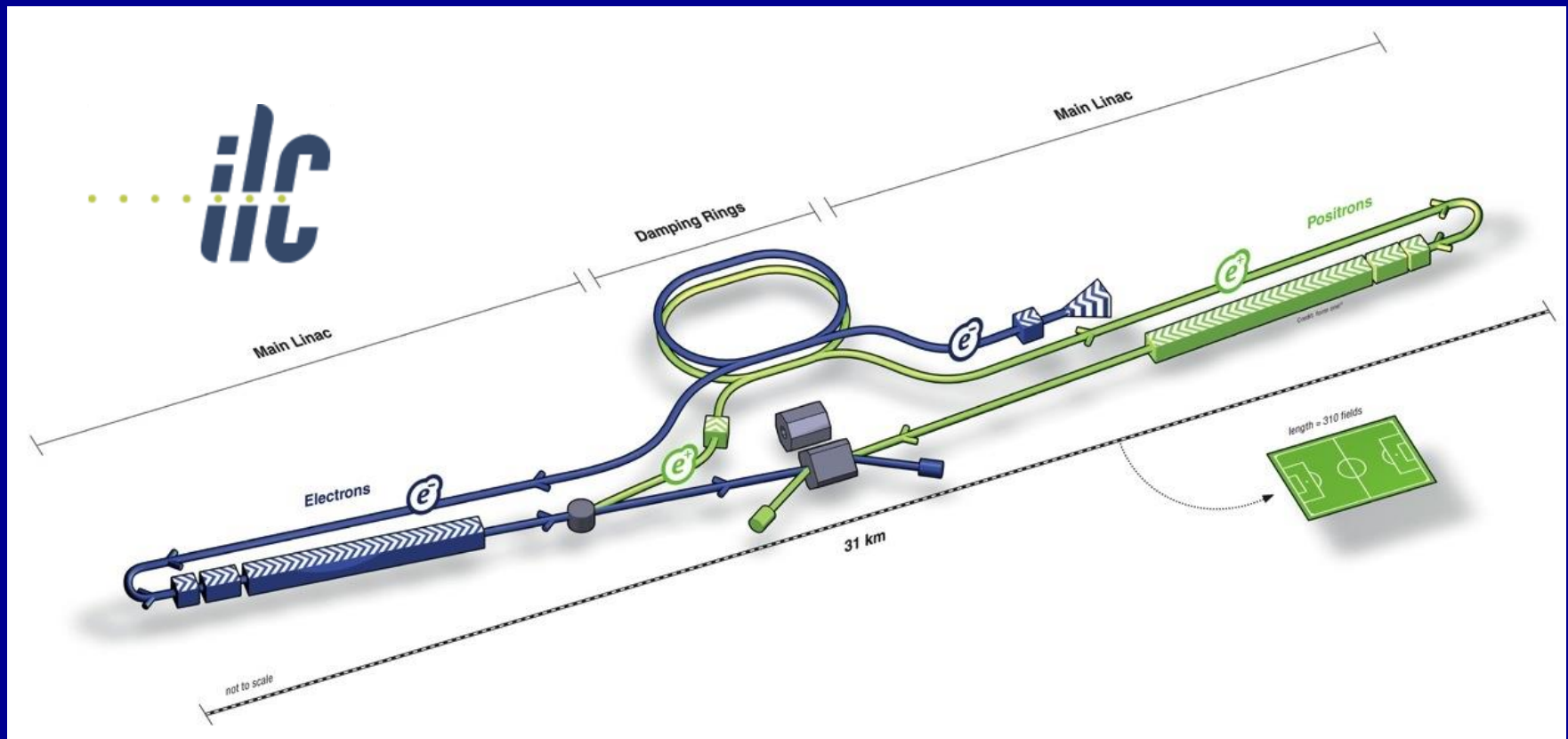
ECFA LC2013

European Linear Collider Workshop  
27 – 31 May 2013  
DESY, Hamburg



# Der nächste Schritt: Präzisionsphysik mit dem Higgs (und mehr...)

## Der International Linear Collider ILC



