

INTERNATIONAL MASTERCLASSES HANDS ON PARTICLE PHYSICS

Thorsten Kuhl, DESY

Ullrich Schwanke, Humboldt Universität, Berlin

Adelheid Sommer, DESY

CERN Masterclasses
HU Berlin
26. Februar 2018



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](#)

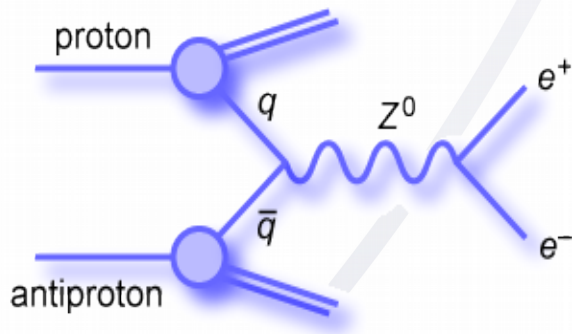
- Organisation, Vorstellung Netzwerk Teilchenphysik

Betreuer der Praktischen Übung:

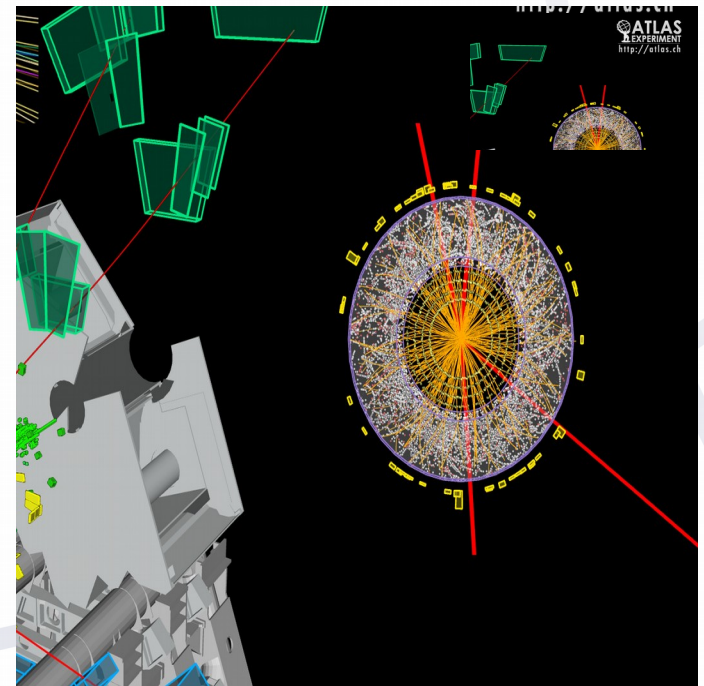
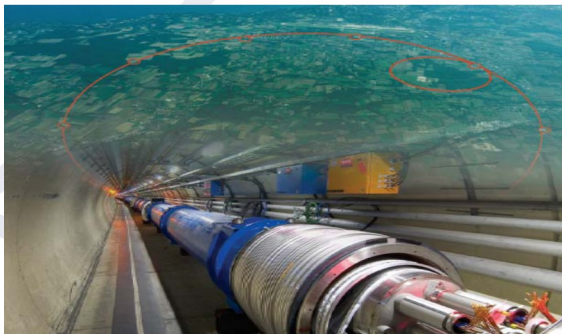
- Studenten der Humboldt Universität

Einführung in die Teilchenphysik

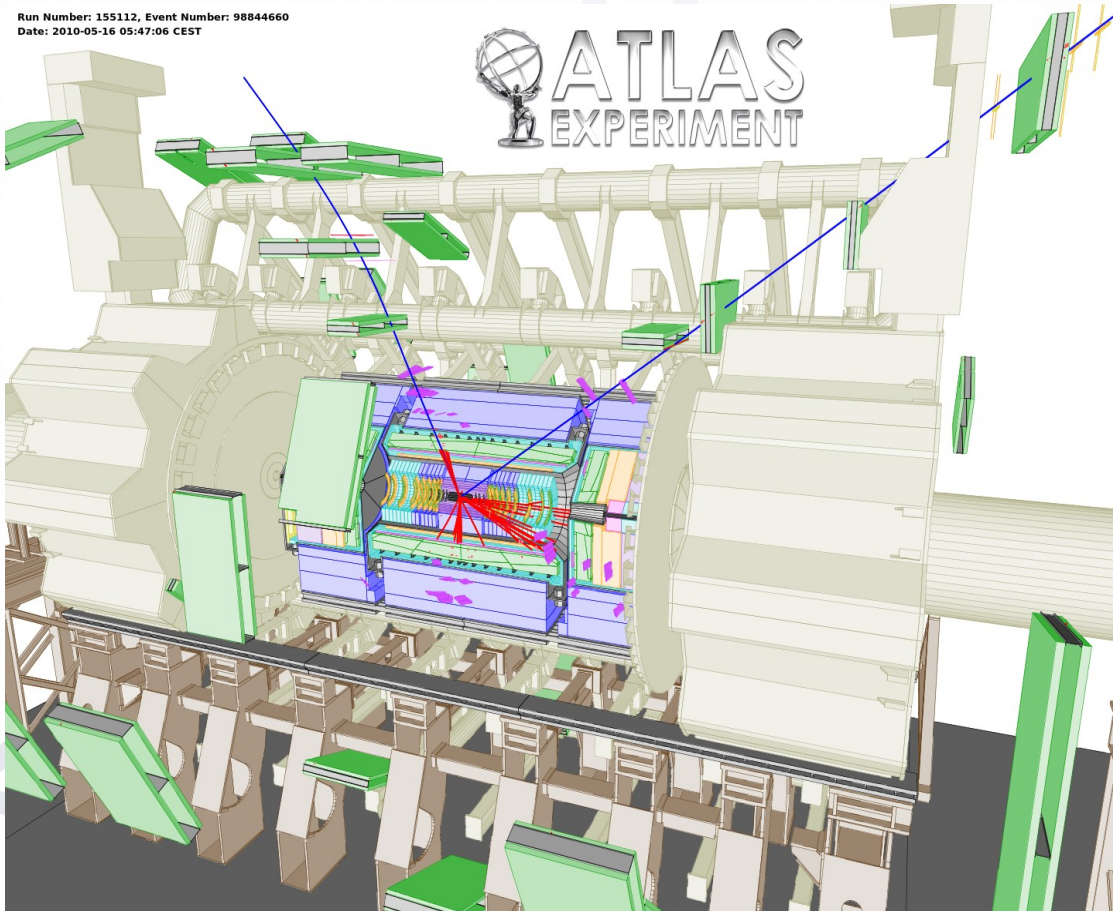
LHC-Beschleuniger & ATLAS-Experiment



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



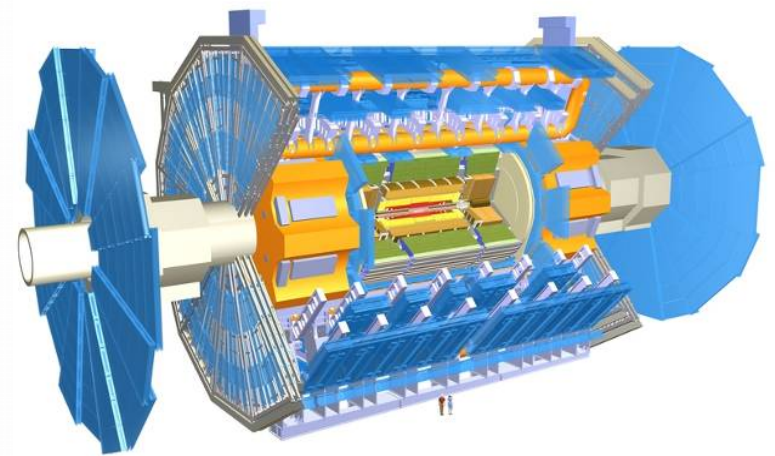
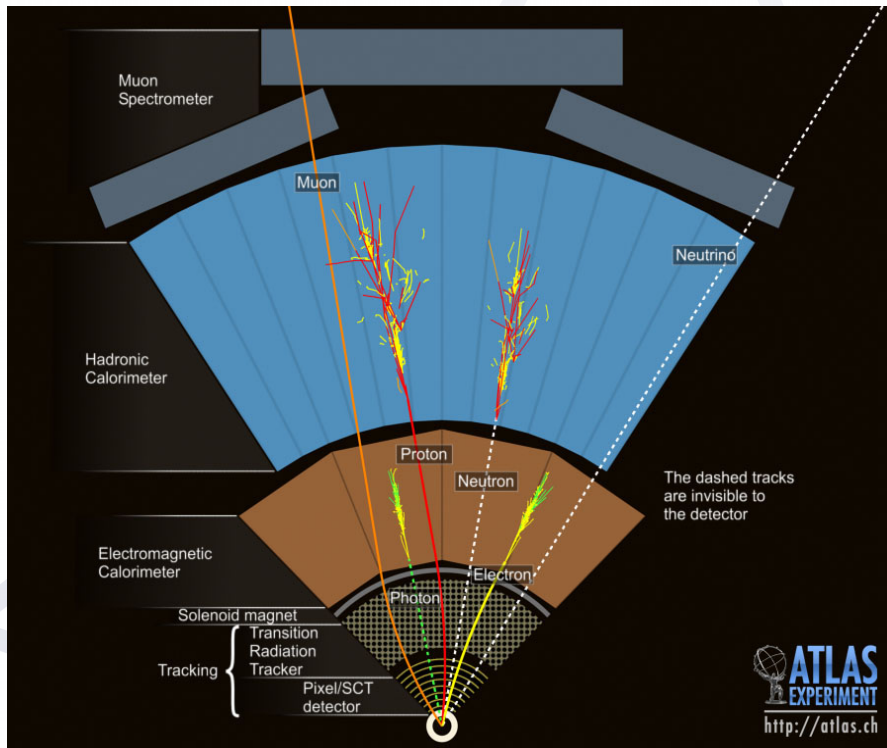
Was wollen wir heute verstehen?



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

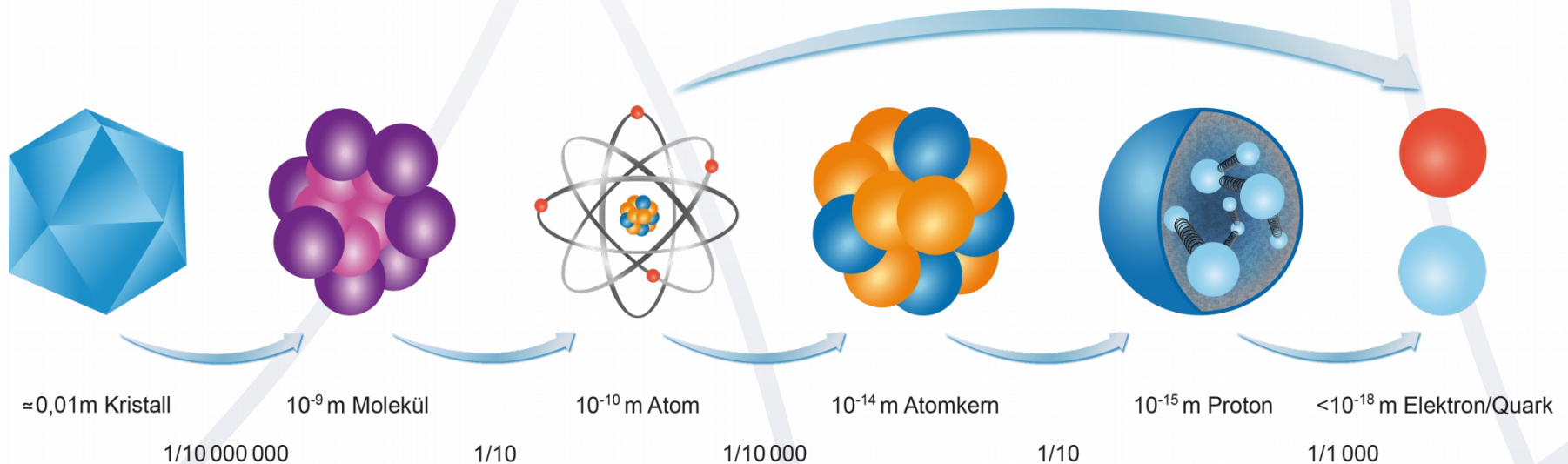
Status der Vermessung des Standardmodells



