

# INTERNATIONAL MASTERCLASSES HANDS ON PARTICLE PHYSICS

Thorsten Kuhl, DESY

Ullrich Schwanke, Humboldt Universität, Berlin

Adelheid Sommer, DESY

CERN Masterclasses  
HU Berlin  
3. April 2019



# Zeitplan

09:30 Begrüßung

09:45–10:45 Ein Universum voller Teilchen

- Einführung in die Teilchenphysik ([Dr. Thorsten Kuhl](#))

10:45–12:00 Das Unsichtbare sichtbar machen

- Detektoren und Nachweismethoden ([Dr. Ullrich Schwanke](#))

12:00–13:00 Mittagspause

13:00–14:45 Praktische Übung mit LHC Daten am PC

15:00–15:15 Pause

15:15–16:15 Neues vom Higgs-Boson

- Vermessung eines neuen Teilchens ([Dr. Thorsten Kuhl](#))

16:15–17:30 Erfahrungsaustausch über Teilchenphysik im Unterricht, Vorstellung von Programmen im Netzwerk Teilchenphysik ([Adelheid Sommer](#))

# Das Team

Thorsten Kuhl, [DESY](#)

- Ein Universum voller Teilchen (Einführung)

Ullrich Schwanke, [Humboldt Universität](#)

- Unsichtbare Teilchen sichtbar machen (Detektoren)
- Neues vom Higgs (Vermessung eines neuen Teilchens)

Adelheid Sommer, [DESY](#)

- Organisation, Vorstellung Netzwerk Teilchenphysik

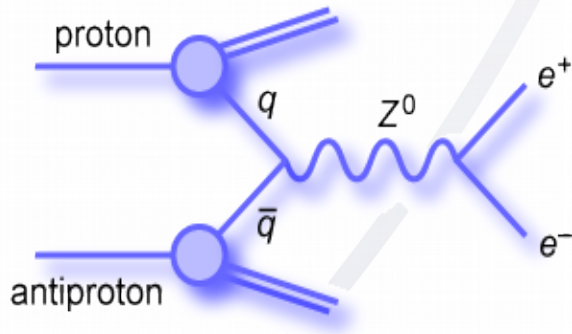
Betreuer der Praktischen Übung:

- Studenten der Humboldt Universität

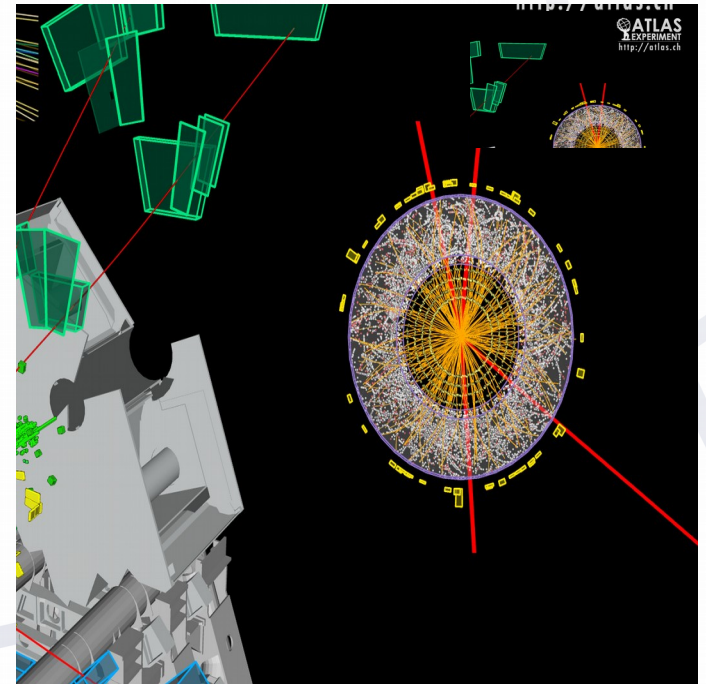
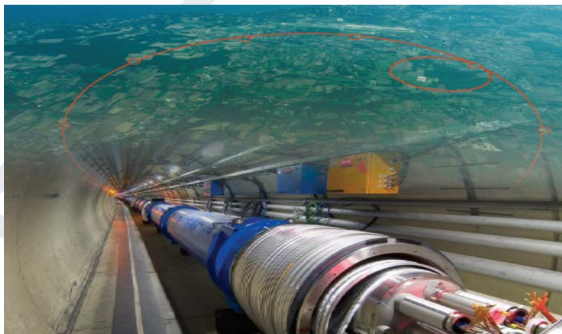


# Einführung in die Teilchenphysik

## LHC-Beschleuniger & ATLAS-Experiment

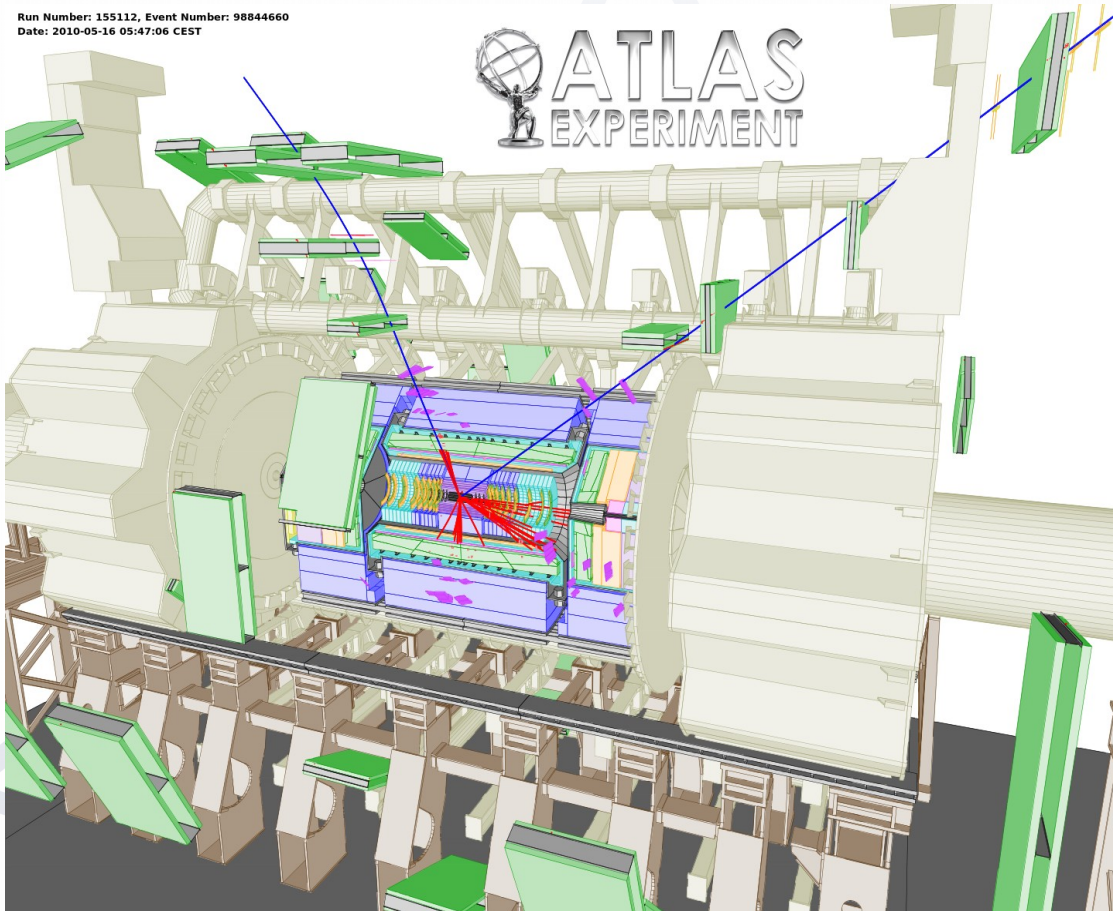


Dr. Thorsten Kuhl, DESY  
International Masterclass  
26. Februar 2018





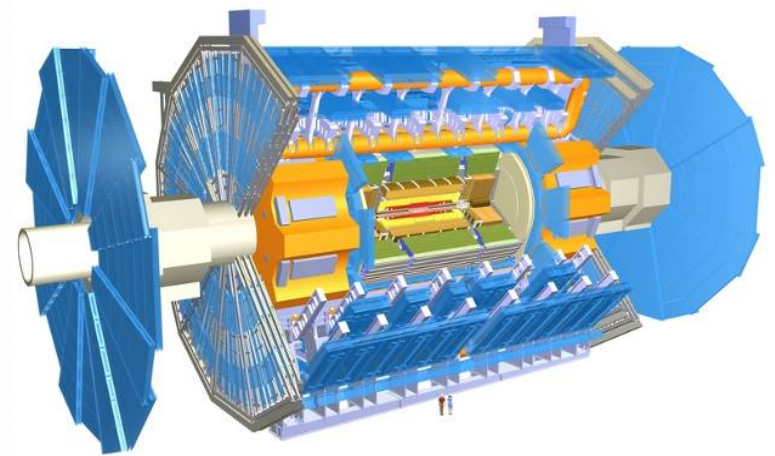
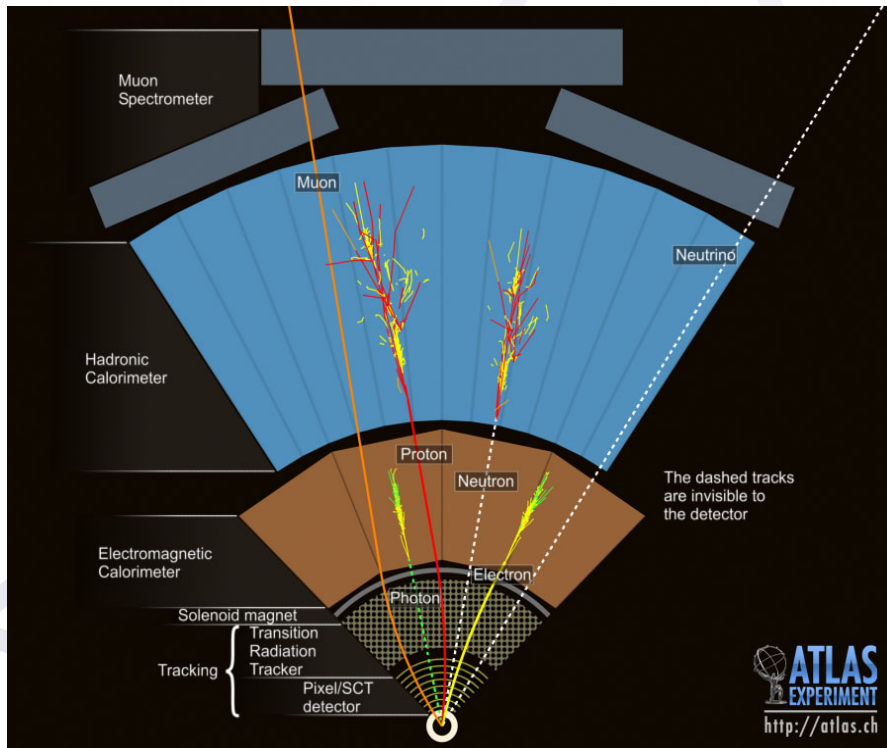
# Was wollen wir heute verstehen?



Was ist hier passiert?  
Warum ist es passiert?