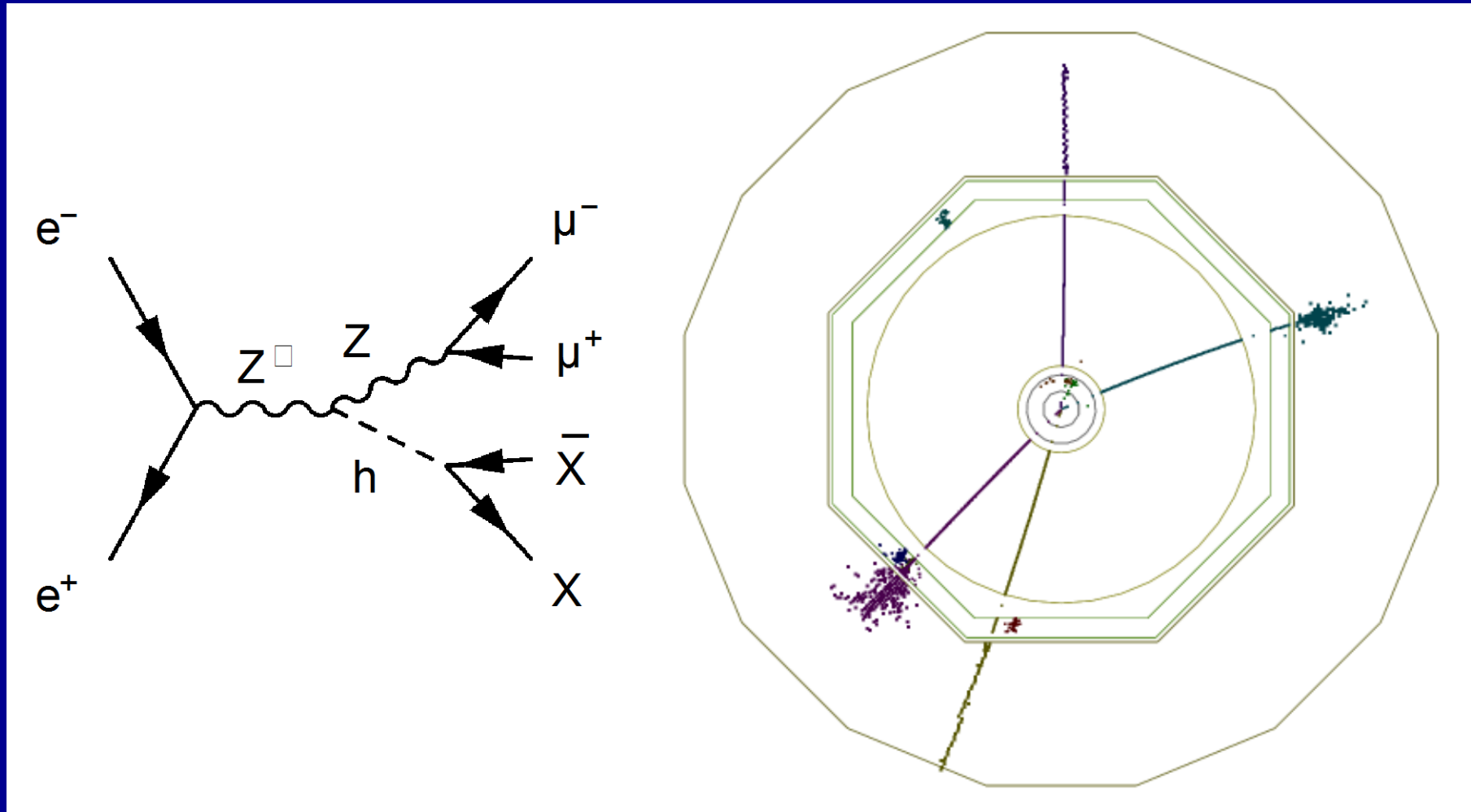
# Supraleitende Technologie



Der ILC basiert auf supraleitenden Beschleunigungselementen in „TESLA“-Technologie – wird hier in Hamburg gerade für den europäischen Röntgenlaser XFEL genutzt