Einführung in die Teilchenphysik



Aufbau der Materie

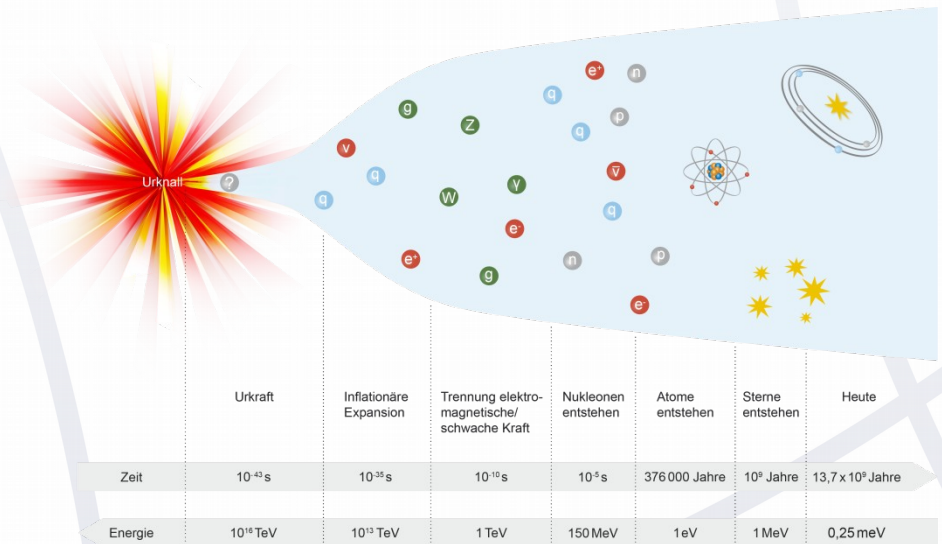
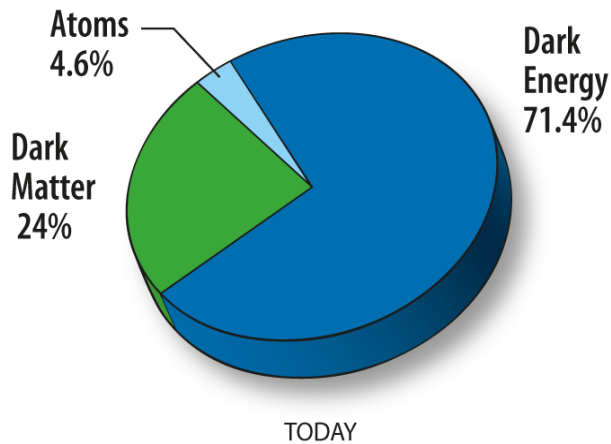


Stecknadelkopf:
 $10^{-3}\text{m} = 0,001\text{m}$

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

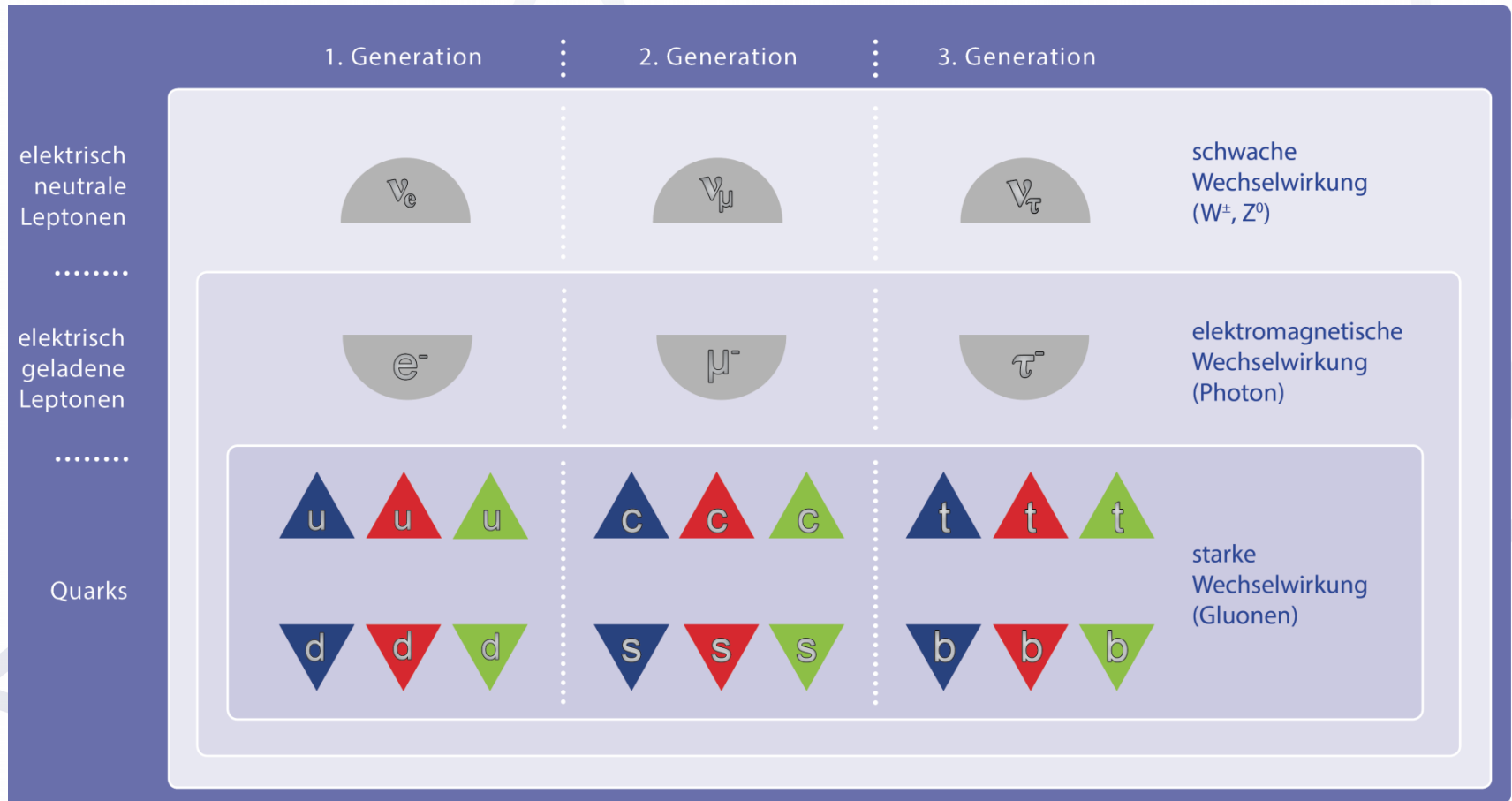
- im “kontrollierten” Experiment (Beschleuniger), Energie limitiert auf das technisch Mögliche

Astroteilchenphysik

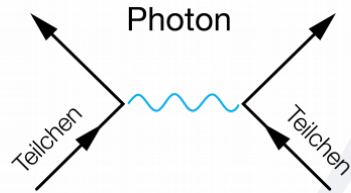
Beschreibung kosmologischer Quellen/Beschleuniger von Elementarteilchen

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

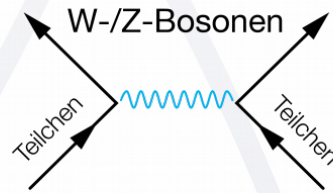
Bausteine der Materie: Elementarteilchen



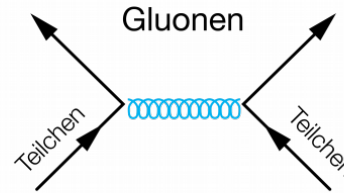
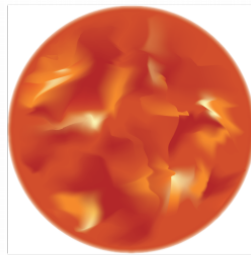
Die vier Grundkräfte – Austauschteilchen



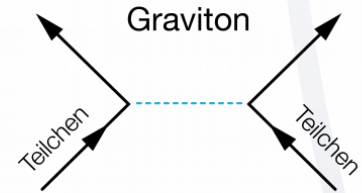
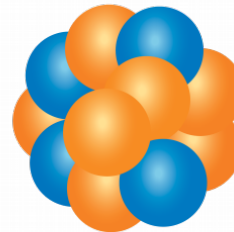
Elektromagnetische Kraft



Schwache Kraft



Starke Kraft

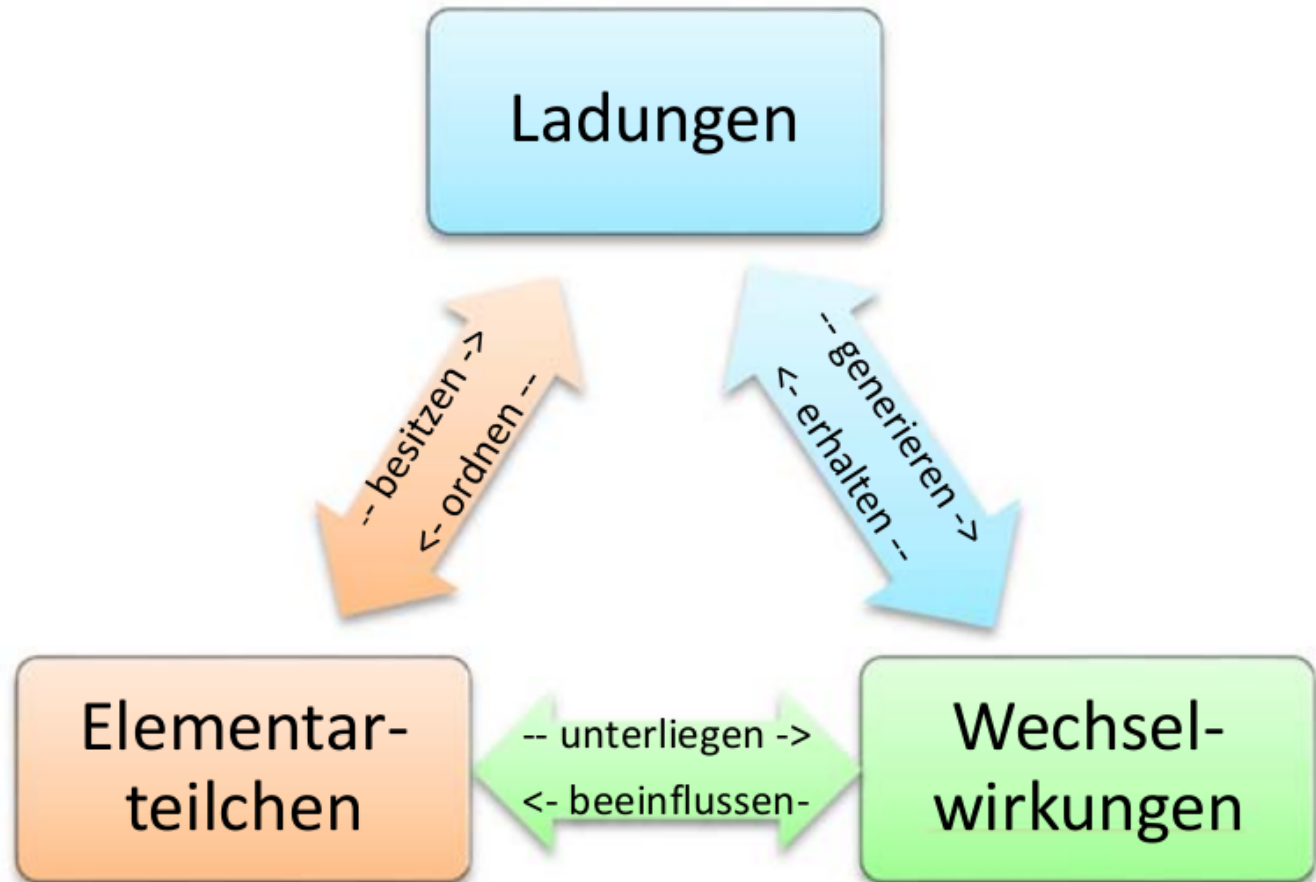


Schwerkraft

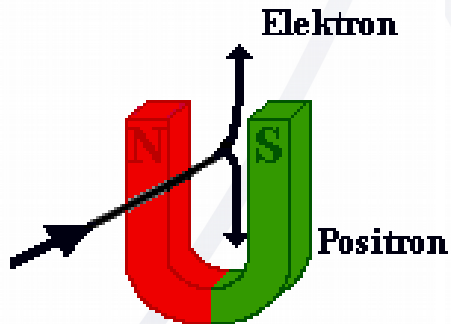


Wechselwirkungen von Elementarteilchen über Austausch von Wechselwirkungsteilchen (**Botenteilchen**)