# Spuren von Elementarteilchen

- Teilchen im ATLAS-Detektor
- Vortrag: Martin zur Nedden



# Inhalt

Einführung in die Teilchenphysik

- Das Standardmodell

Das Experiment

- Der Beschleuniger LHC
- Das ATLAS-Experiment

Status der Vermessung des Standardmodells

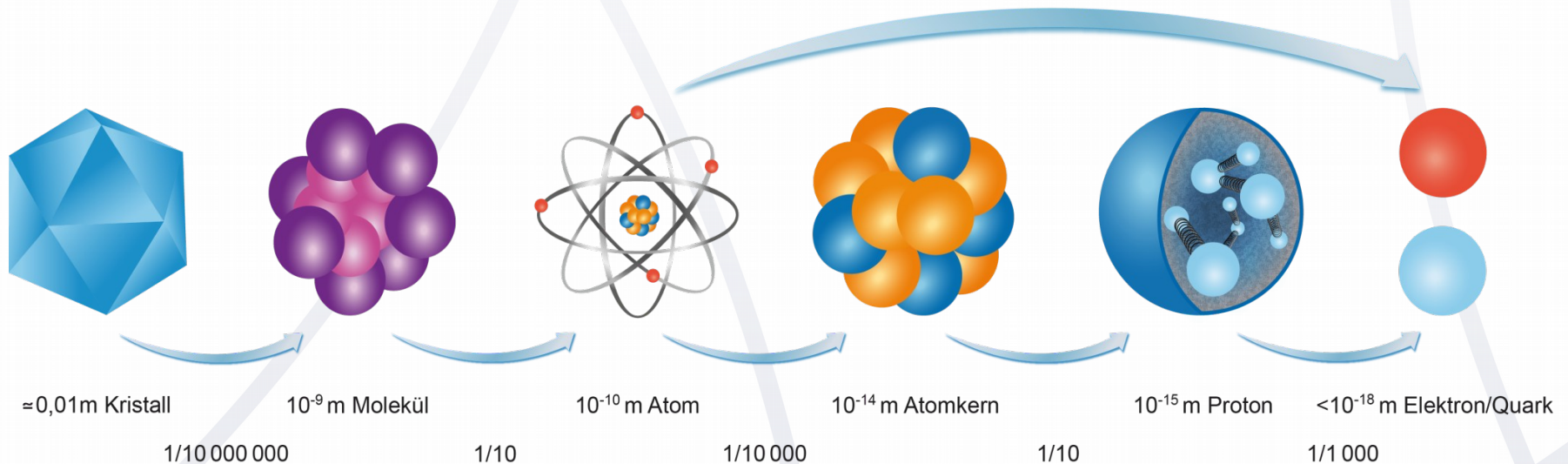




# Einführung in die Teilchenphysik



# Aufbau der Materie

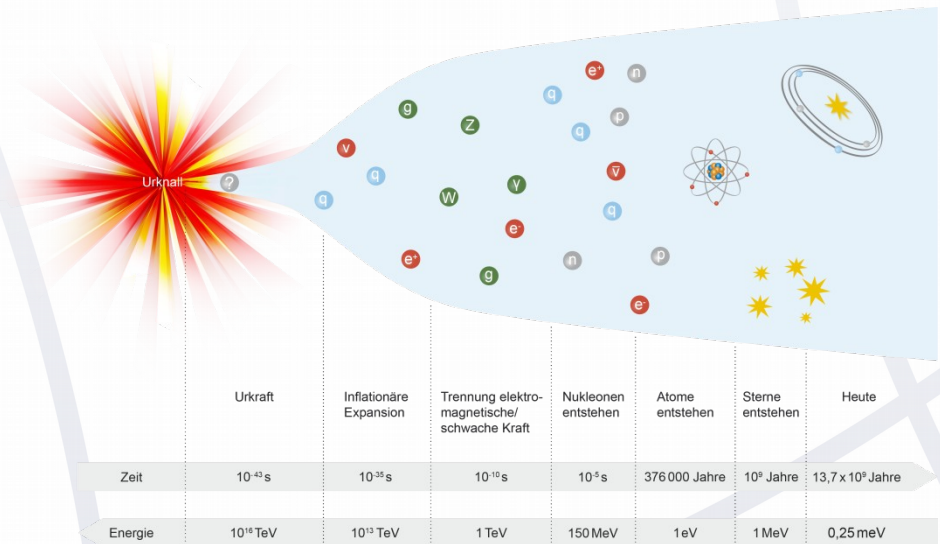
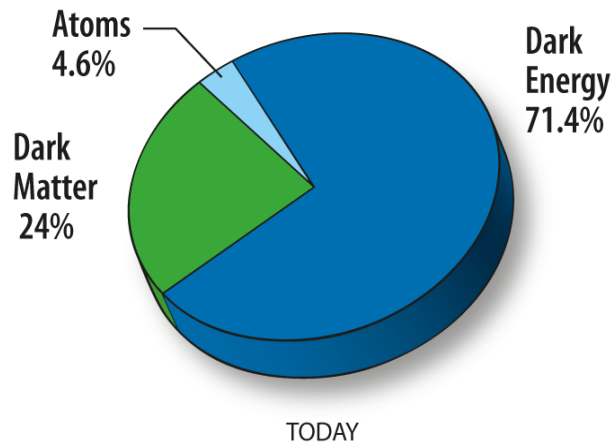


**Stecknadelkopf:**  
 $10^{-3}\text{m} = 0,001\text{m}$

**Elektron, Quark:**  
 $<10^{-18}\text{m} = 0,0000000000000000001\text{m}$

# Zugang zum Universum

## Reise zum Ursprung des Universums





# Zugang zum Universum

## Kosmologie

Aufbau und Dynamik des Universums als Ganzes

## Teilchenphysik

Beschreibung der fundamentalen Bausteine und Kräfte

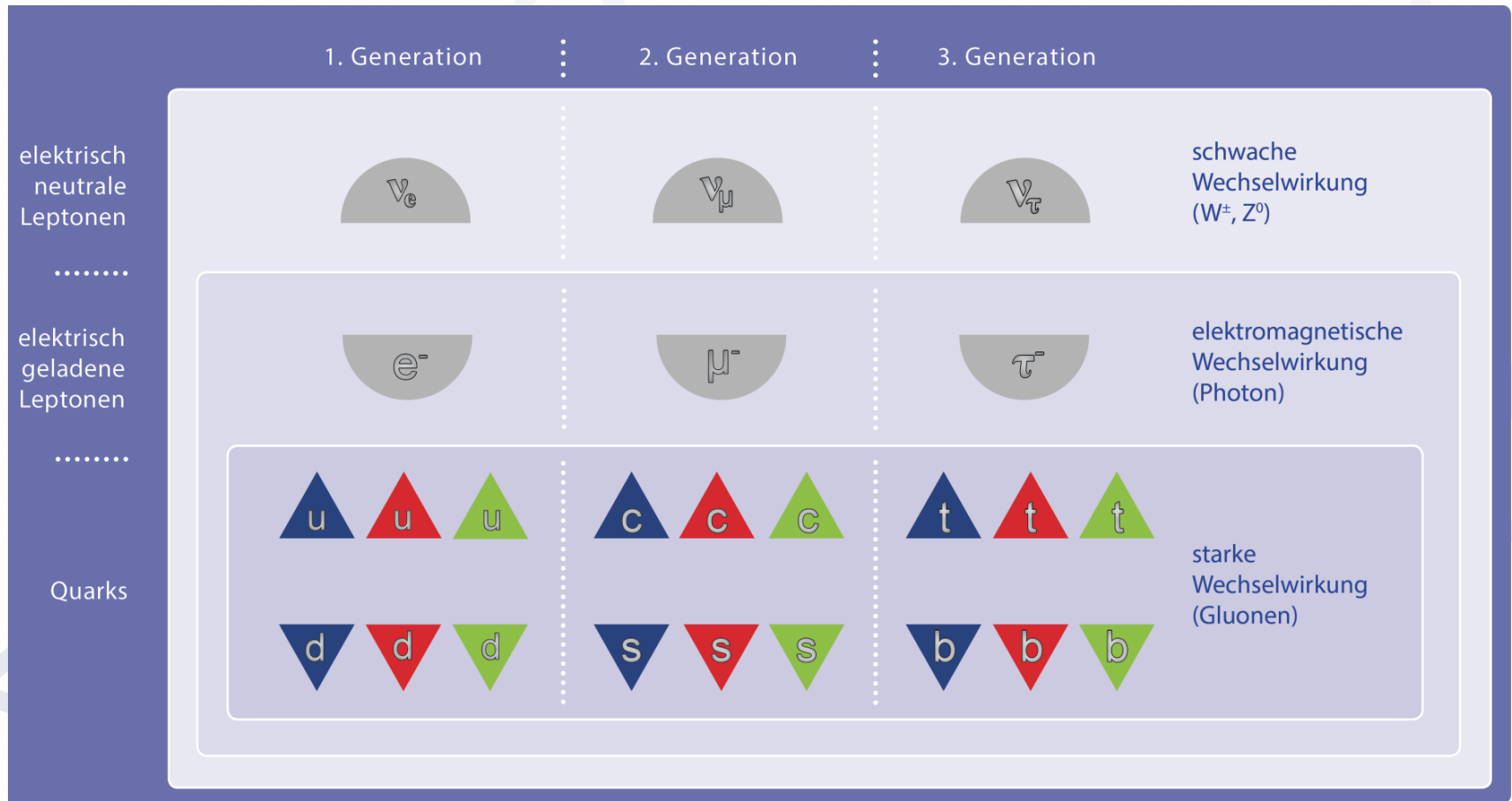
- im “kontrollierten” Experiment (Beschleuniger), Energie limitiert auf das technisch Mögliche

## Astroteilchenphysik

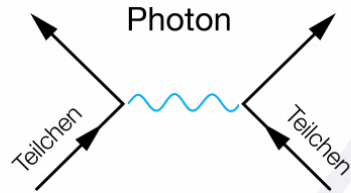
Beschreibung kosmologischer Quellen/Beschleuniger von Elementarteilchen

- das Universum als Beschleuniger, wesentlich höhere Energien möglich
- unkontrolliert, wesentlich größere Detektorflächen nötig

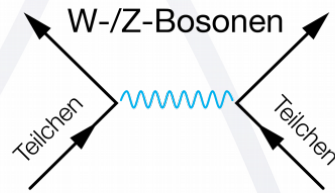
# Bausteine der Materie: Elementarteilchen



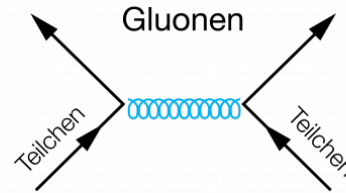
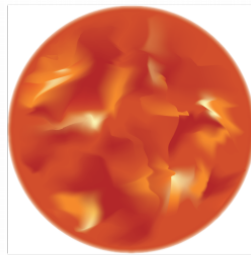
# Die vier Grundkräfte – Austauschteilchen



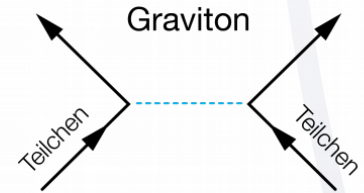
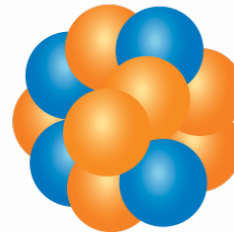
**Elektromagnetische Kraft**



**Schwache Kraft**



**Starke Kraft**



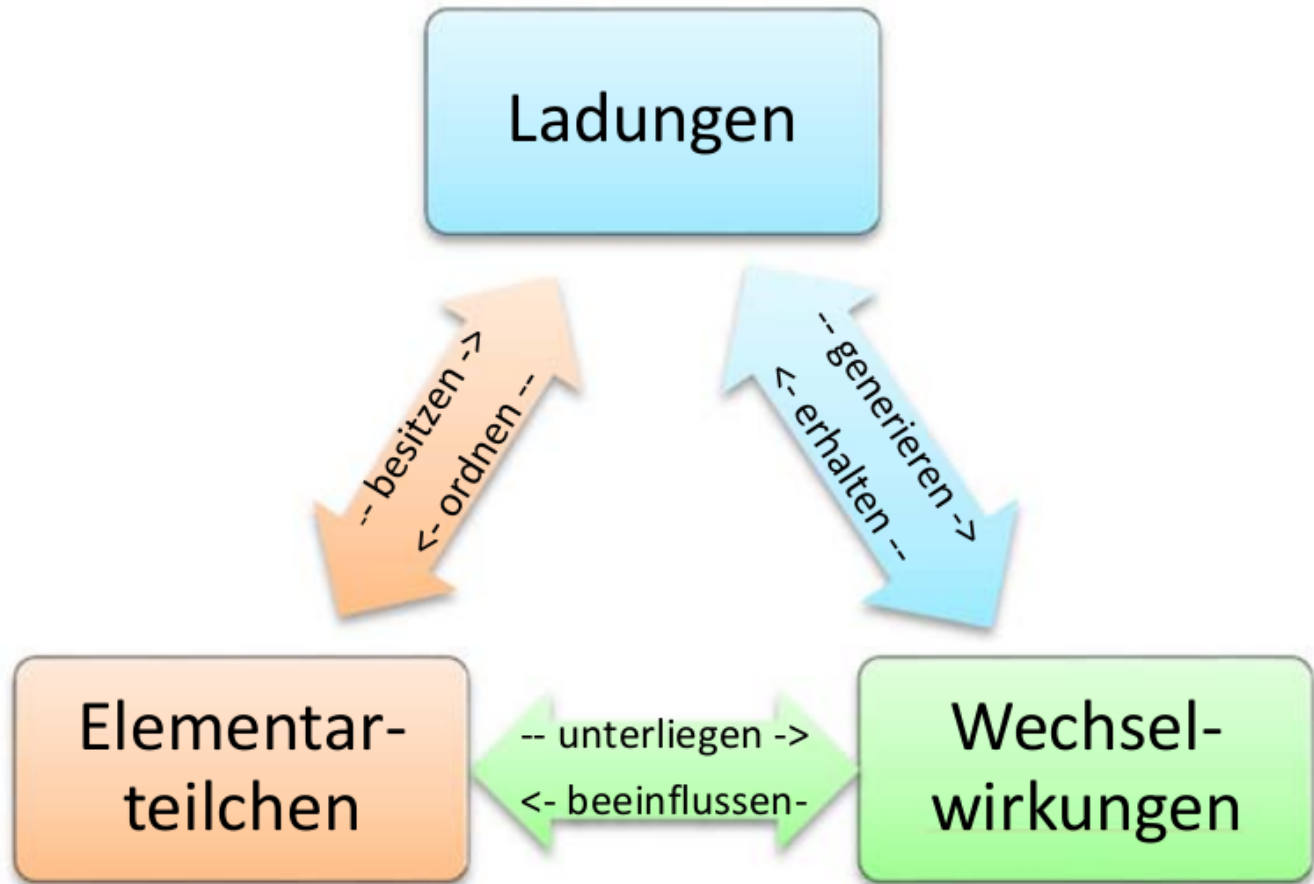
**Schwerkraft**



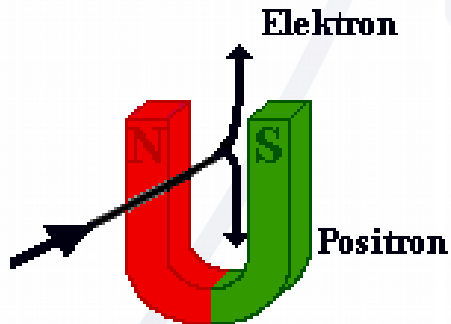
Wechselwirkungen von Elementarteilchen über Austausch von Wechselwirkungsteilchen (**Botenteilchen**)



# Konzept des Standardmodells



# Elektromagnetische Kraft

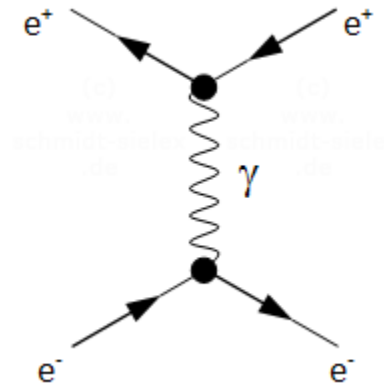
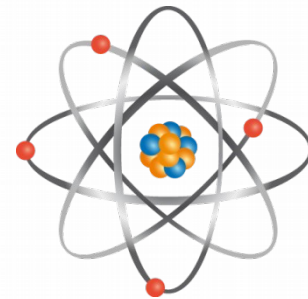


bekannteste aller Kräfte:

elektrische und magnetische Phänomene

Verantwortlich u.a. für:

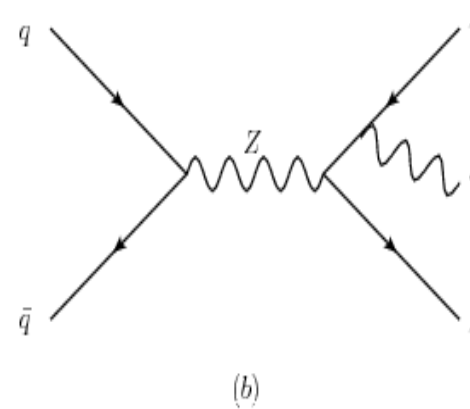
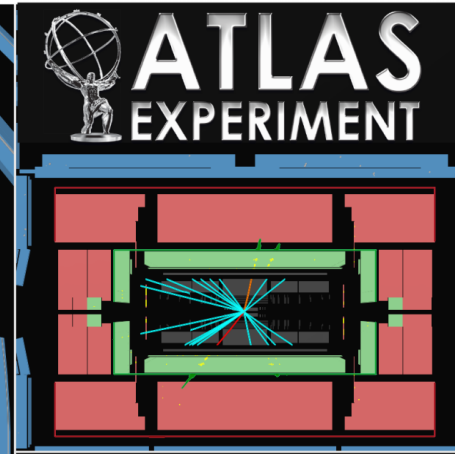
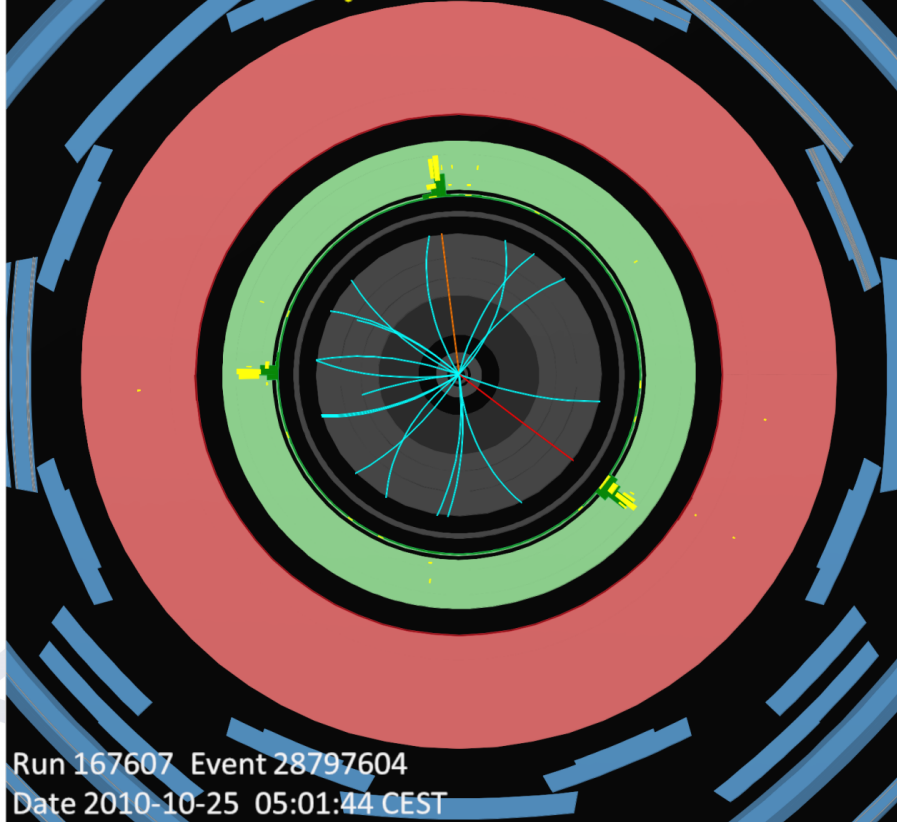
- Elektrizität
- Zusammenhalt der Atome und Moleküle
- elektromagnetische Wellen



→ Zeit

# EM-Wechselwirkung im ATLAS-Detektor

**$Z(\rightarrow ee) + \gamma$  Candidate**





# Starke Kraft

**Beobachtung:** Quarks treten nur im Verbund auf:

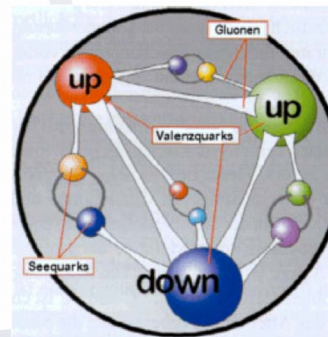
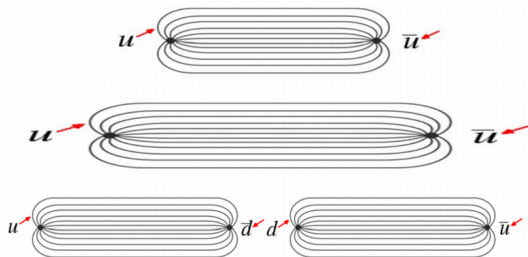
- Proton  $|uud\rangle$  ; Neutron  $|udd\rangle$

**Beschreibung:** Es gibt drei Farben von Quarks, nur farbneutrale Objekte können sich frei bewegen

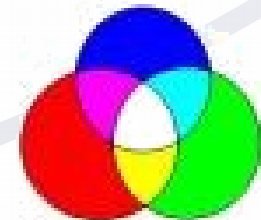
**Folge** (Eigenschaften der starken Wechselwirkung):

- Kraft wächst mit steigenden Abstand der Quarks (Analogon: Federkraft)
- Quarks sind eingesperrt, es gibt keine freien Quarks
- Gluonen tragen Farbladung und koppeln aneinander

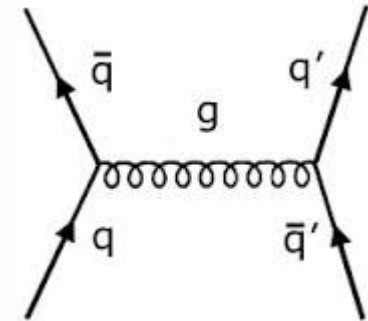
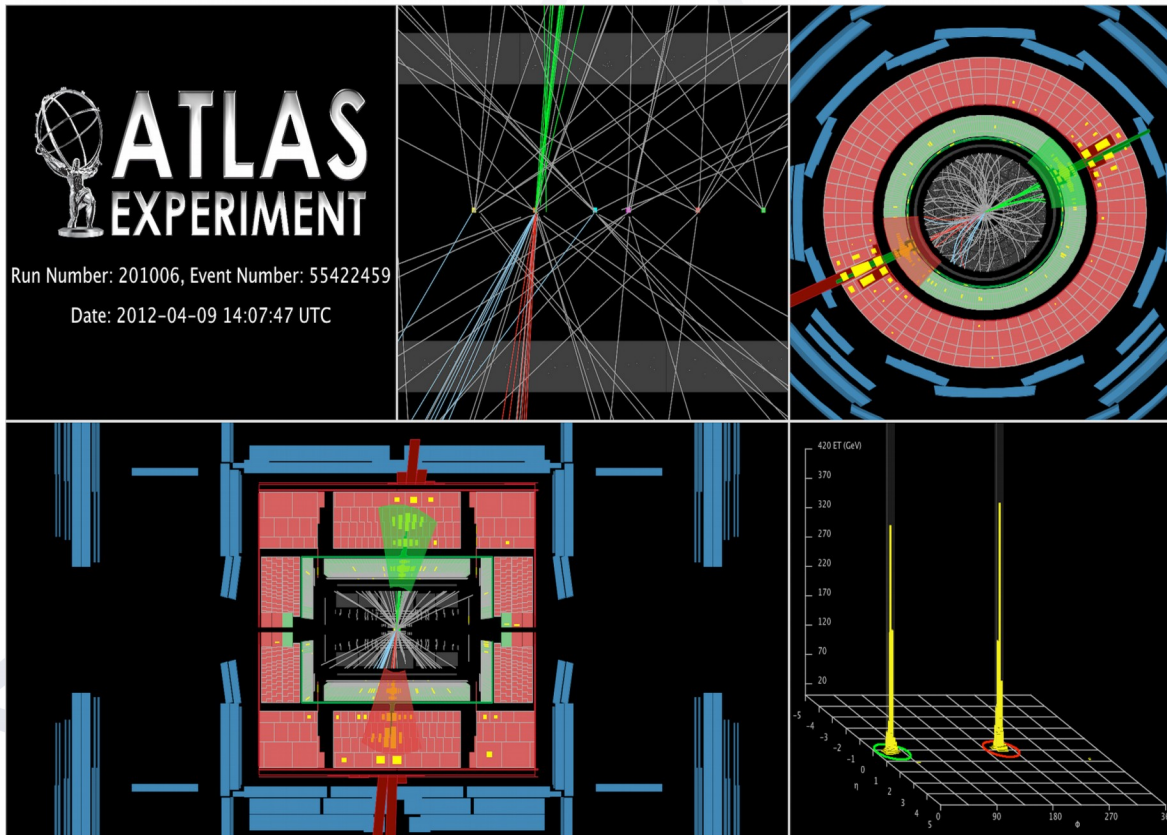
c) siehe folgende Abbildungen



rot, grün, blau



# Starke Wechselwirkung: Jets

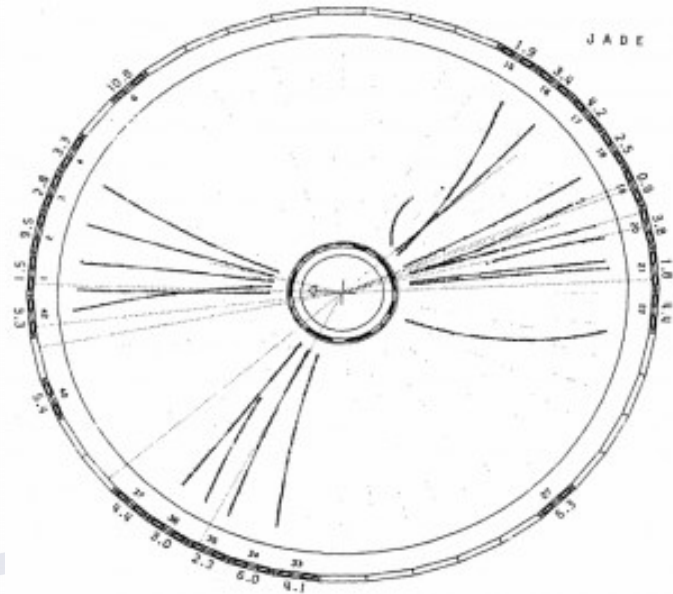
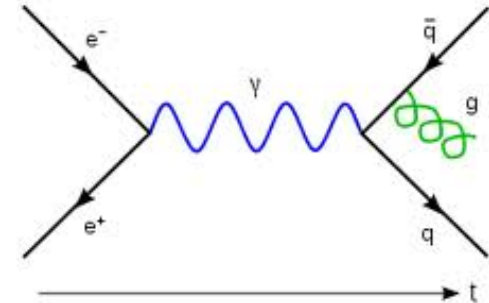


# Entdeckung des Gluons: 3 Jets

## Entdeckung des Gluons:

## Ereignisse mit 3 Jets!

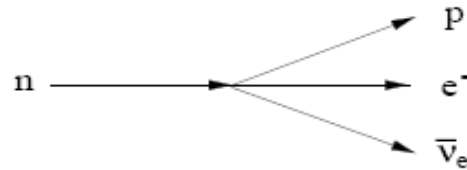
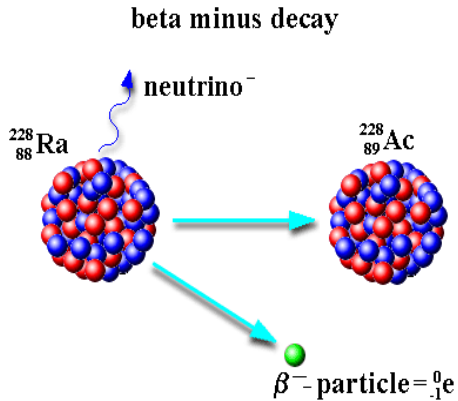
Nur erklärbar, durch  
die Anwesenheit des Gluons





# Schwache Kraft

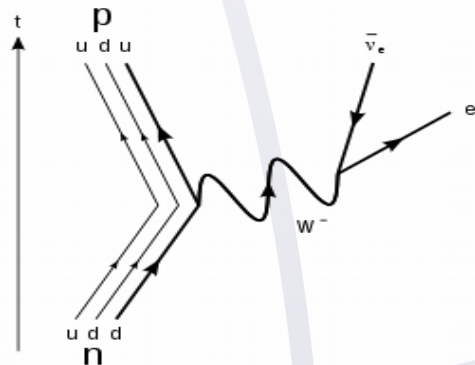
nuklearer  $\beta$ -Zerfall beruht auf dem Neutronenzerfall:  $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}$



Niederenergetische Sicht  
(Kernphysik)

## Quark-Niveau:

d-Quark zerfällt in ein  
u-Quark unter Austausch  
eines virtuellen W-Bosons

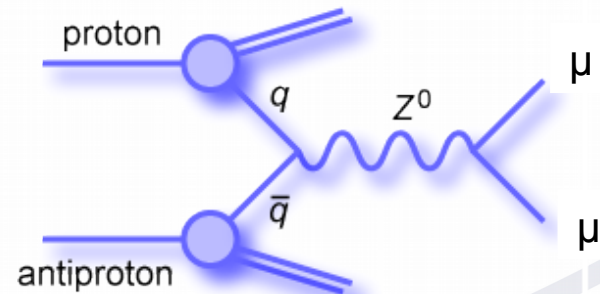
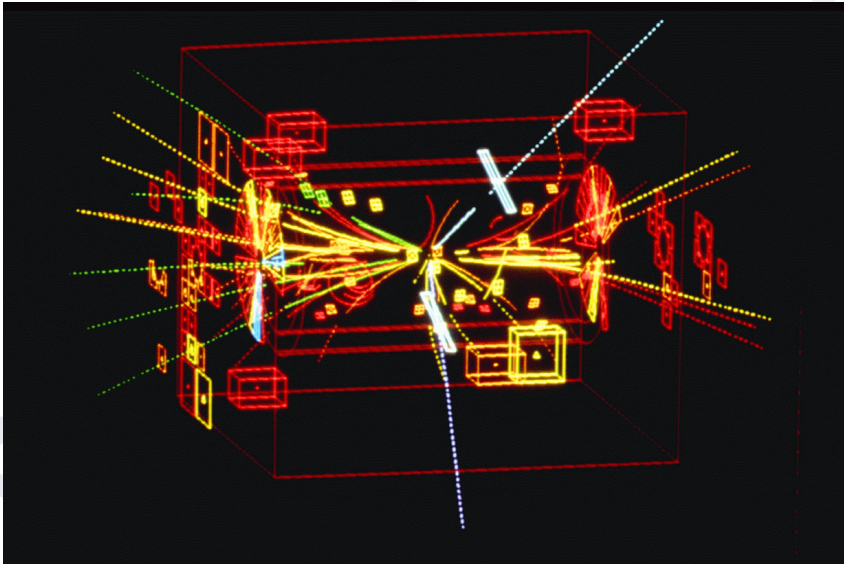