# „Saubere“ Higgs-Ereignisse



# Großes Interesse in Japan am globalen ILC



# Großes Interesse in Japan am globalen ILC





21 December 2012 | \$10

# Science

BREAKTHROUGH  
of the YEAR  
The **HIGGS**  
**BOSON**

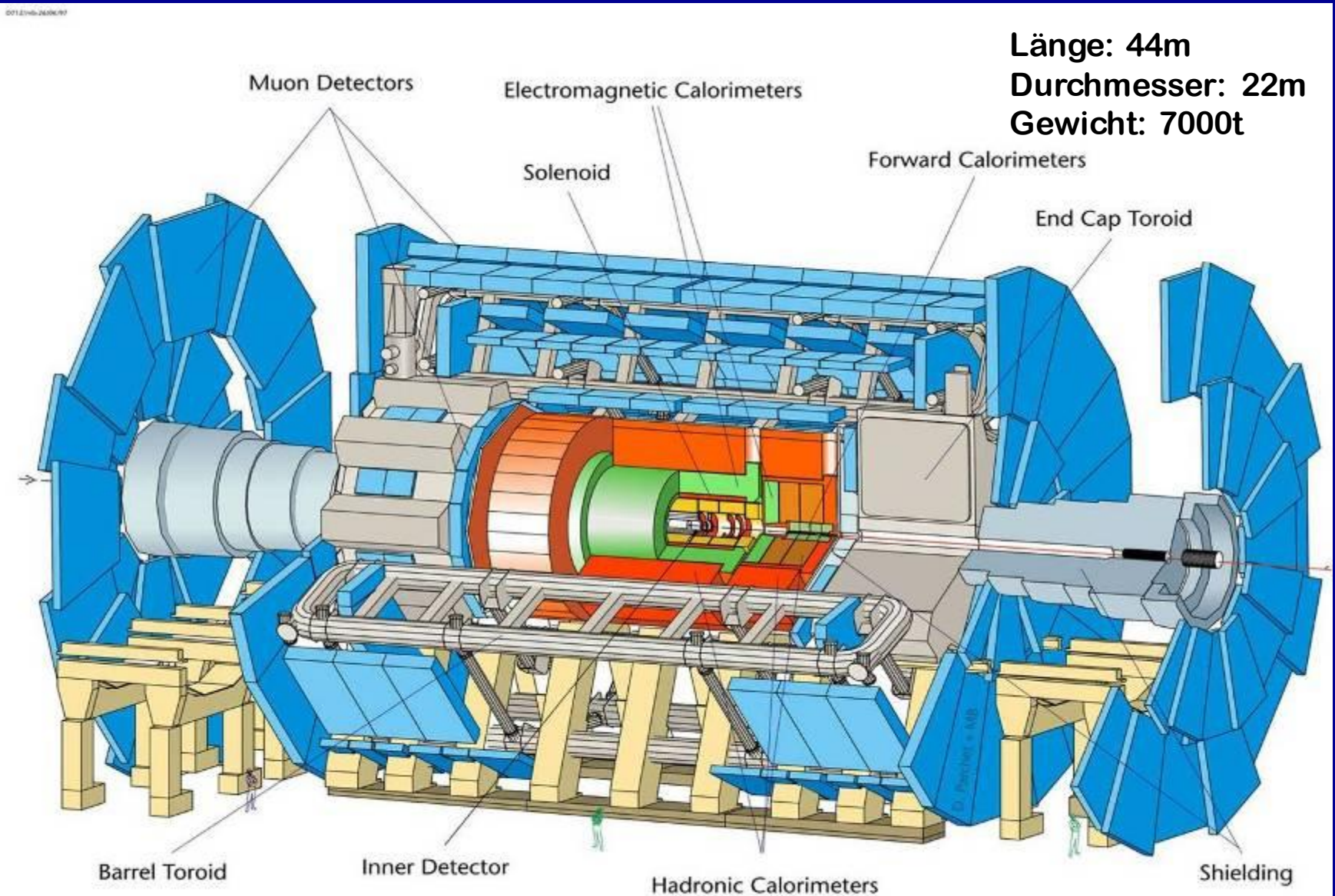
AAAS

it's only the beginning

(Rolf Heuer,  
CERN-Generaldirektor und  
früherer DESY-Forschungsdirektor)

# Backup

# Das ATLAS-Experiment: die Kollisionen sichtbar machen



# Teilchennachweis