Konzept des Standardmodells



Elektromagnetische Kraft

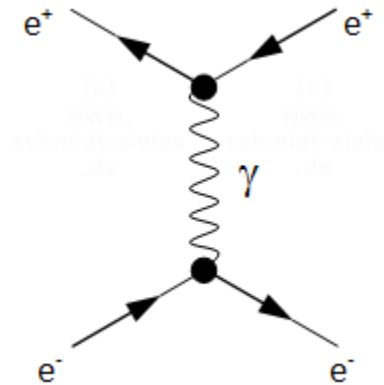
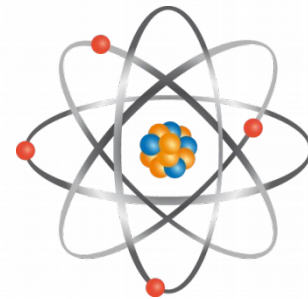


bekannteste aller Kräfte:

elektrische und magnetische Phänomene

Verantwortlich u.a. für:

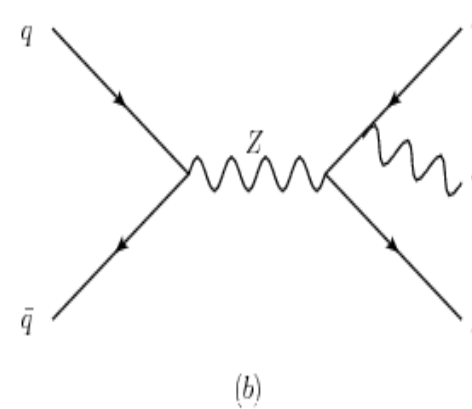
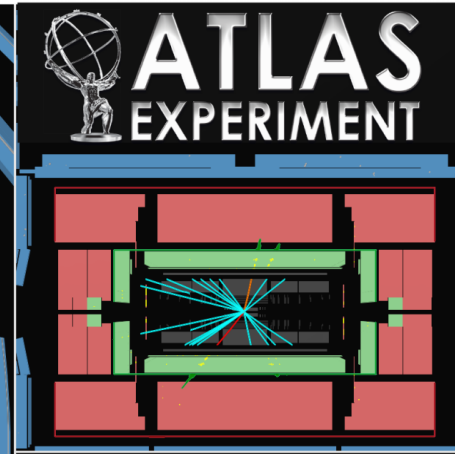
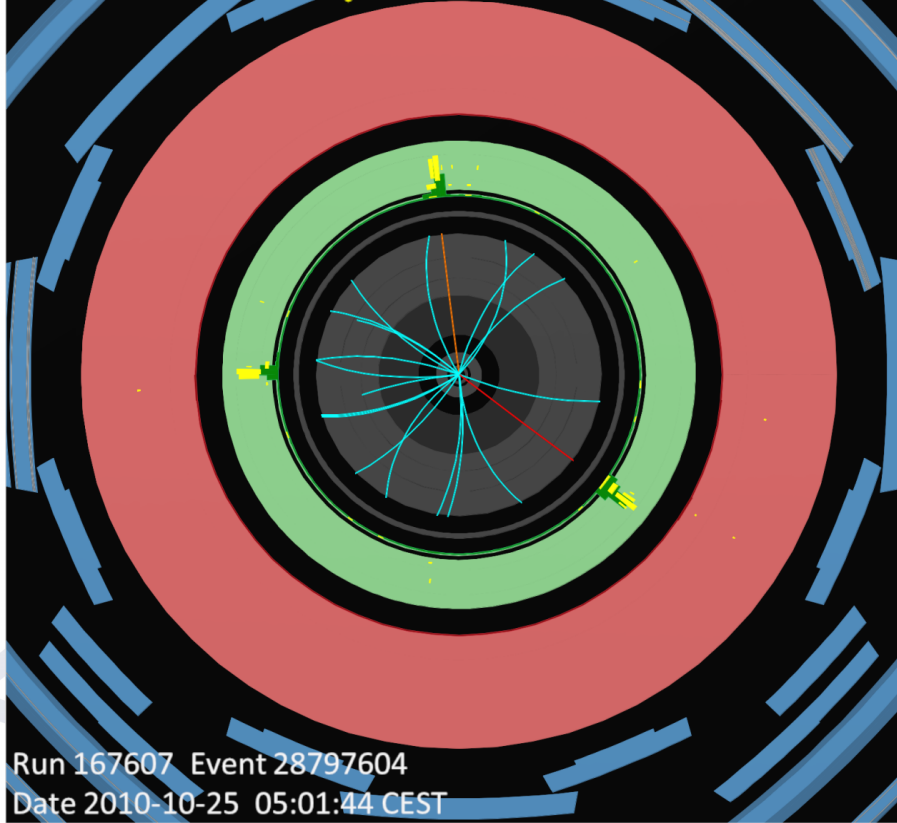
- Elektrizität
- Zusammenhalt der Atome und Moleküle
- elektromagnetische Wellen



→ Zeit

EM-Wechselwirkung im ATLAS-Detektor

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



Starke Kraft

Beobachtung: Quarks treten nur im Verbund auf:

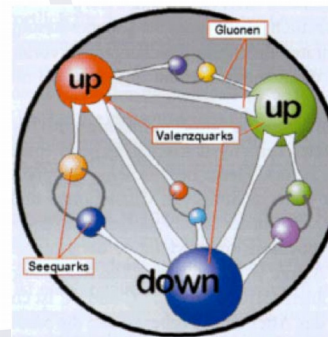
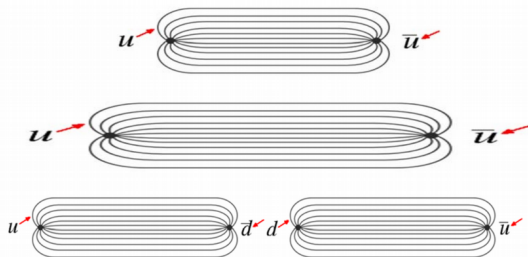
- Proton $|uud\rangle$; Neutron $|udd\rangle$

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

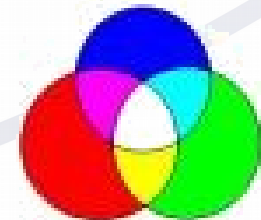
Folge (Eigenschaften der starken Wechselwirkung):

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

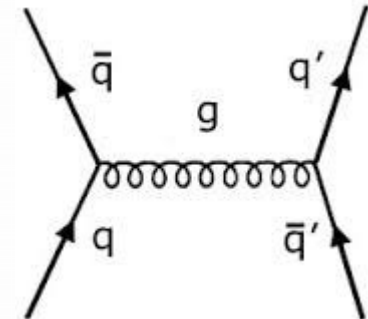
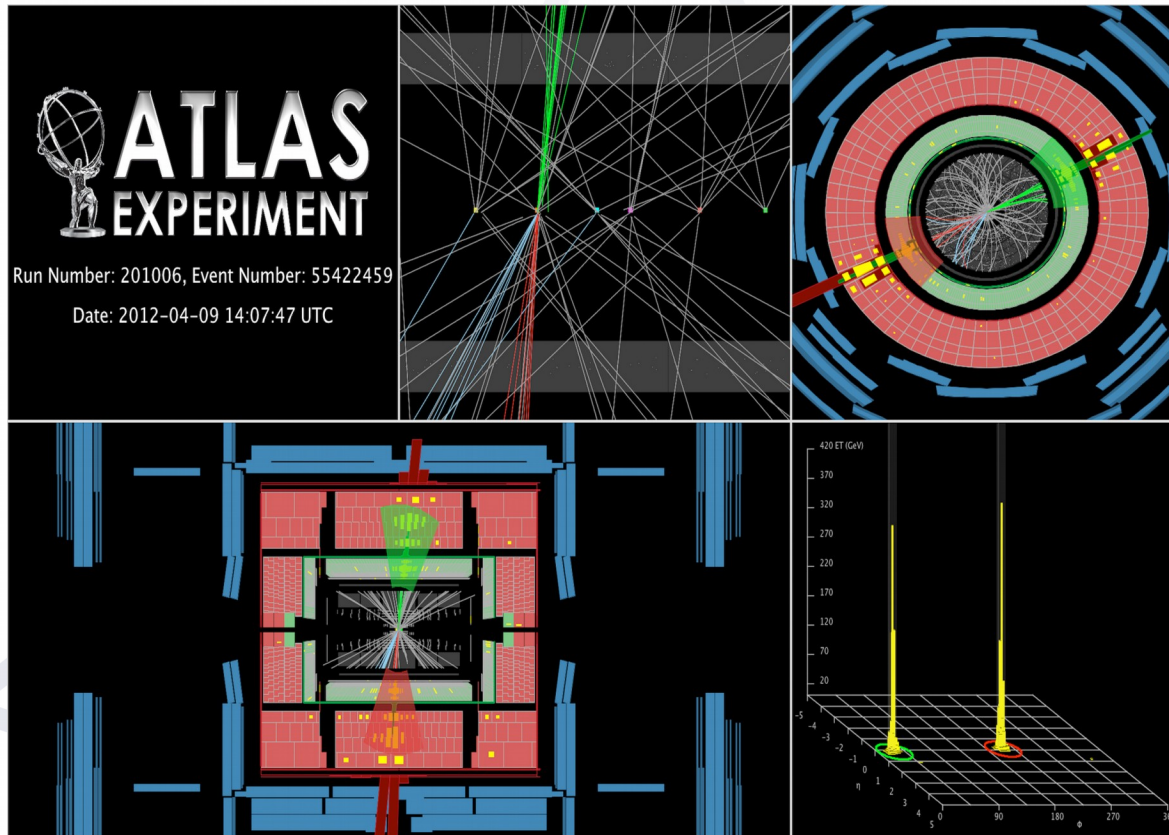
c) siehe folgende Abbildungen



rot, grün, blau



Starke Wechselwirkung: Jets

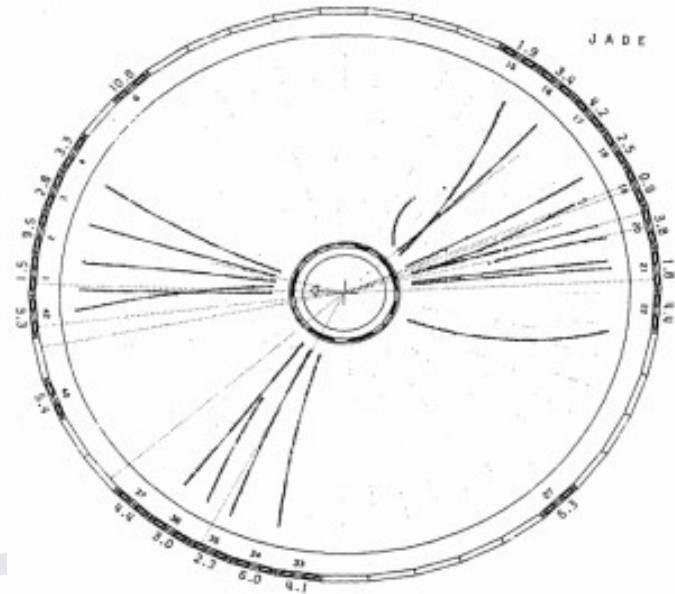
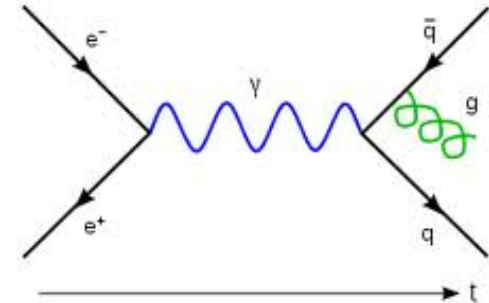


Entdeckung des Gluons: 3 Jets

Entdeckung des Gluons:

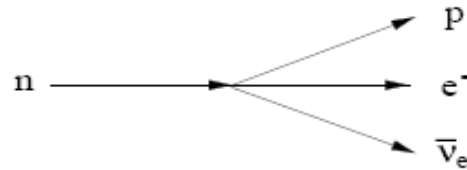
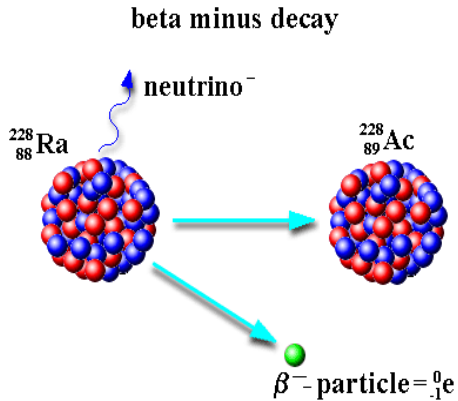
Ereignisse mit 3 Jets!