Sicht der Teilchenphysik

**Folge:** Produktion reeller W- und Z-Bosonen in Wechselwirkungen

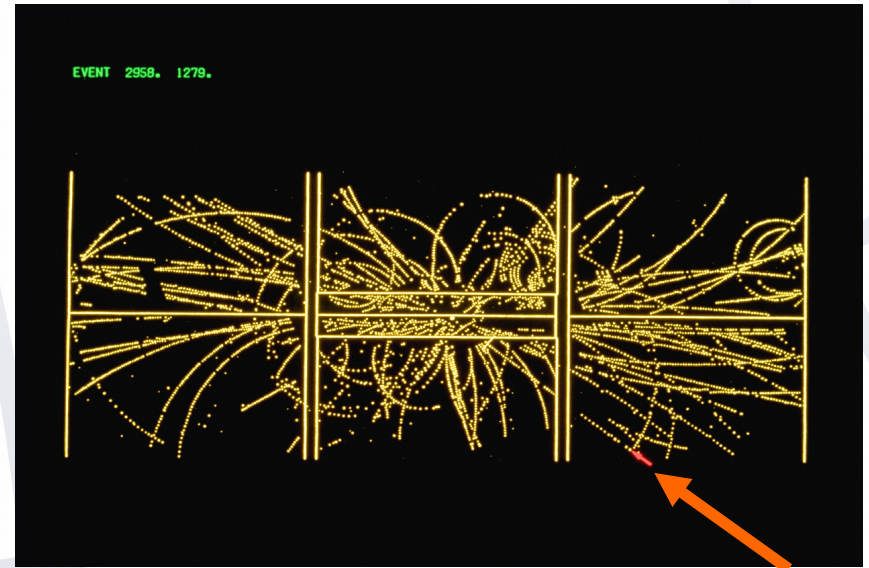
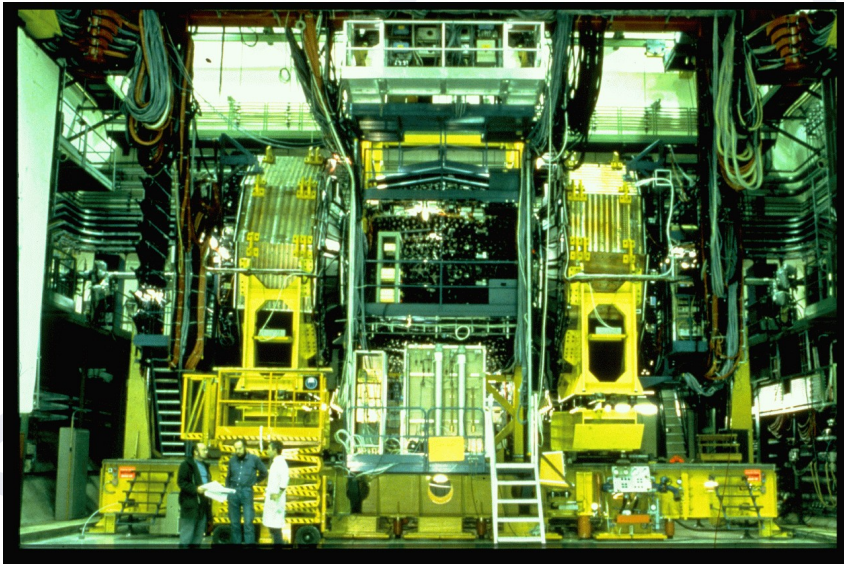
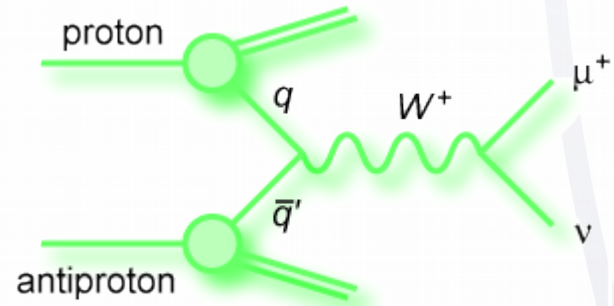
# Entdeckung des Z-Bosons

Gemeinsam mit der W-Entdeckung eine der wichtigsten Leistungen der Teilchenphysik des 20. Jahrhunderts!



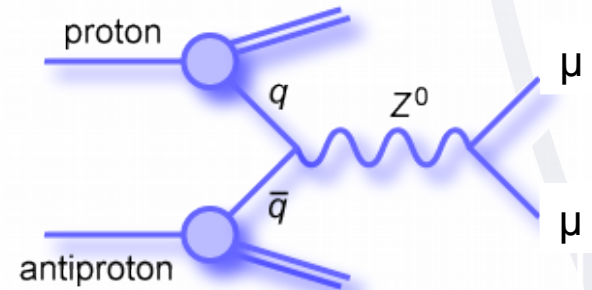
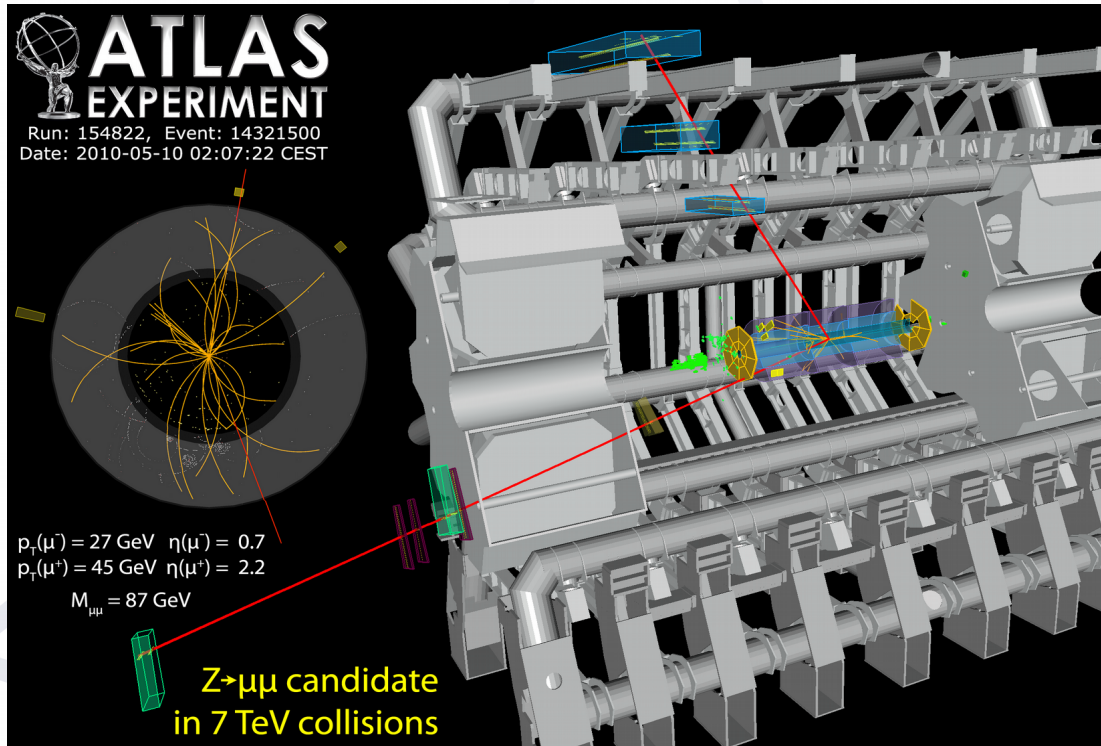
# Entdeckung des W-Bosons

Experiment UA1 und UA2 am CERN





# Z-Bosonen am LHC



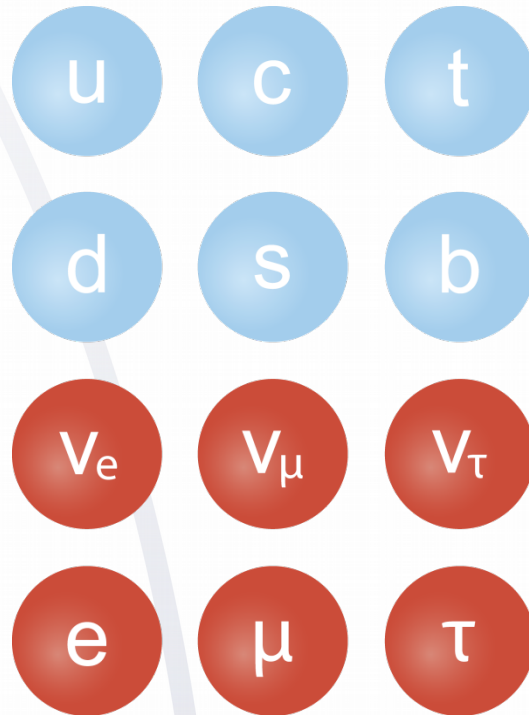


# Das Standardmodell

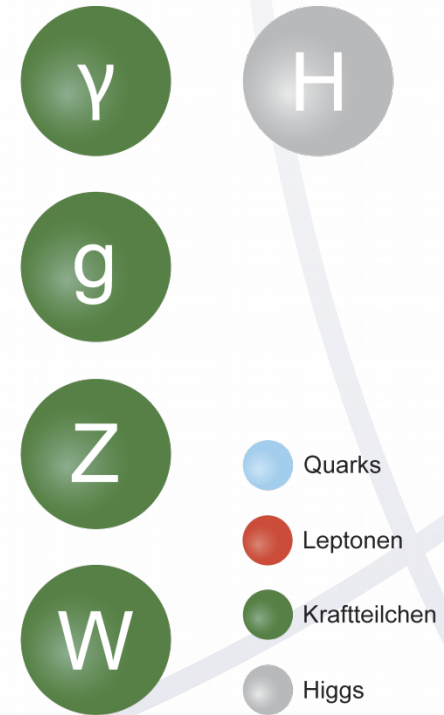
## Letzte Entdeckungen:

- Top Quark
- Higgs-Boson

### Materie (Fermionen)



### Bosonen



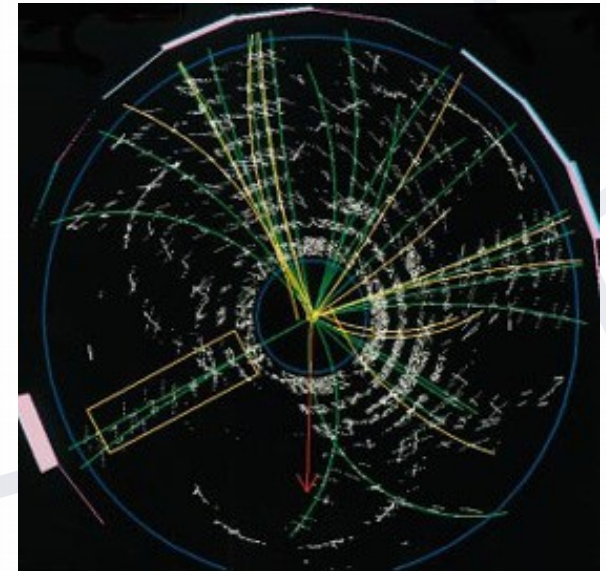
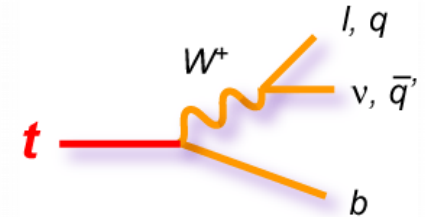
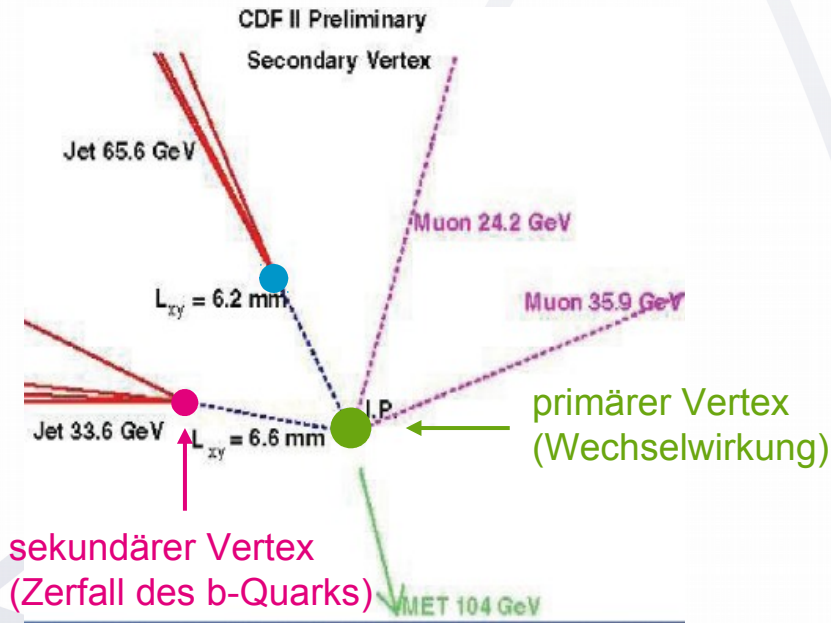
# Entdeckung des Top-Quarks (Fermilab, 1995)

**Produktion:** Paarweise über starke Ww.

**Messung im Detektor:**  $\mu(l)$ : deutliche Signatur,

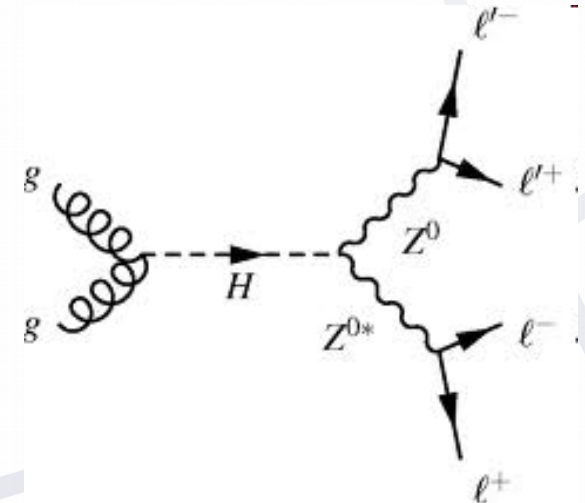
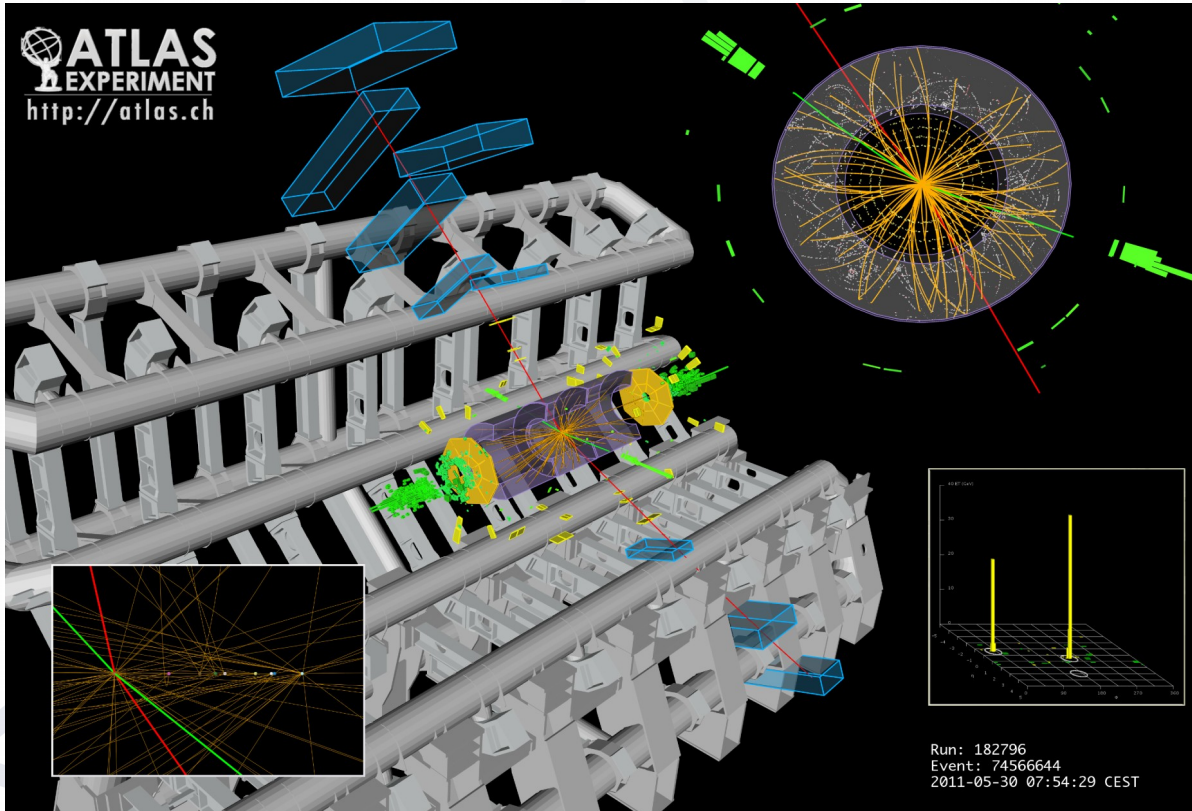
$\nu$ : vermisste Energie

b-Quark Jet: sekundärer Vertex (Zerfall des b-Quarks)



Indirekte Vorhersage des Higgs Bosons

# Entdeckung des Higgs-Boson



☑ Nachmittagsvortrag



# Fragestellungen der Teilchenphysik

Alle Bauteile, des Standardmodells bekannt, was nun?

Elektroschwache Symmetriebrechung, Ursprung der Masse:

- Vermessung des Higgs Bosons (mehr heute Nachmittag)

Suche nach dem Neuen und Unerwarteten:

- SUSY, andere Physik außerhalb des Standardmodells (BSM, Beyond the Standardmodell)

Dunkle Materie

Verifizierung des Standardmodells:

- Präzisionsmessungen im Standardmodell
- Vermessung des Top-Quarks
- Vermessung von Di-Bosonen (doppelte W/Z-Produktion)



# Das Forschungszentrum CERN und der LHC



# Das CERN

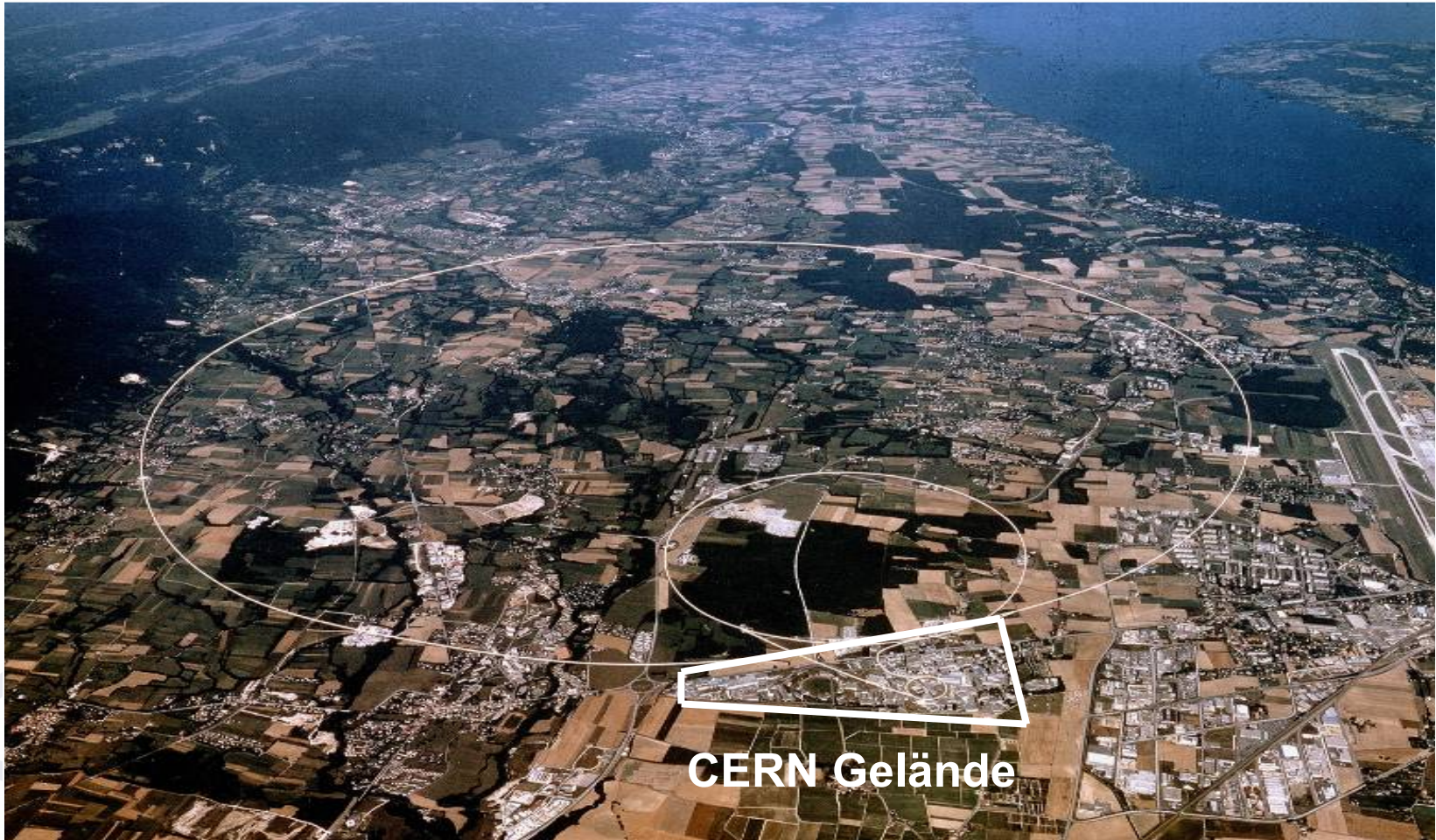
**C**onseil  
**E**uropéen pour la  
**R**echerche  
**N**ucléair



Standort	Genf (Schweiz und Frankreich)
Mitgliedstaaten	20 Europäische Nationen
Budget pro Jahr	~ 700 Millionen Euro (davon 20 % aus Deutschland)
Mitarbeiter vor Ort	~ 3 400, weltgrößtes Forschungszentrum
Beteiligte WissenschaftlerInnen	~8 000 aus 85 Nationen



# Das Forschungszentrum CERN in Genf



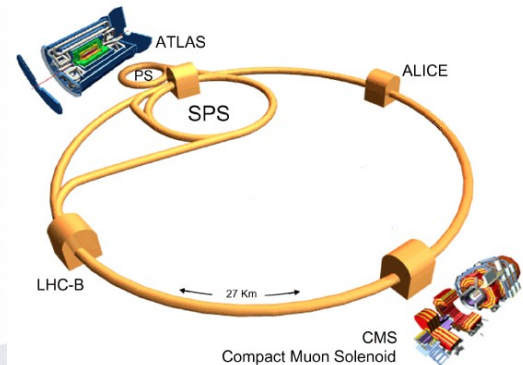
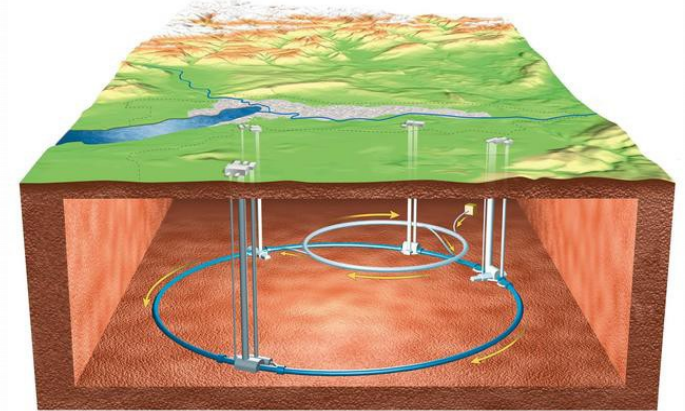


# Der Beschleuniger LHC

Ringtunnel mit Umfang von 27 km

in 50–175 m Tiefe in Genf

Warum ist der LHC rund und so groß?





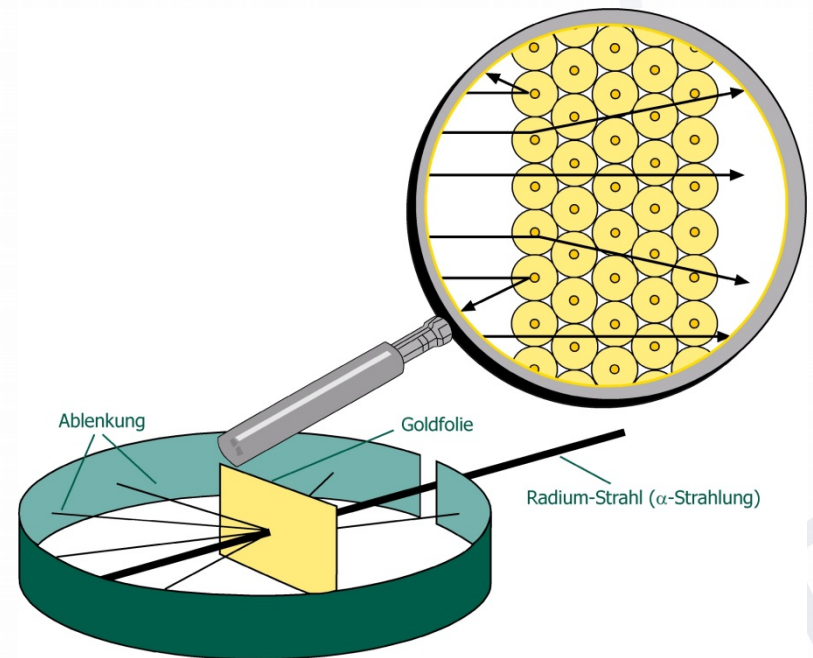
# Streuversuche: Unsichtbares sichtbar machen

**E. Rutherford:** Struktur der Atome durch Streuversuche

Streuwinkelverteilung hängt direkt mit der Materieverteilung im Atom zusammen

**indirekte Messung der Substruktur:**

Atom besteht aus fast leerer Elektronenhülle und Atomkern



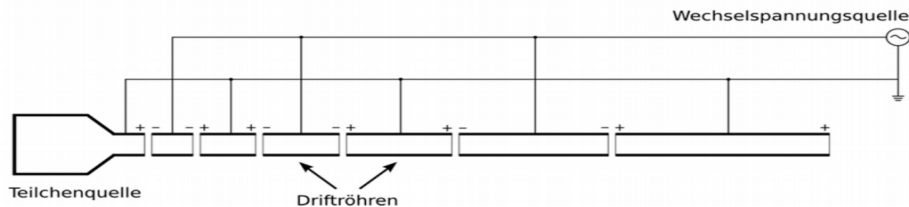
# Teilchenbeschleuniger

## Teilchenquelle:

Erzeugung von Elementarteilchen  
z.B. Wasserstoffflasche für Protonen

## Beschleuniger:

beschleunigt geladene Teilchen  
mit Hilfe von elektromagnetischen Feldern



bei hohen Energien/Geschwindigkeiten:  
Hochfrequenzfelder



# Vom Linear- zum Kreisbeschleuniger

höhere Energien durch wiederholtes  
Durchlaufen derselben  
Beschleunigungsstrecke