Nur erklärbar, durch
die Anwesenheit des Gluons



Schwache Kraft

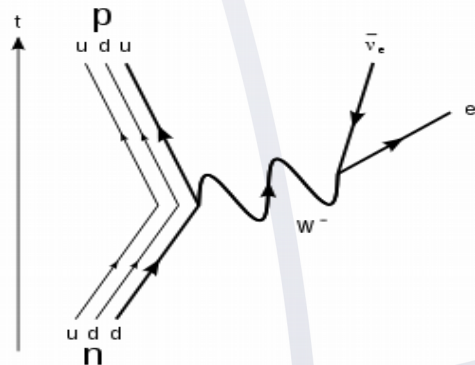
nuklearer β -Zerfall beruht auf dem Neutronenzerfall: $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}$



Niederenergetische Sicht
(Kernphysik)

Quark-Niveau:

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

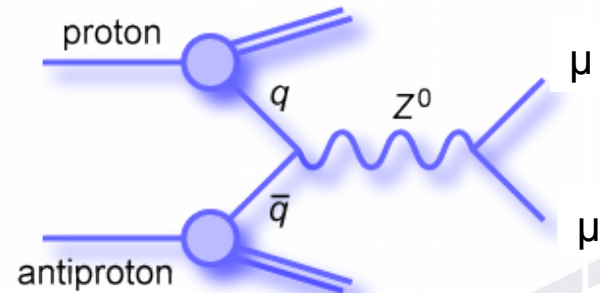
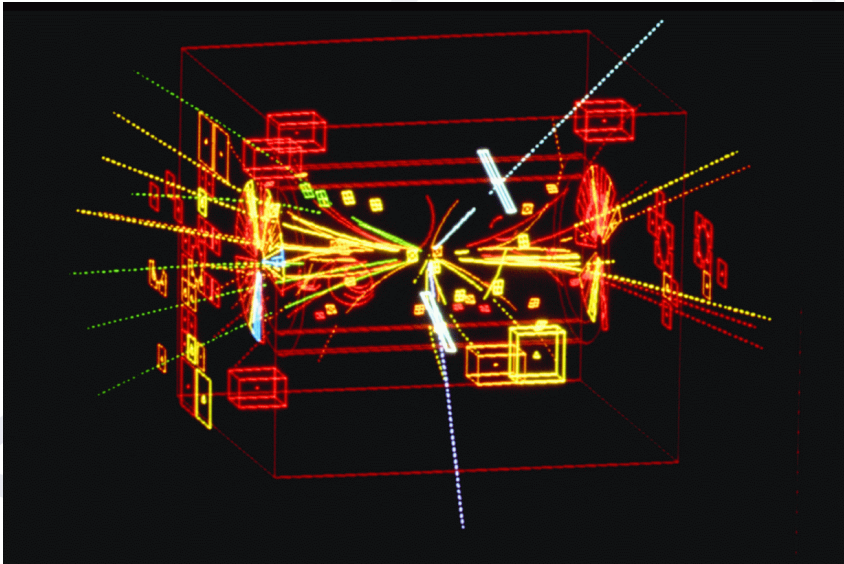


Sicht der Teilchenphysik

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

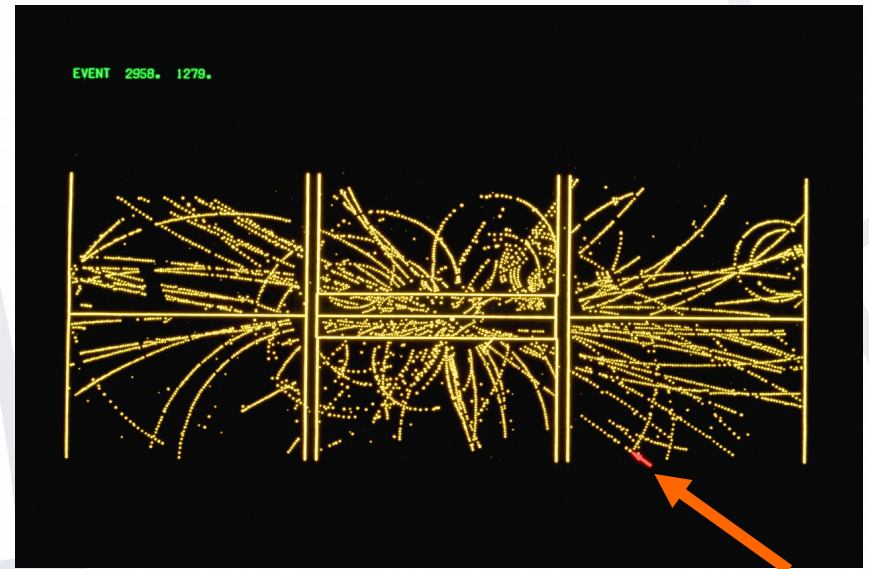
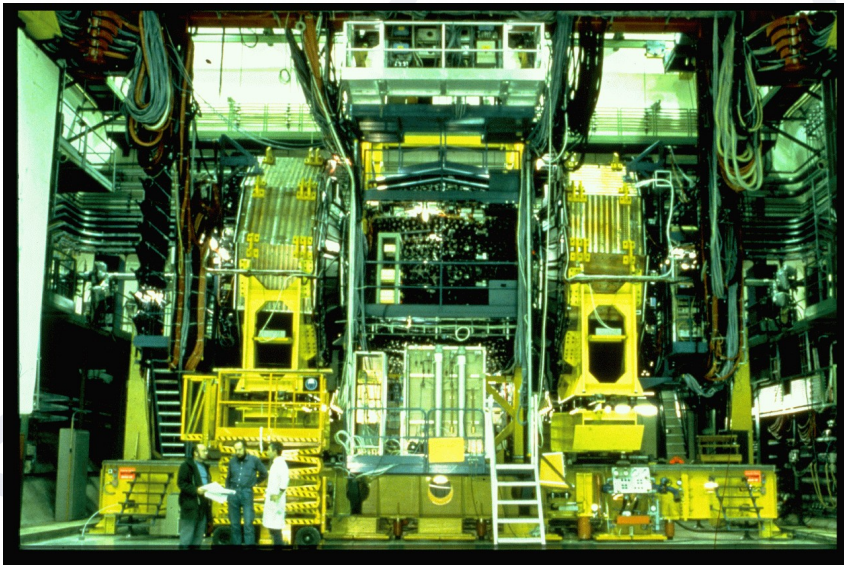
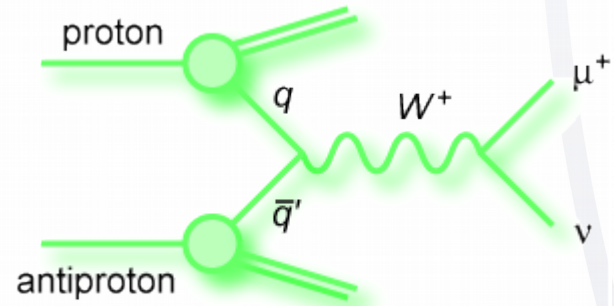
Entdeckung des Z-Bosons

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

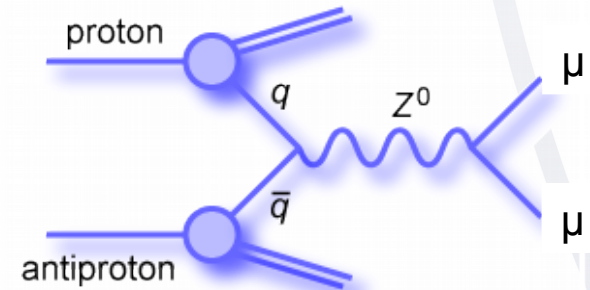
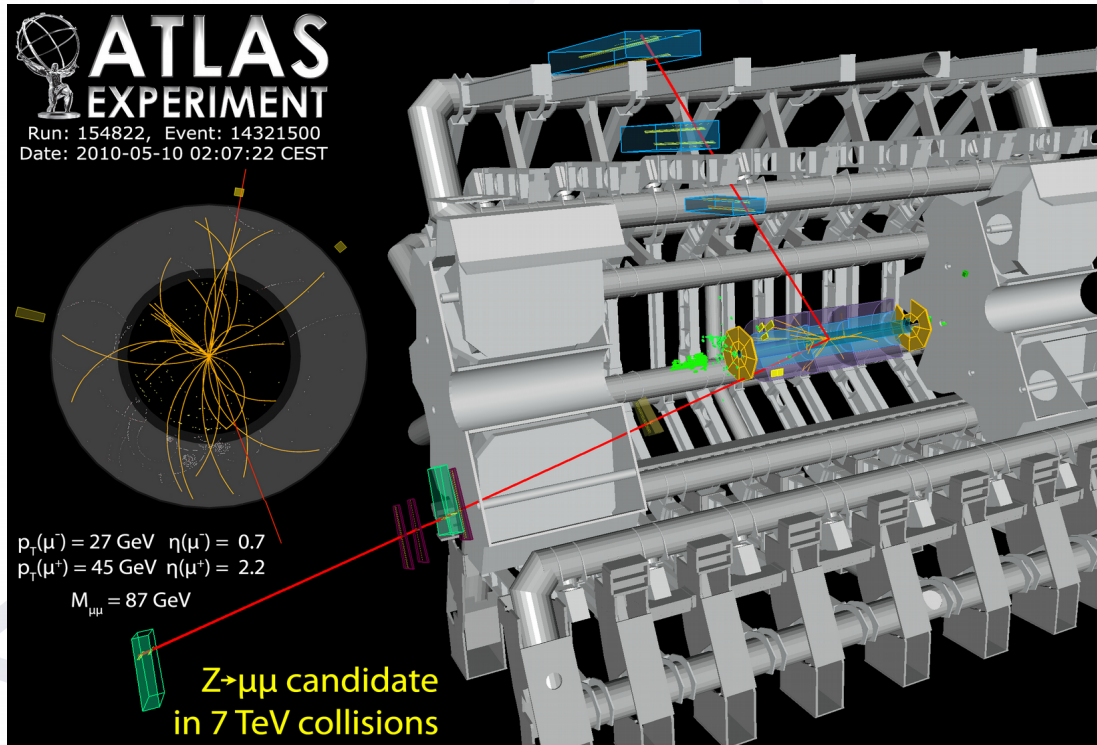