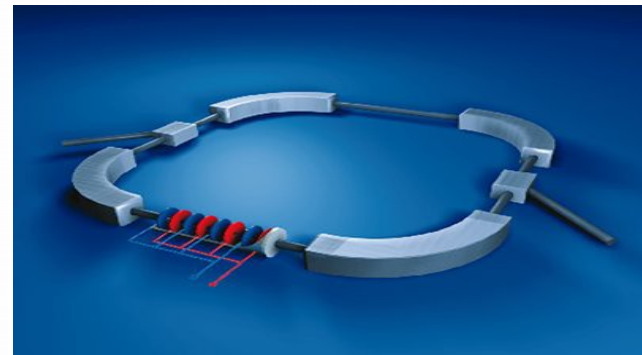
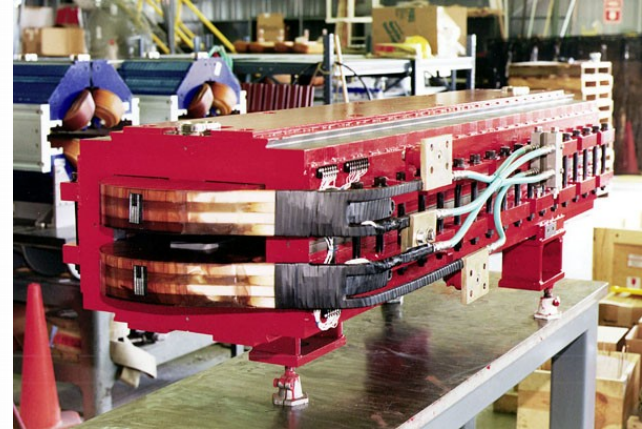
- Ringbeschleuniger

Krümmung der Teilchenstrahlen durch  
geeignete Ablenkmagnete

- Dipolmagnete

Magnetfeldstärke muss synchron mit der  
Energie der Teilchenstrahlen ansteigen

- Synchrotron





# Vom Beschleuniger zum Collider

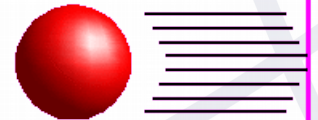
Ein Beschleuniger lenkt einen Strahl  
vom beschleunigten Teilchen auf  
ein festes Ziel



## Collider:

(zwei kombinierte Beschleuniger):  
zwei Teilchenstrahlen werden  
beschleunigt und zur Kollision gebracht:

- größere Energien werden erreicht



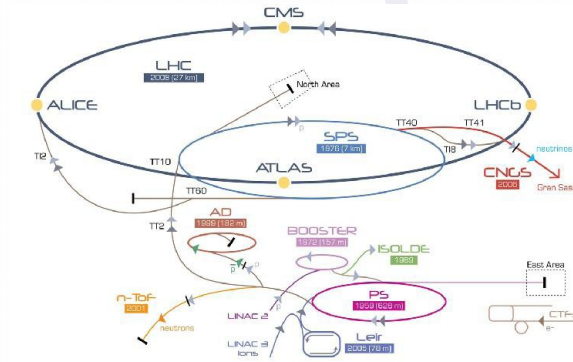


# Beschleuniger-Systeme am CERN

2800 Strahlpakete, jedes mit  $10^{11}$  Protonen,  
25ns zwischen den Strahlpaketen

## Beschleunigungsabfolge:

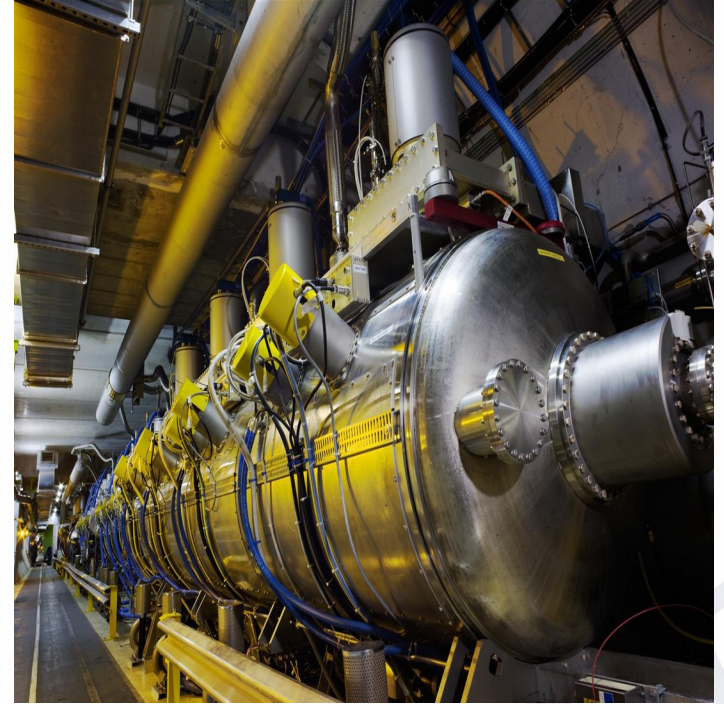
1. Protonenquelle (Flasche)
2. LINAC2: 50 MeV
3. PSB: 1,4 GeV
4. PS: 28 GeV
5. SPS: 400 GeV
6. LHC: 6,5 TeV



# Beschleunigungstrecken

Hochfrequenz-System zur Beschleunigung der Strahlen:

- Mikrowellen in supraleitenden Kavitäten (16 Mio Volt)
- 8 Kavitäten im LHC
- Energiezufuhr: 5 MeV/m
- Magnete dienen nur der Strahlführung





# Die LHC Magnete

Supraleitende Magnete:

$L = 15 \text{ m}$ ,  $M = 30 \text{ t}$ ,  $B = 8,33 \text{ T}$

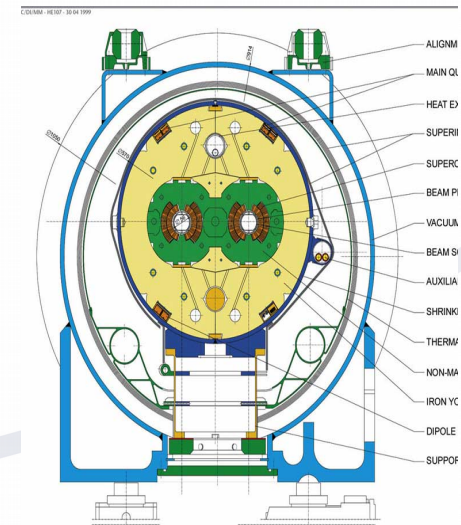
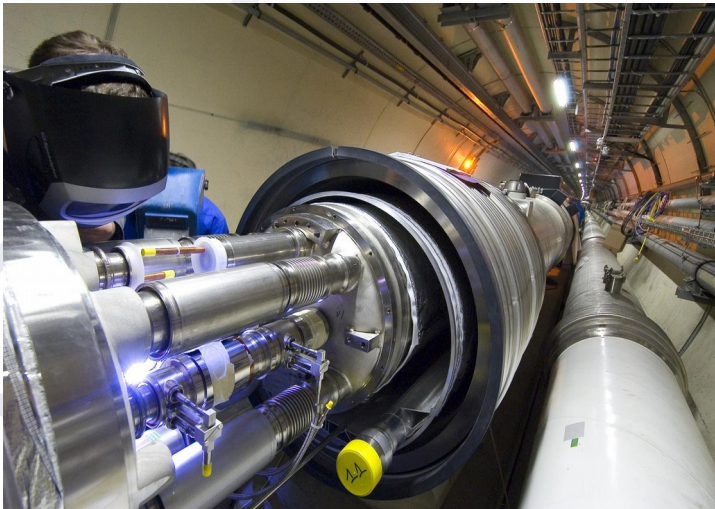
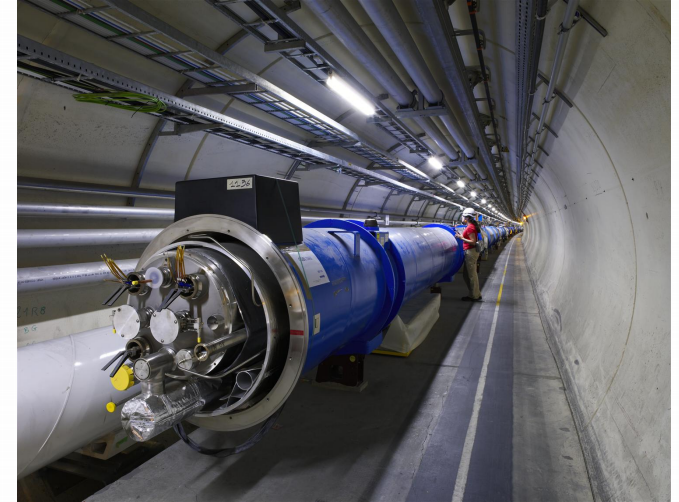
Temperatur:  $1,9 \text{ K}$

Strom:  $11700 \text{ A}$

Kühlung: superfluides Helium

1232 Ablenkmagnete (Strahlführung)

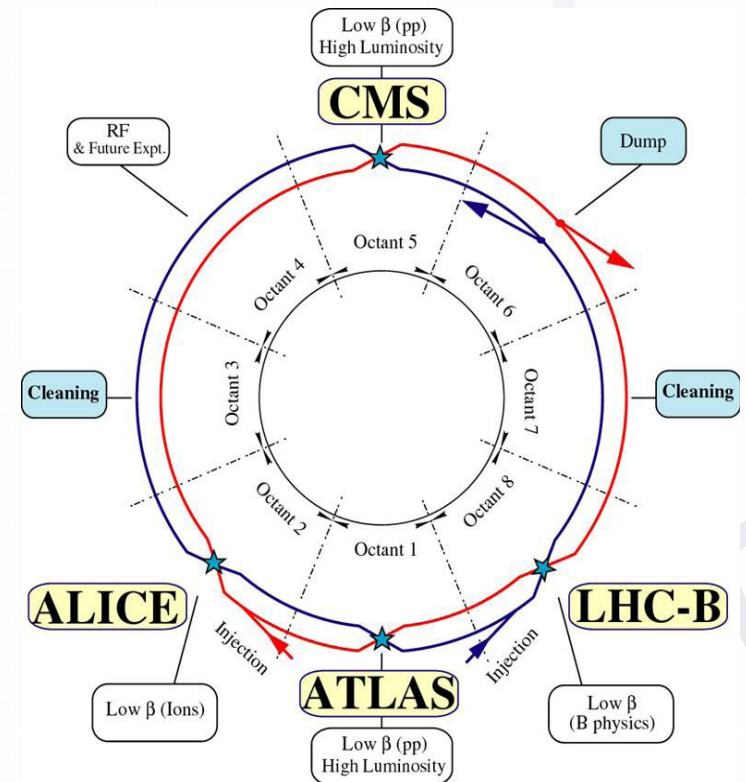
7600 weitere Magnete (kleinere)





# LHC: Technischer Überblick

Typ	Proton-Proton/ Pb-Pb Collider
Umfang	26,7 km
Energie	13 TeV pro Strahl
Luminosität	$10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
Strombedarf	120 MWatt
Planung	1984 – 1994
Bau	1994 – 2008
Laufzeit	Ca. 20 Jahre
Kosten	3 Milliarden EURO
Experimente	4 (6)

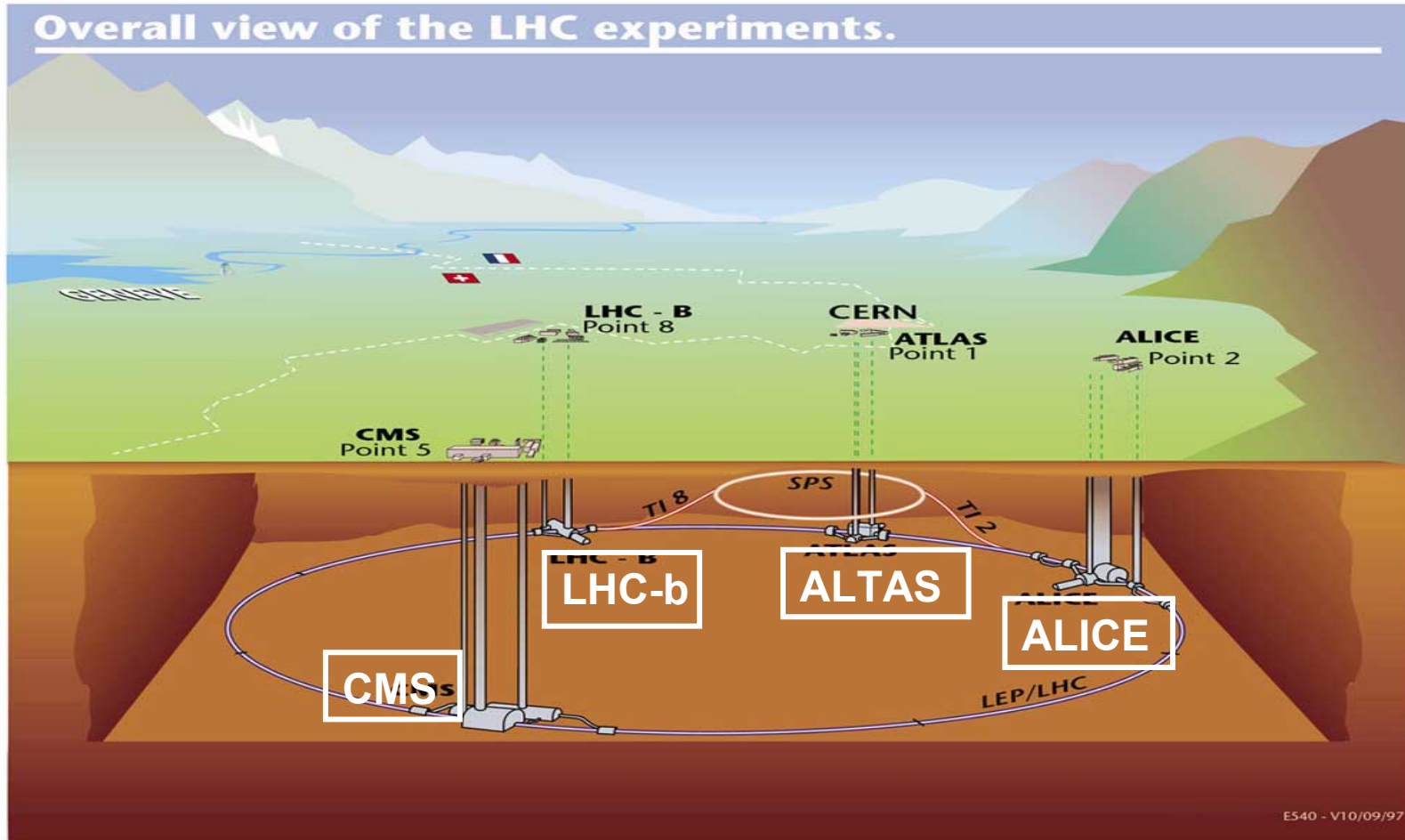


# Das CERN control center



Kontrollraum aller Beschleunigeranlagen

# Die 4 Experimente am LHC

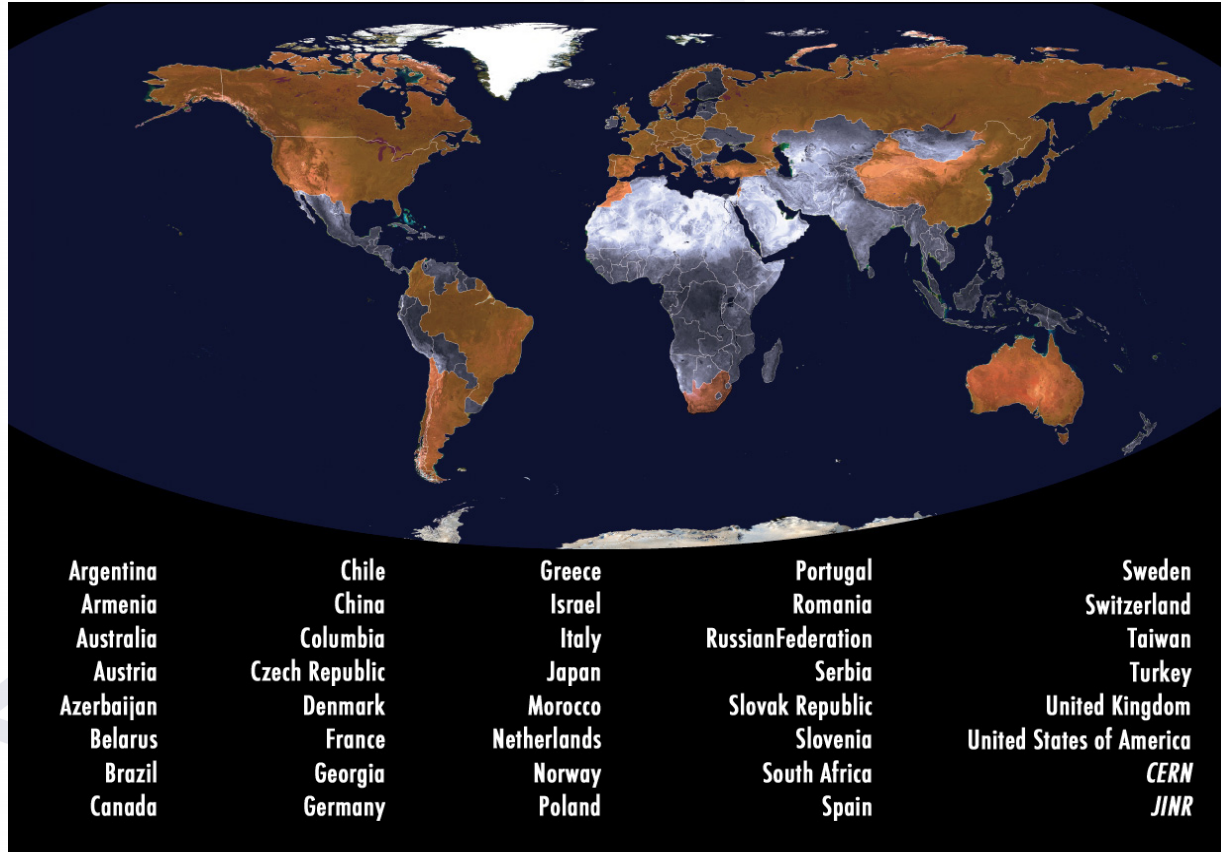




# Das Experiment



# ATLAS: weltweite Kollaboration



38 Länder  
185 Institute  
3500 WissenschaftlerInnen  
(Status 2015)



# Das ATLAS- Areal





# Die ATLAS-Kaverne



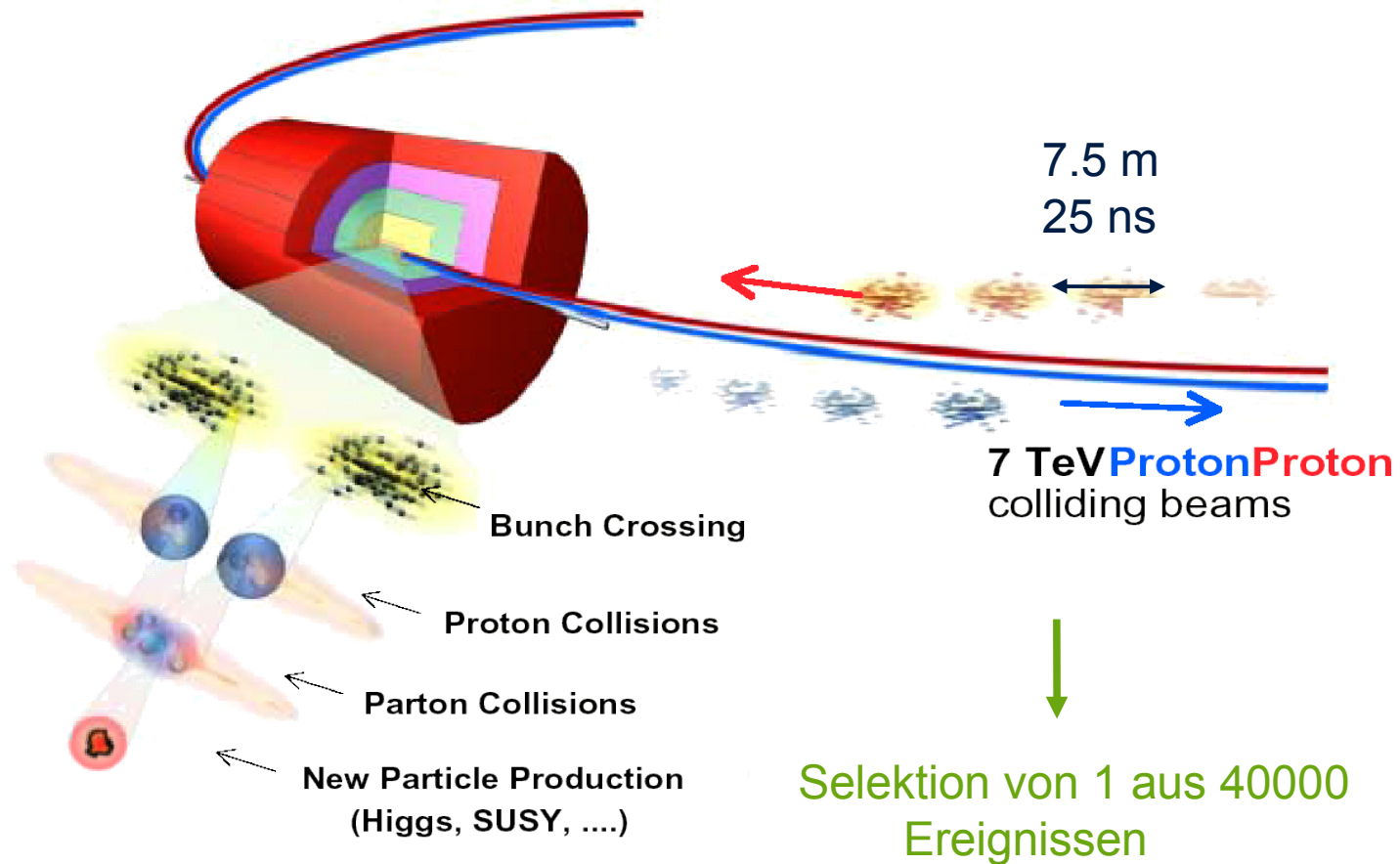
# Datennahme bei ATLAS

## Der ATLAS-Kontrollraum:

- Steuerung der Datennahme
- Bedienen der Detektoren
- Überwachung des Experiments
- 24-Stunden Schichtbetrieb
- Immer 6 Leute im Kontrollraum
- ca. 30 weitere Experten immer in Rufbereitschaft



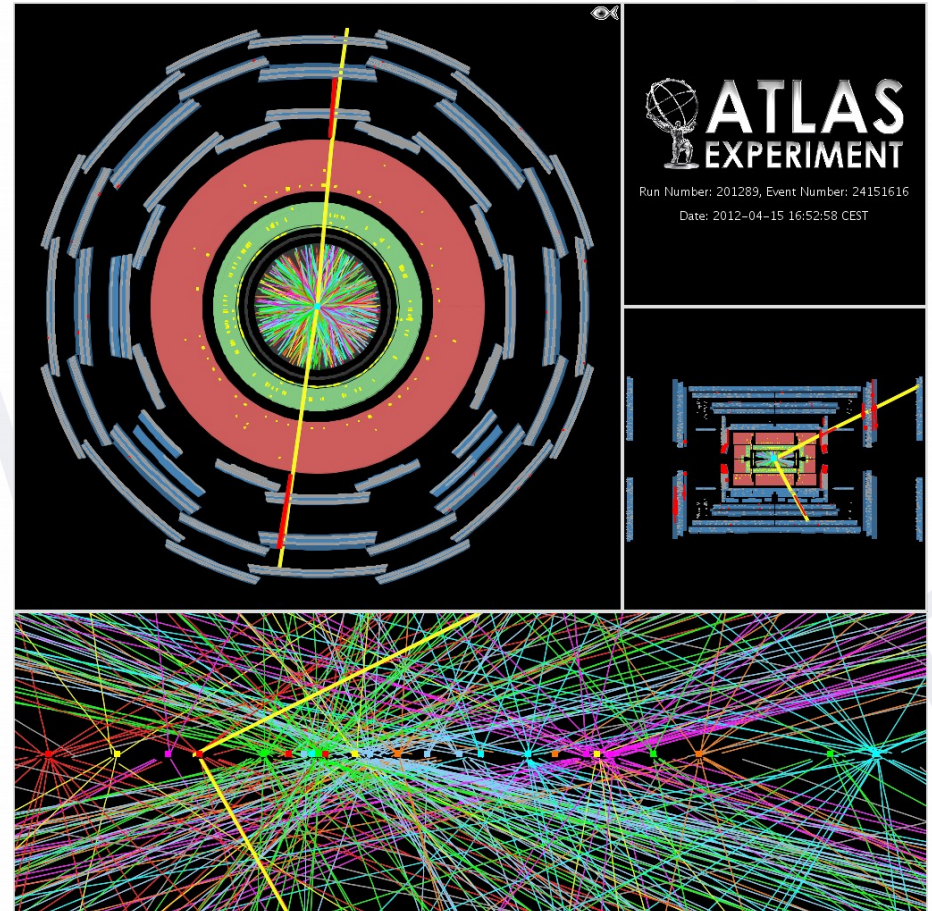
# Teilchenkollisionen bei LHC





# Proton-Proton Kollision im Detektor

Hohe Strahlintensität führt zur Überlagerung von vielen Ereignissen in einer Strahlkreuzung (bis zu 35)



# Das CERN-Rechenzentrum

Weltweit eines der  
größten Rechenzentren;  
Erfinder des WWW





# Weltweites Computing

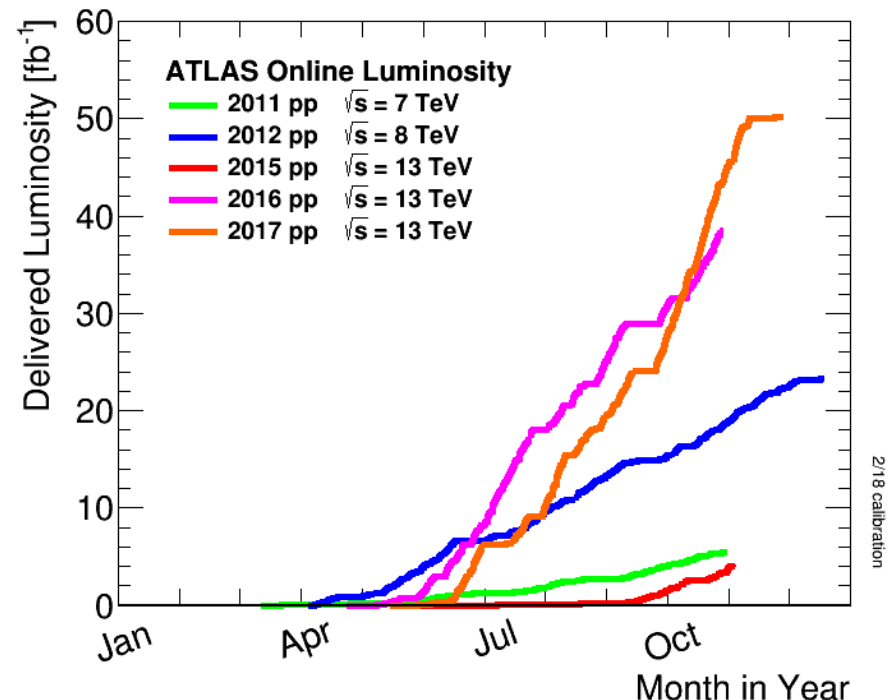




# Die Datennahme

# Datennahme

- sehr erfolgreiche Steigerung der Datennahme seit 2010
- Strahlintensitäten von höchster Qualität
- Schwerpunktsenergie wurde schrittweise von 7 TeV auf 13 TeV erhöht
- stetige Vergrößerung der Datenmenge sowie der Datennahme
- wesentliche Voraussetzung für das Entdeckungspotential
- Daten von höchster Qualität
- **Luminosität:**
  - “Leuchtstärke” des Beschleunigers
  - Maß für die Menge der Daten