Entdeckung des W-Bosons

Experiment UA1 und UA2 am CERN



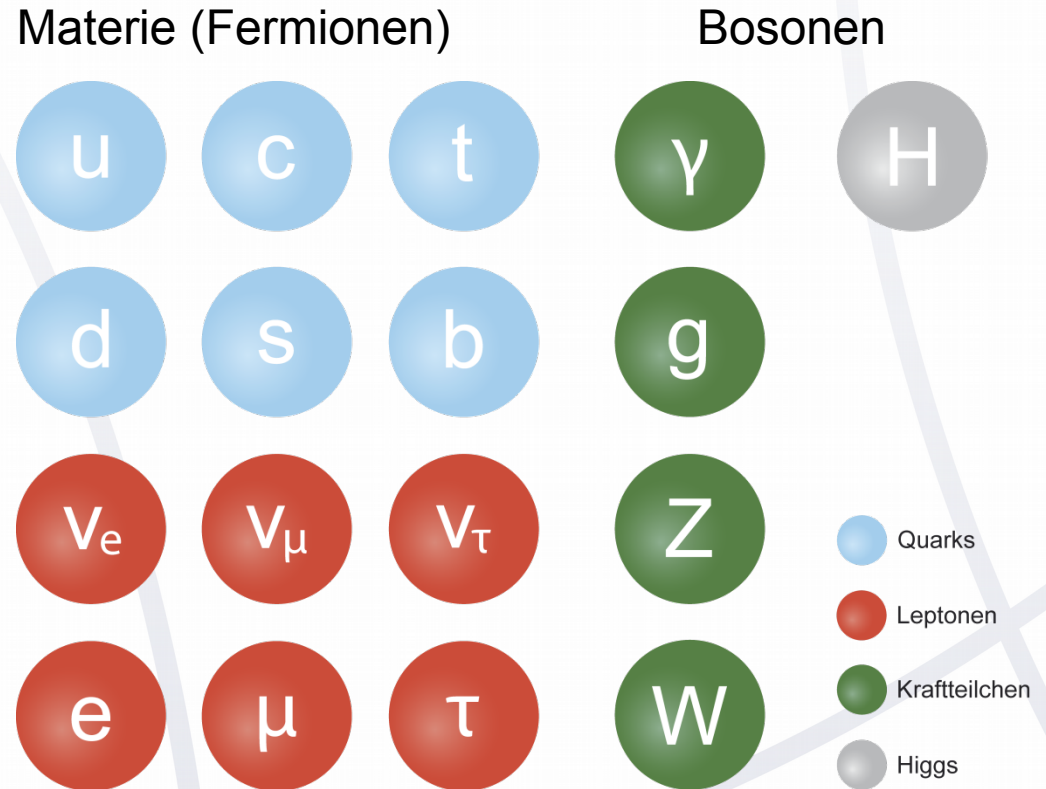
Z-Bosonen am LHC



Das Standardmodell

Letzte Entdeckungen:

- Top Quark
- Higgs-Boson



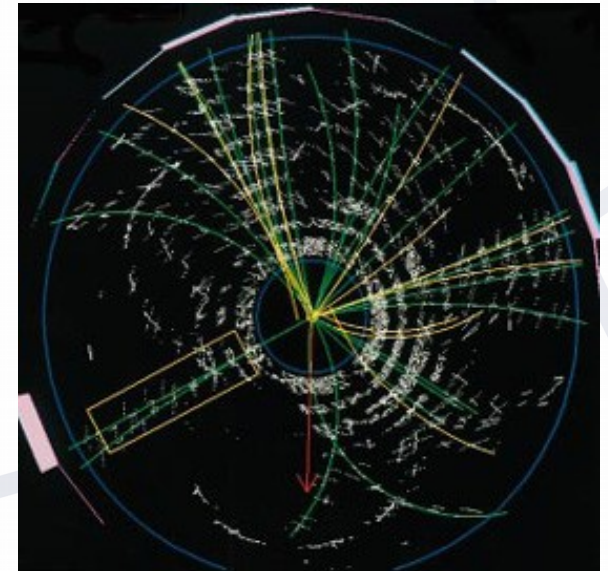
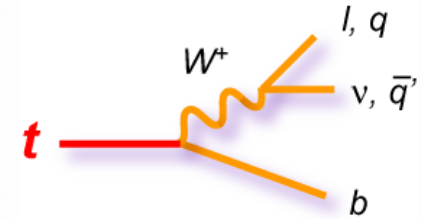
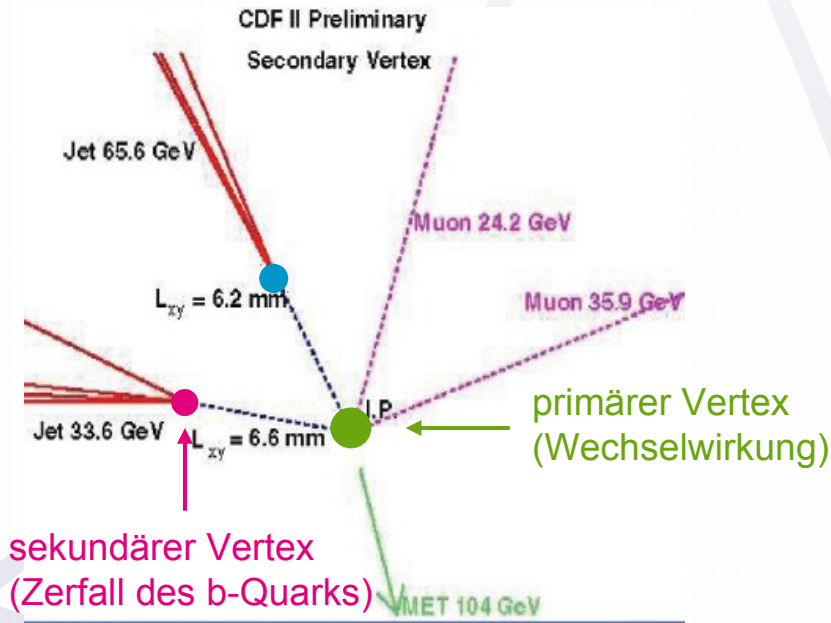
Entdeckung des Top-Quarks (Fermilab, 1995)

Produktion: Paarweise über starke Ww.

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

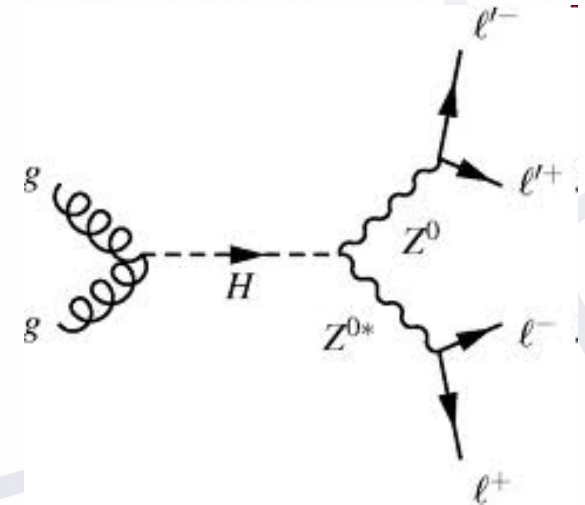
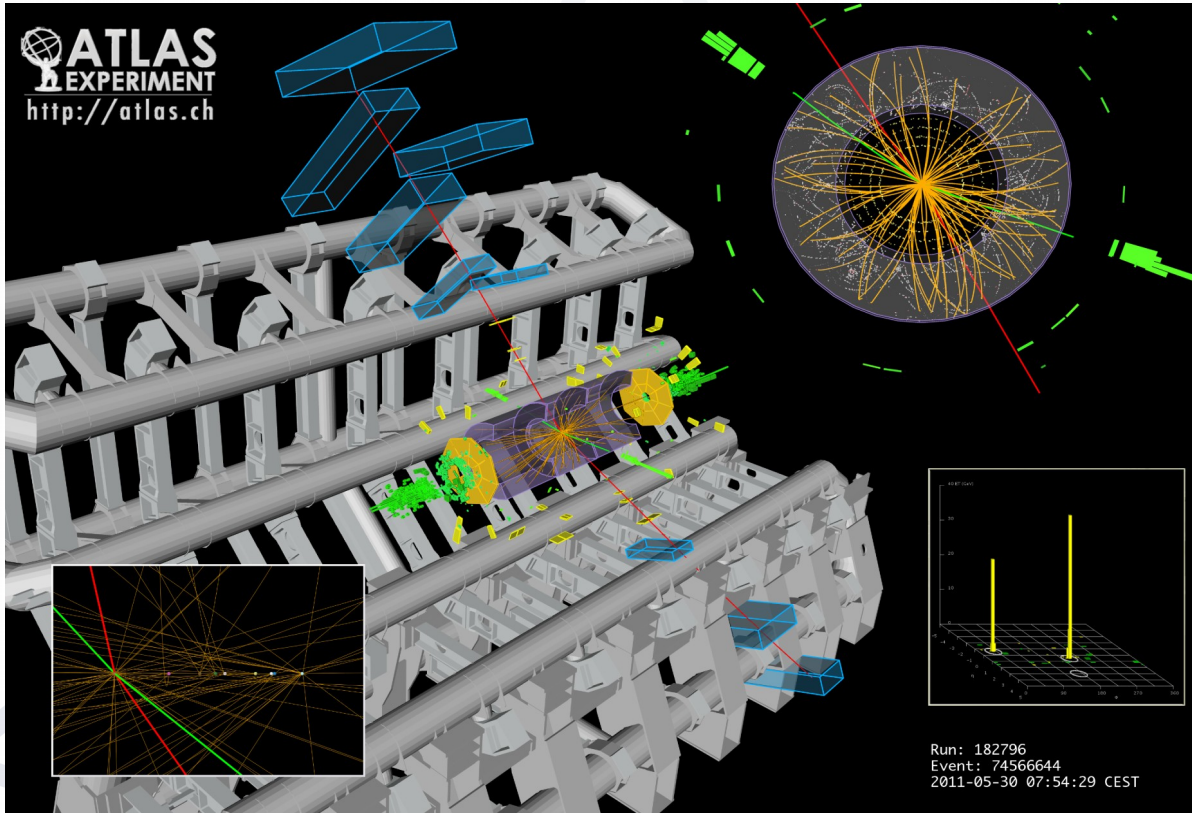
ν : vermisste Energie

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



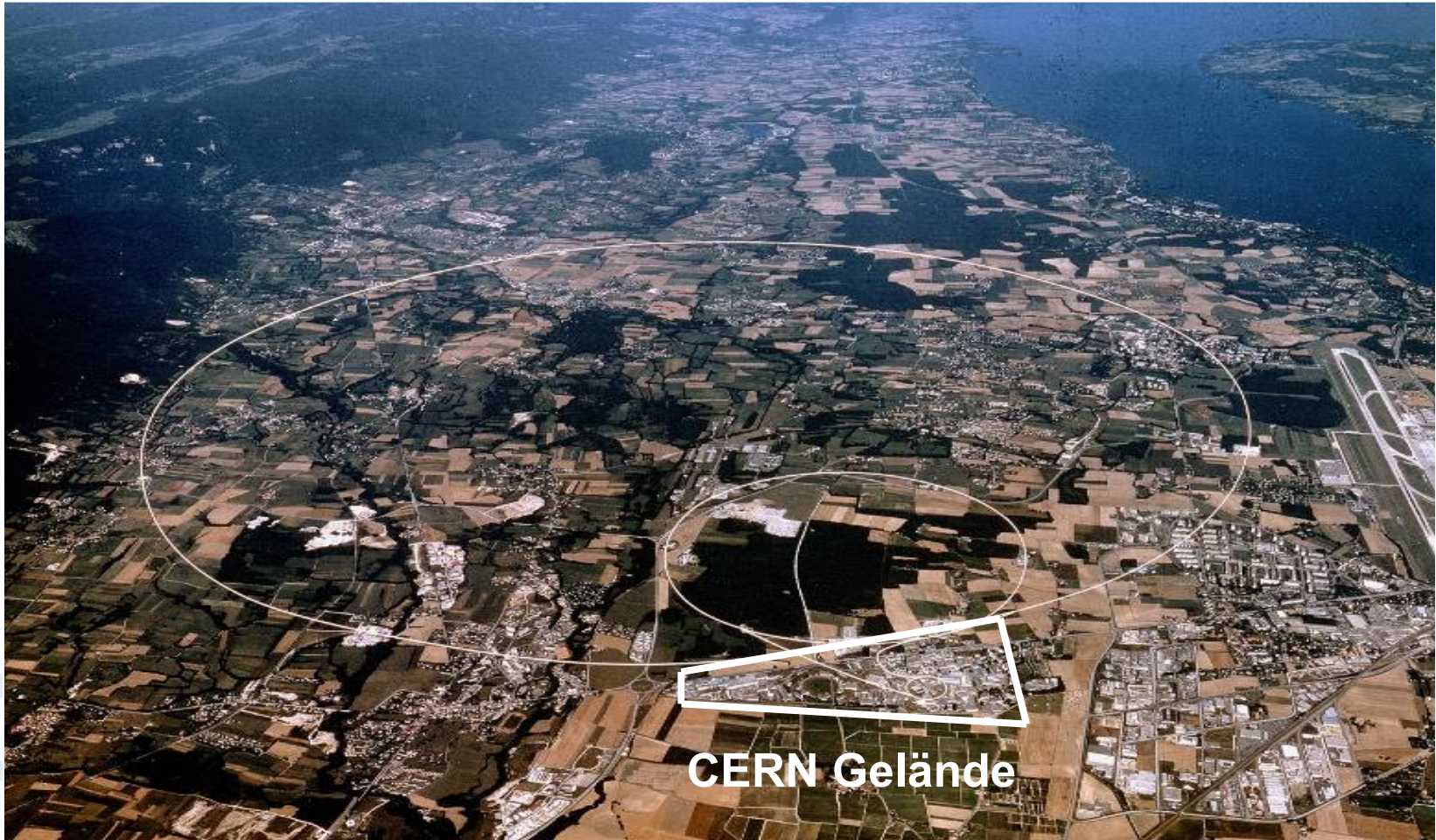
Das CERN

Conseil
Européen pour la
Recherche
Nucléair



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

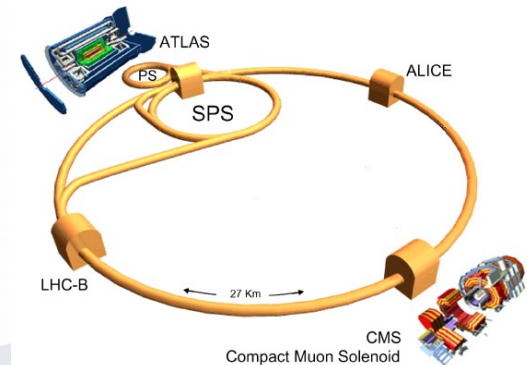
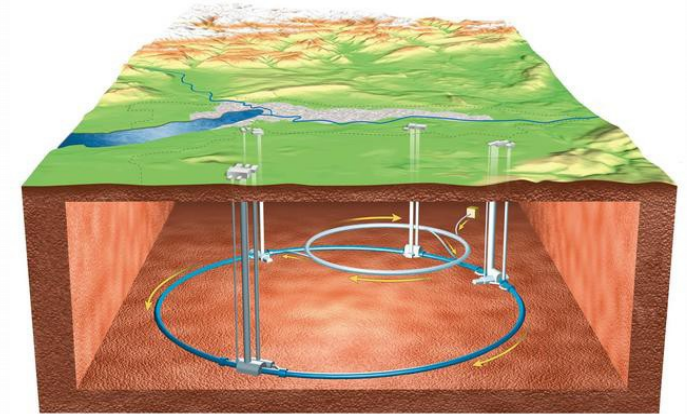


Der Beschleuniger LHC

Ringtunnel mit Umfang von 27 km

in 50–175 m Tiefe in Genf

Warum ist der LHC rund und so groß?



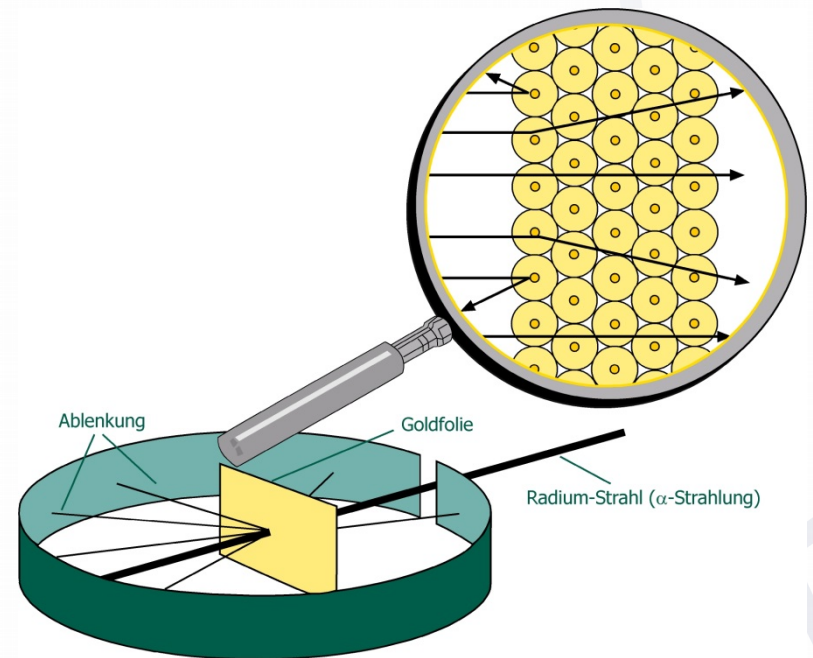
Streuversuche: Unsichtbares sichtbar machen

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



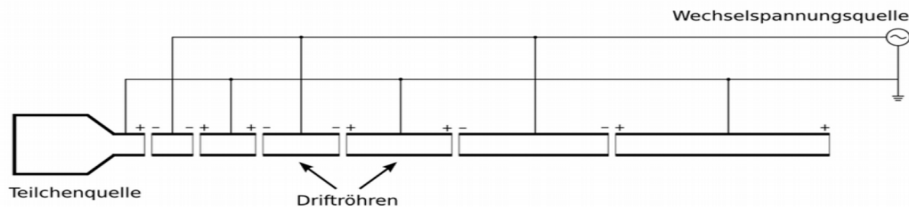
Teilchenbeschleuniger

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

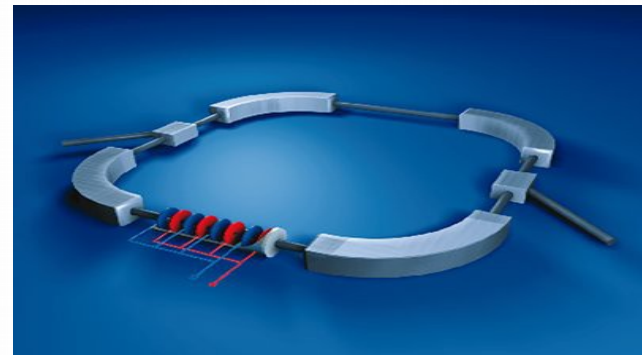
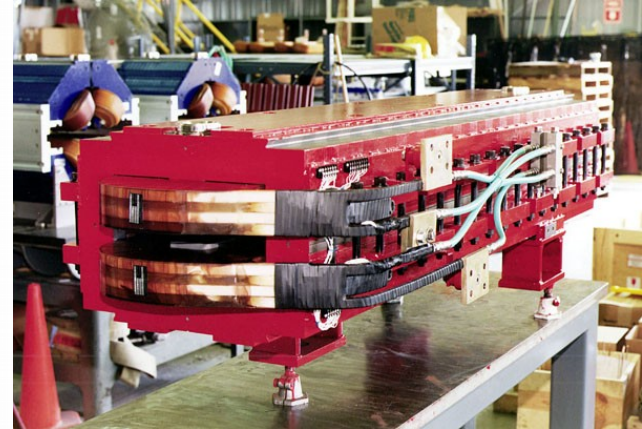
- Ringbeschleuniger

Krümmung der Teilchenstrahlen durch geeignete Ablenkmagnete

- Dipolmagnete

Magnetfeldstärke muss synchron mit der Energie der Teilchenstrahlen ansteigen

- Synchrotron



Vom Beschleuniger zum Collider

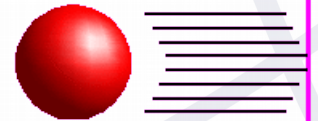
Ein Beschleuniger lenkt einen Strahl
vom beschleunigten Teilchen auf
ein festes Ziel



Collider:

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

- größere Energien werden erreicht

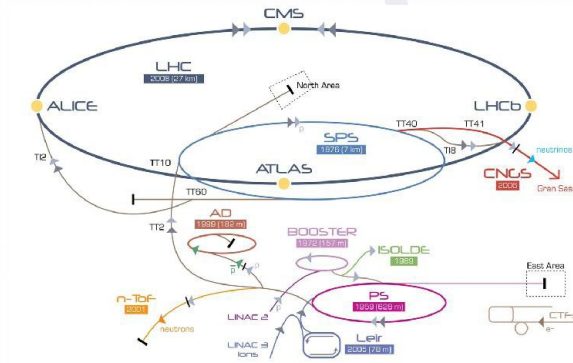


Beschleuniger-Systeme am CERN

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

Beschleunigungsabfolge:

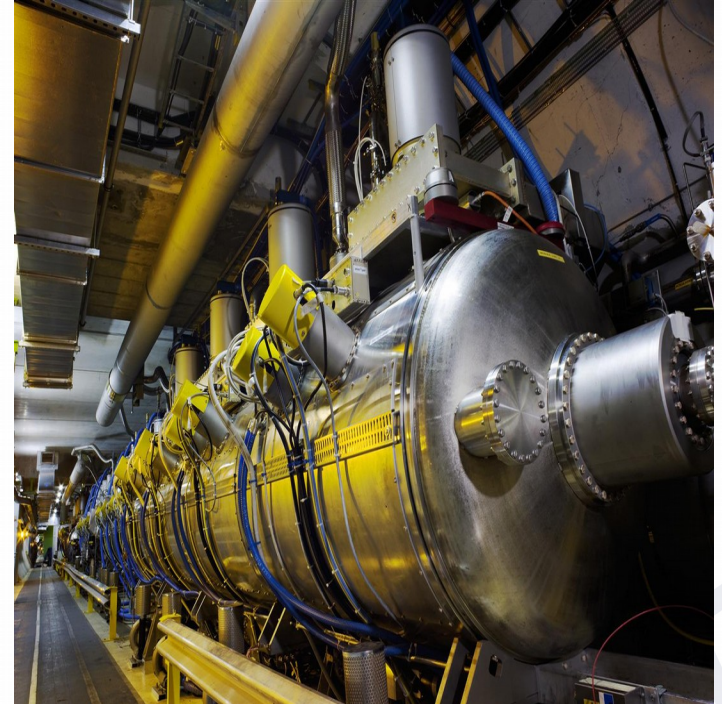
1. Protonenquelle (Flasche)
2. LINAC2: 50 MeV
3. PSB: 1,4 GeV
4. PS: 28 GeV
5. SPS: 400 GeV
6. LHC: 6,5 TeV



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:

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

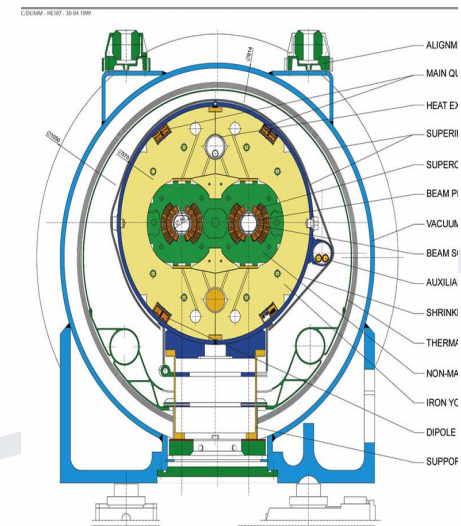
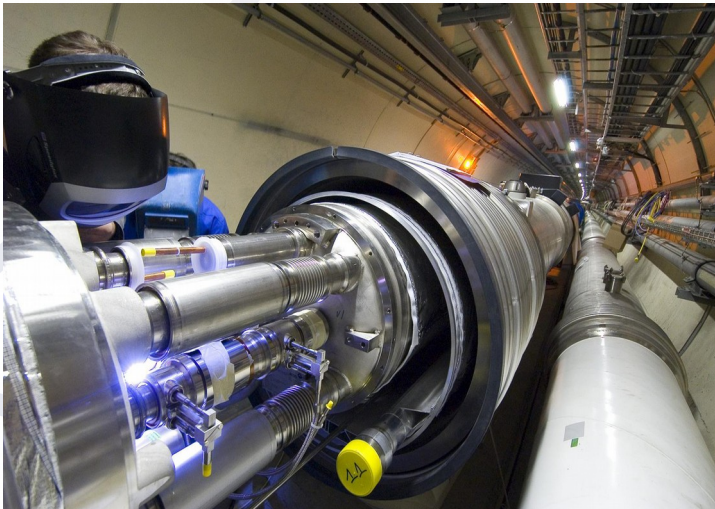
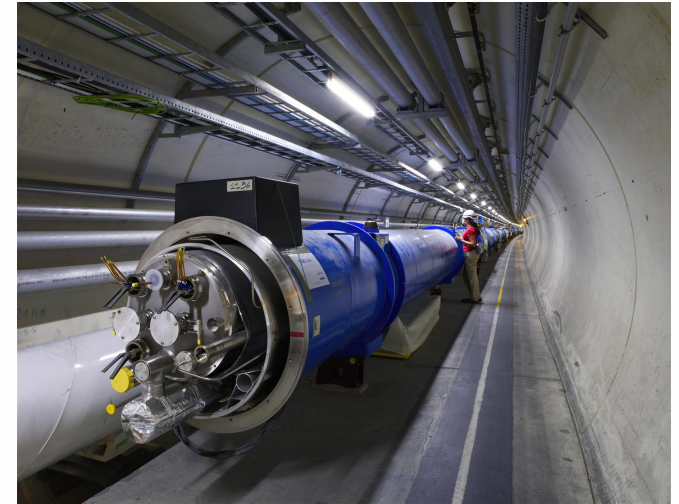
Temperatur: $1,9 \text{ K}$