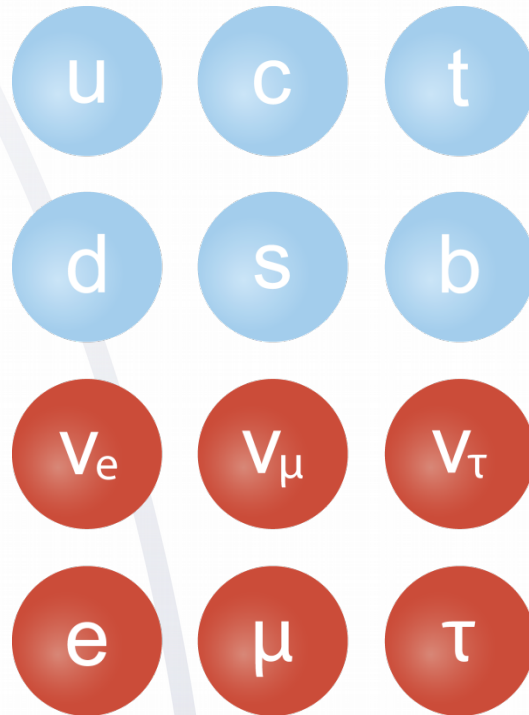


# Das Standardmodell

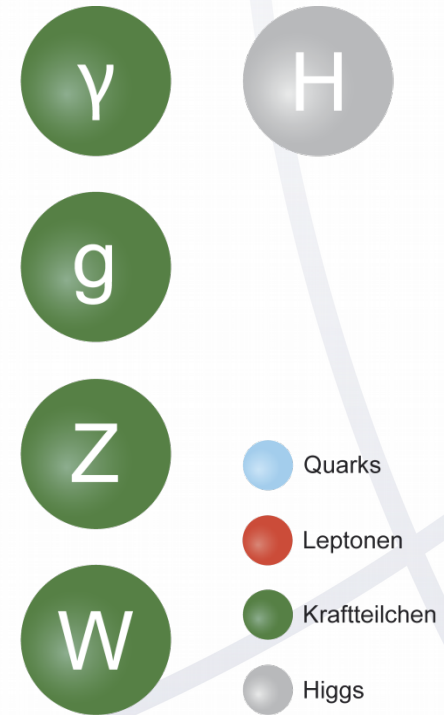
## Hauptaufgaben des LHC:

- Vermessung des Standard Modells
- Suche nach Abweichungen vom Standard Modell

### Materie (Fermionen)



### Bosonen



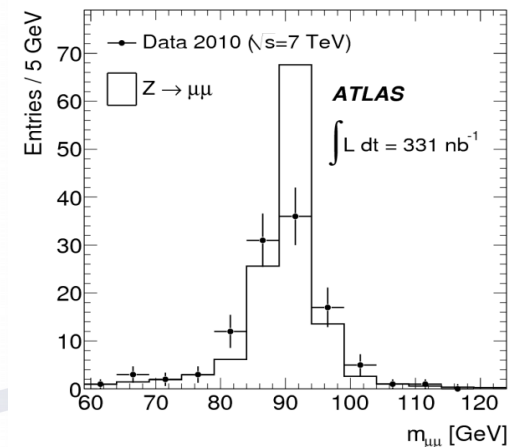
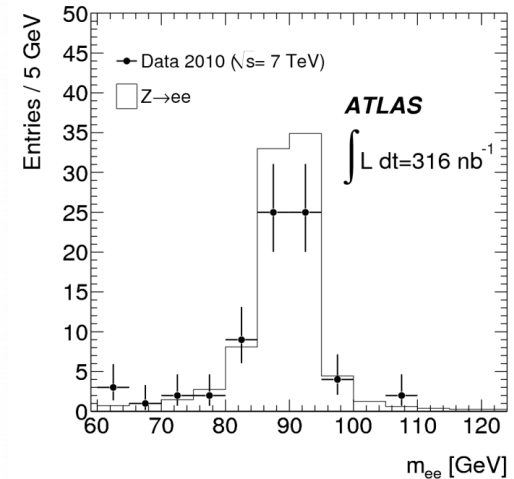
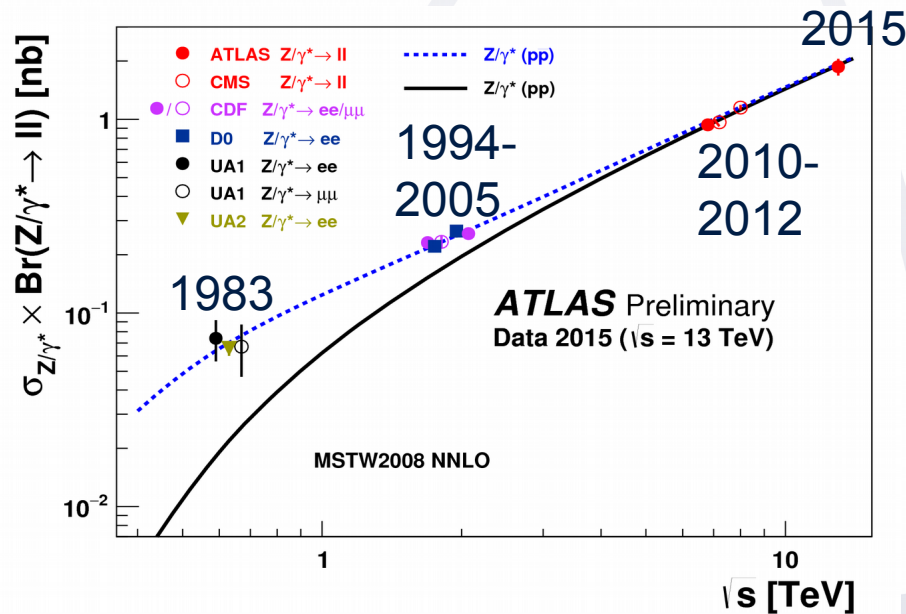
-  Quarks
-  Leptonen
-  Kraftteilchen
-  Higgs



# Vermessung des Z-Bosons

Bestimmung des Z-Boson Wirkungsquerschnitts

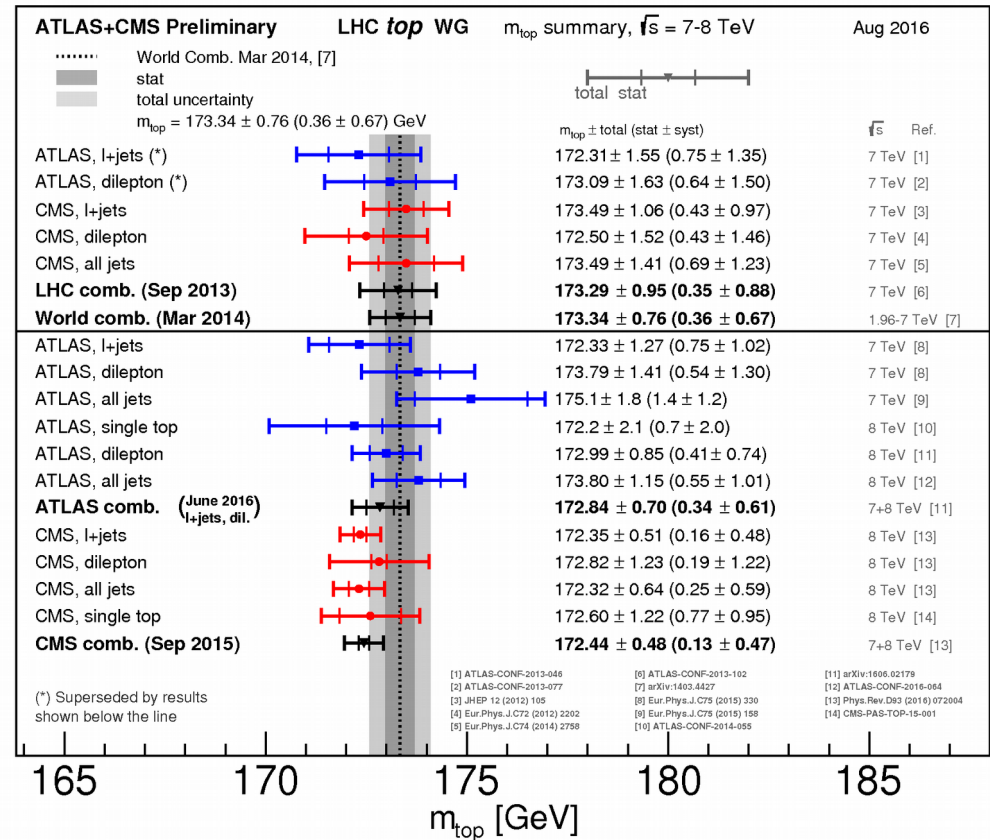
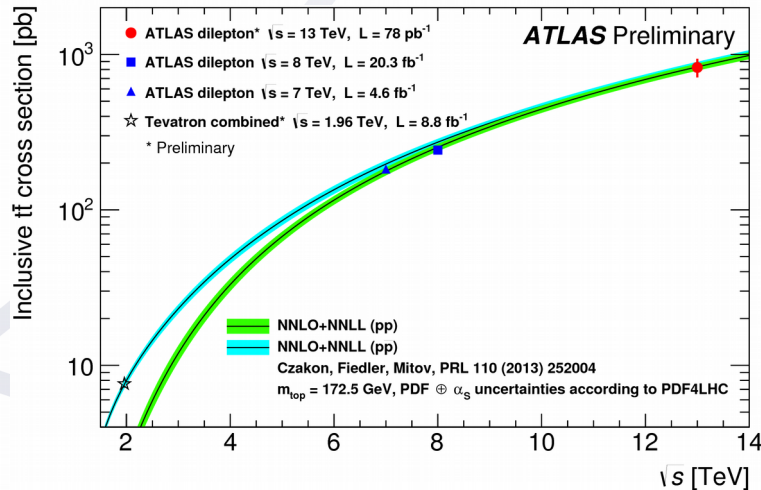
Bestätigung der theoretischen Vorhersage



# Vermessung des Top-Quarks

## Bestimmung der Top-Quark Masse

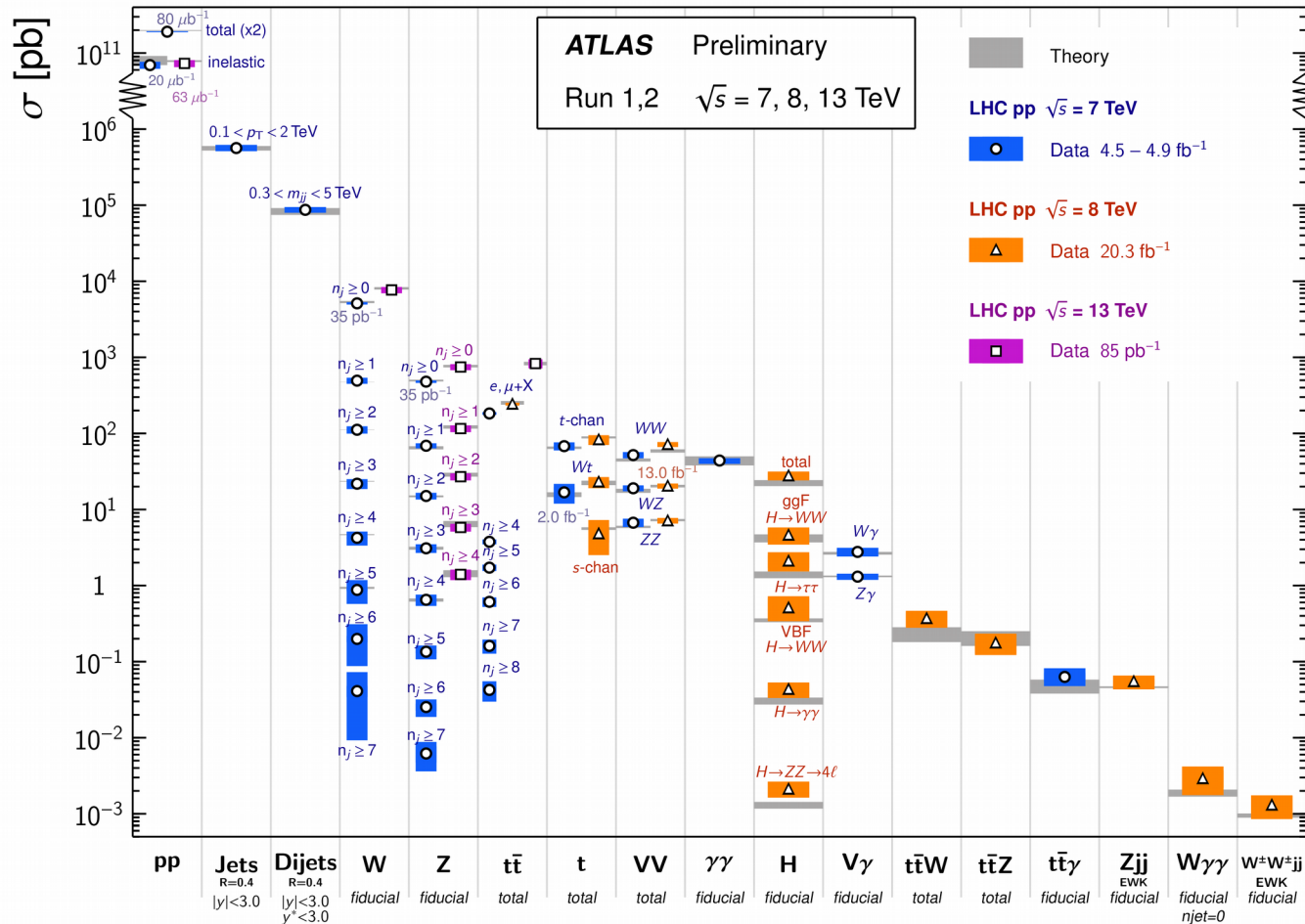
## Bestätigung der theoretischen Vorhersage des Produktionswirkungsquerschnitts



# Vermessung des Standardmodells

## Standard Model Production Cross Section Measurements

Status: Nov 2015





# Ausblick

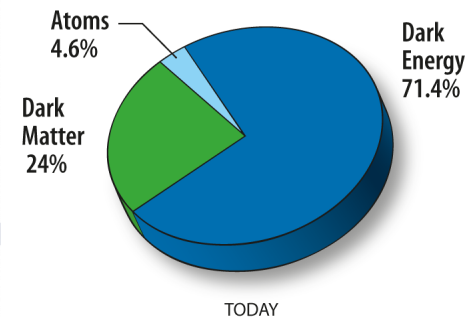
Daten von LHC von höchster Qualität, alle Erwartungen übertroffen

## Wesentliche Resultate:

- Messung des SM Higgs Bosons bei 125 GeV
- Standardmodell exzellent bestätigt in vielen Aspekten
  - Bis jetzt noch keine Anzeichen für Physik jenseits des Standard Modells

## Ziele/offene Fragen in der Zukunft:

- Datennahme bei 13 TeV 2015: Lernjahr
- 2016: großer Datensatz, Auswertung läuft
- Vermessung der Eigenschaften des Higgs-Bosons
- Suche nach neuer Physik jenseits des Erwarteten, zum Beispiel Kandidat für dunkle Materie ?



# Der Versuch

Run Number: 155112, Event Number: 98844660  
Date: 2010-05-16 05:47:06 CEST