Strom: 11700 A

Kühlung: superfluides Helium

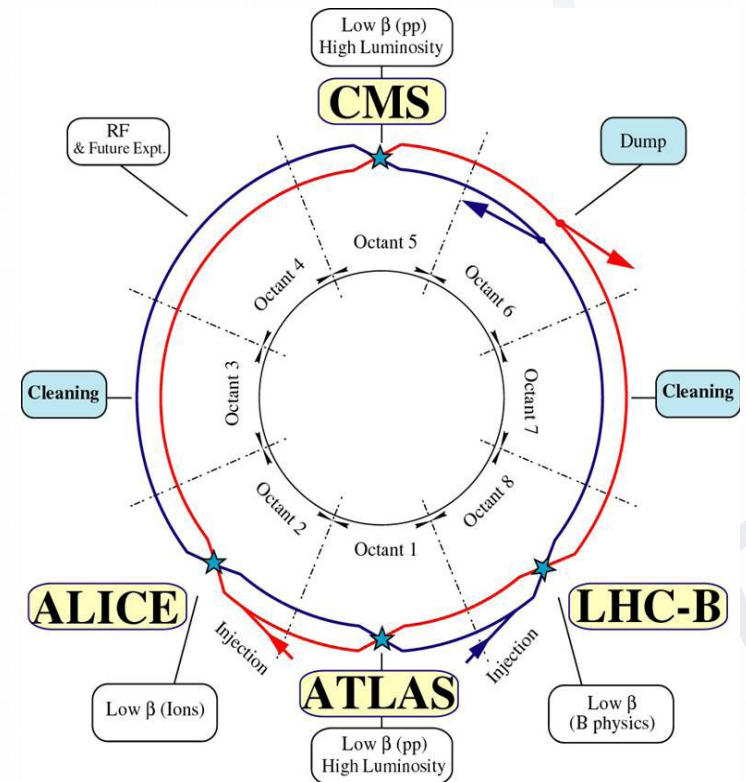
1232 Ablenkmagnete (Strahlführung)

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)

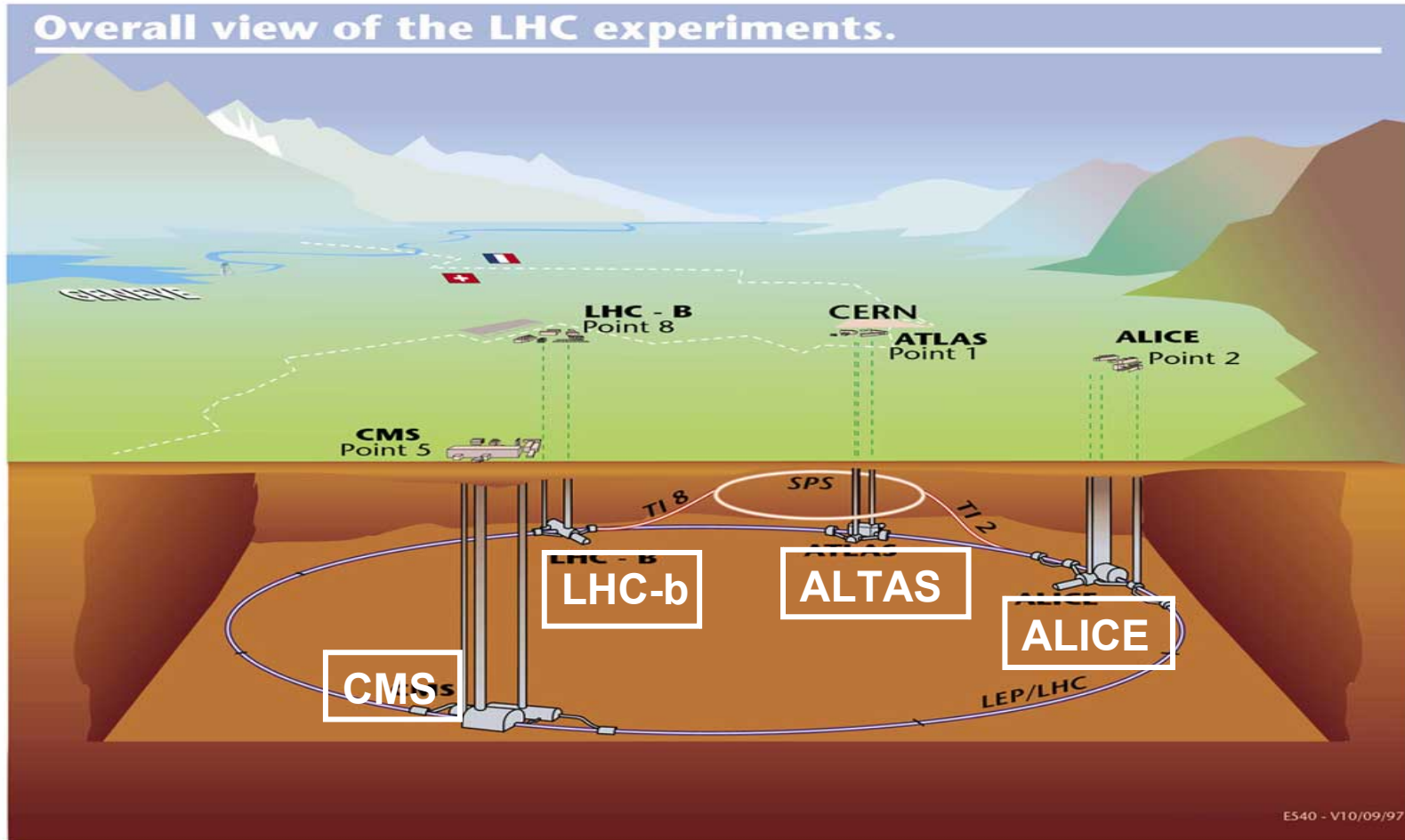


Das CERN control center



Kontrollraum aller Beschleunigeranlagen

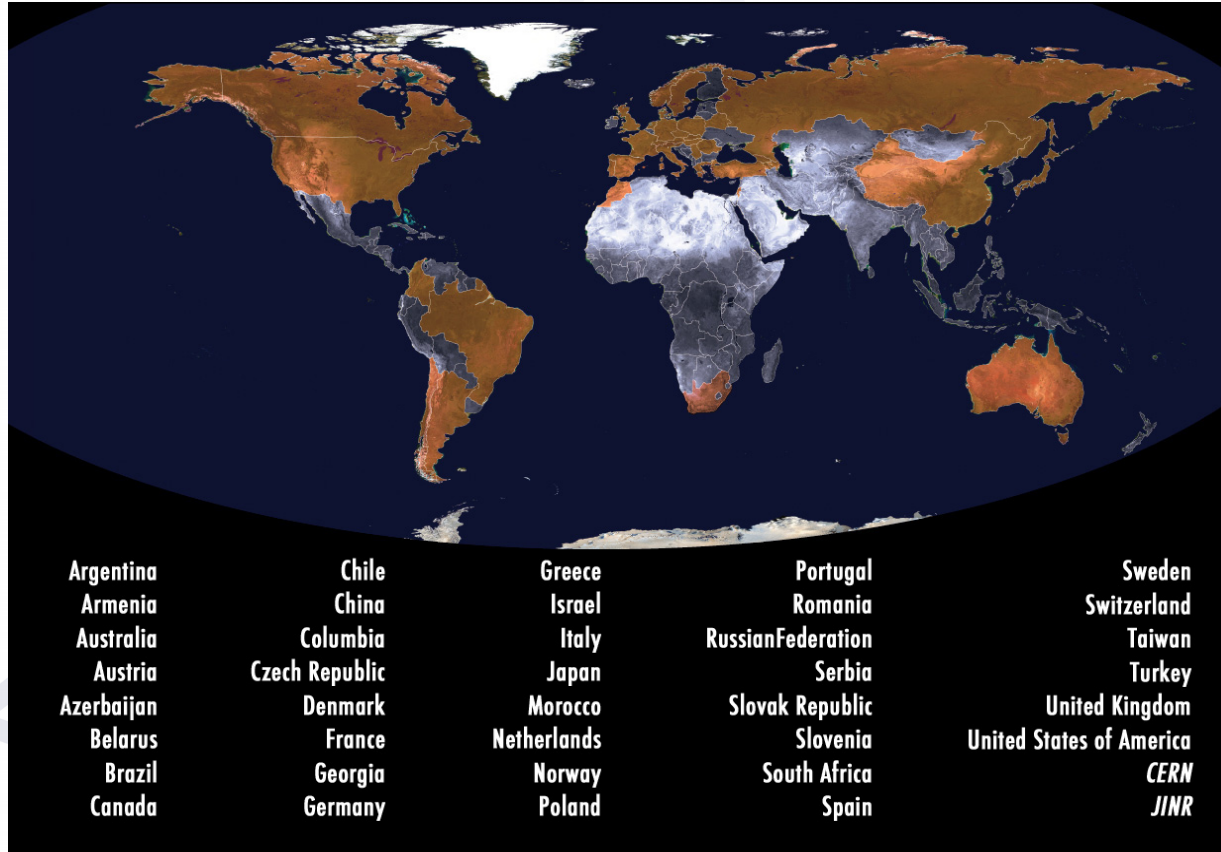
Die 4 Experimente am LHC



Das Experiment



ATLAS: weltweite Kollaboration



38 Länder
185 Institute
3500 WissenschaftlerInnen
(Status 2015)

Das ATLAS- Areal



Die ATLAS-Kaverne



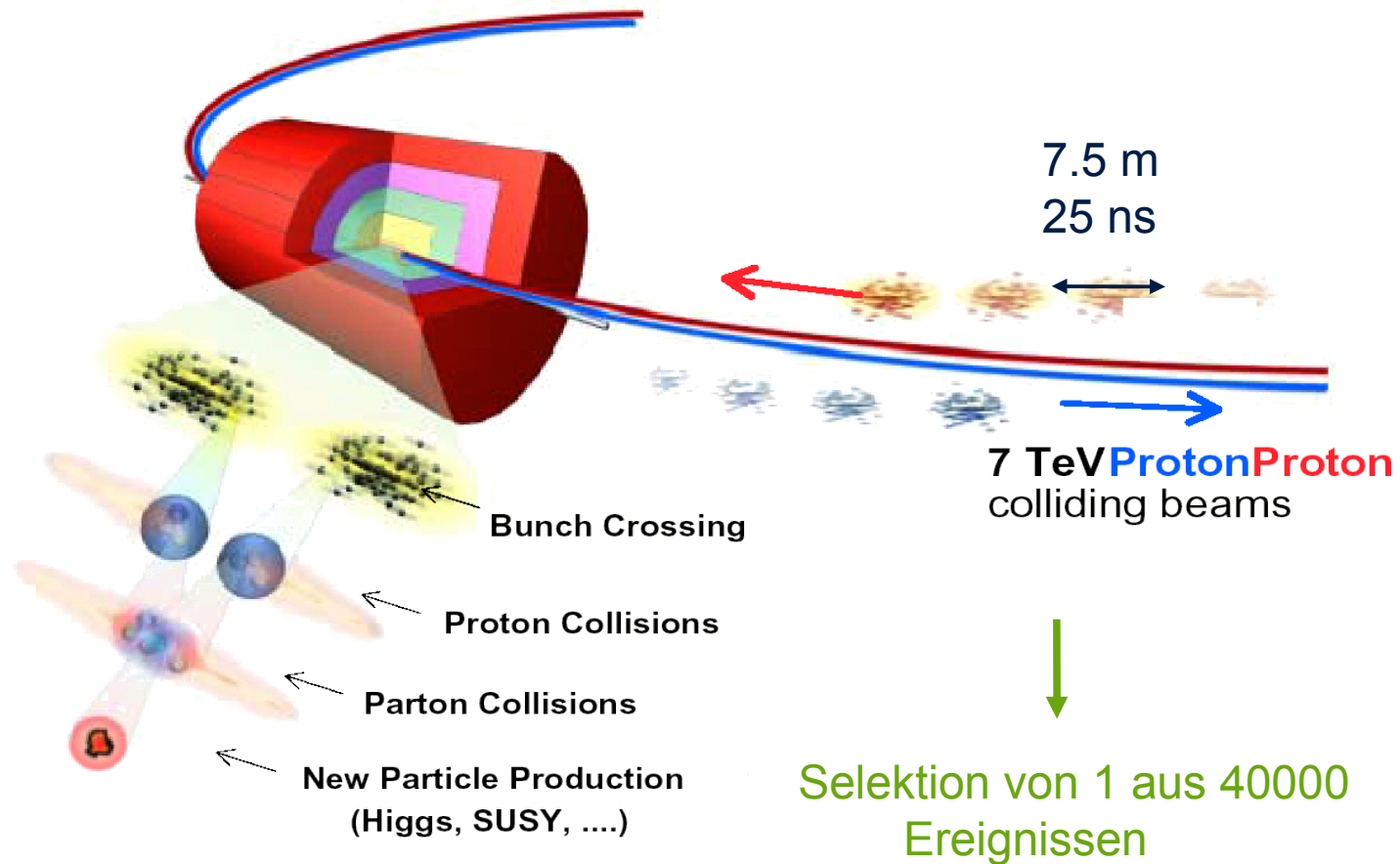
Datennahme bei ATLAS

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

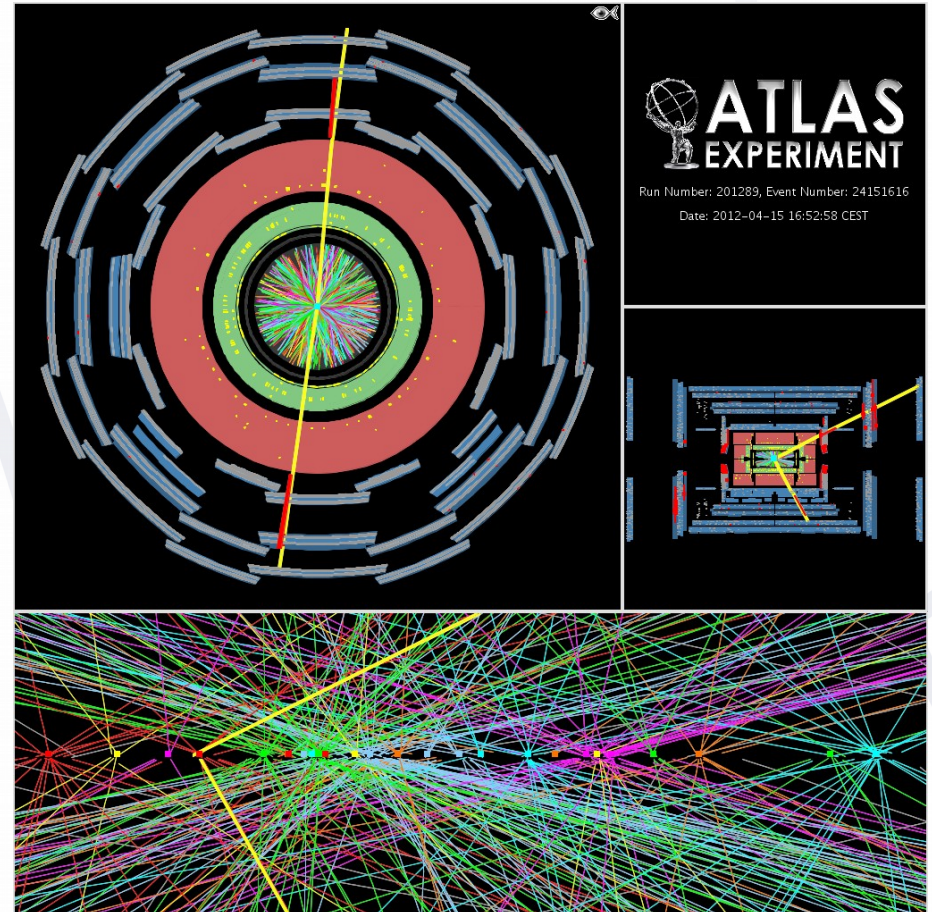


Teilchenkollisionen bei LHC



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



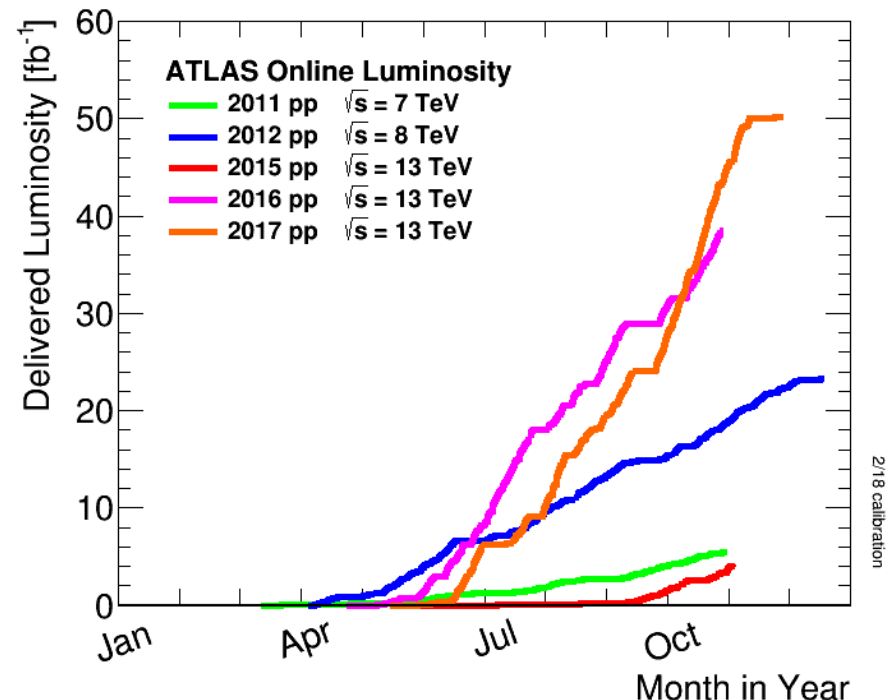
Weltweites Computing



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

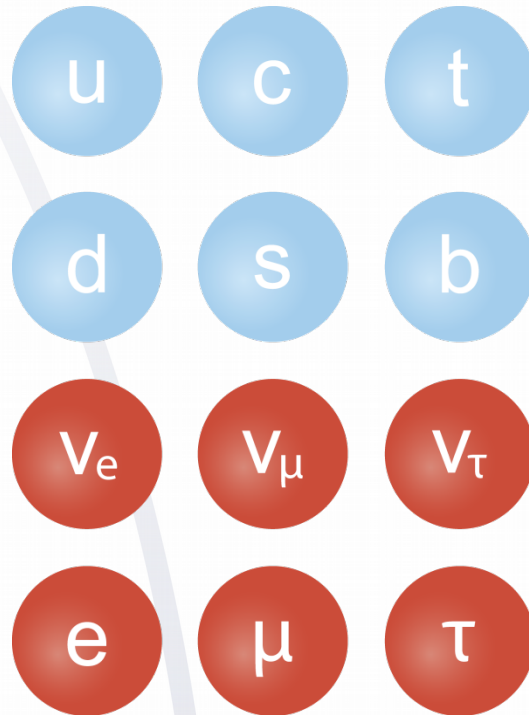


Das Standardmodell

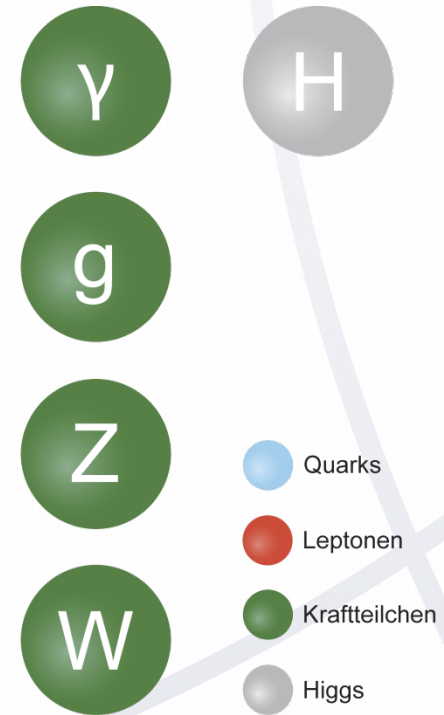
Hauptaufgaben des LHC:

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

Materie (Fermionen)



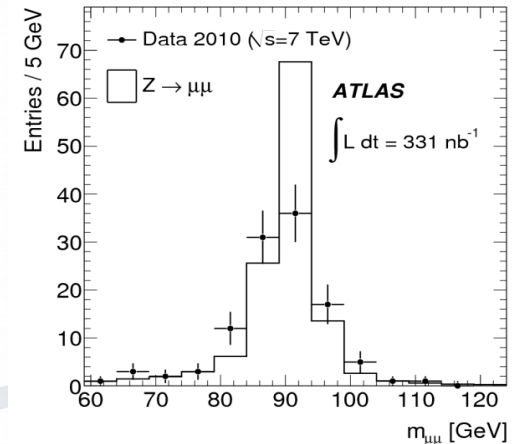
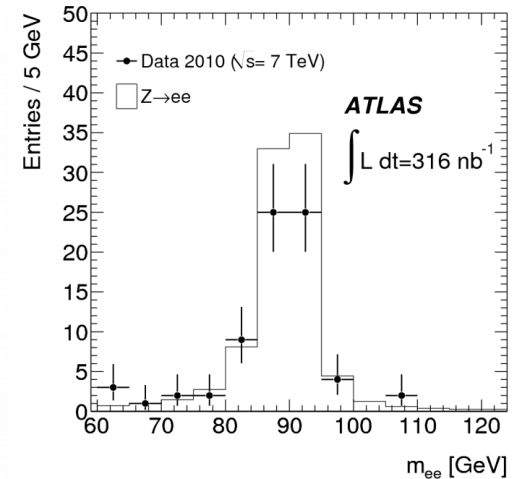
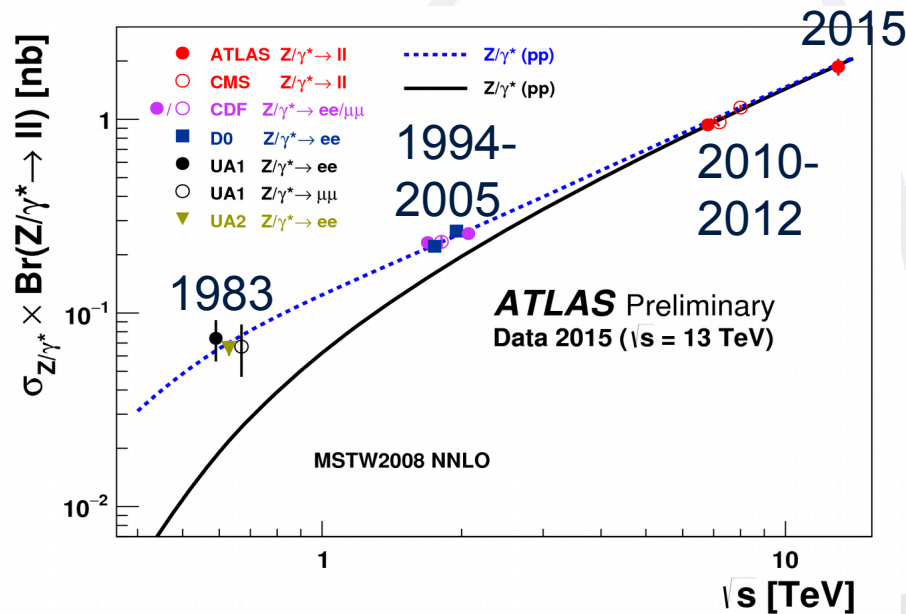
Bosonen



Vermessung des Z-Bosons

Bestimmung des Z-Boson Wirkungsquerschnitts

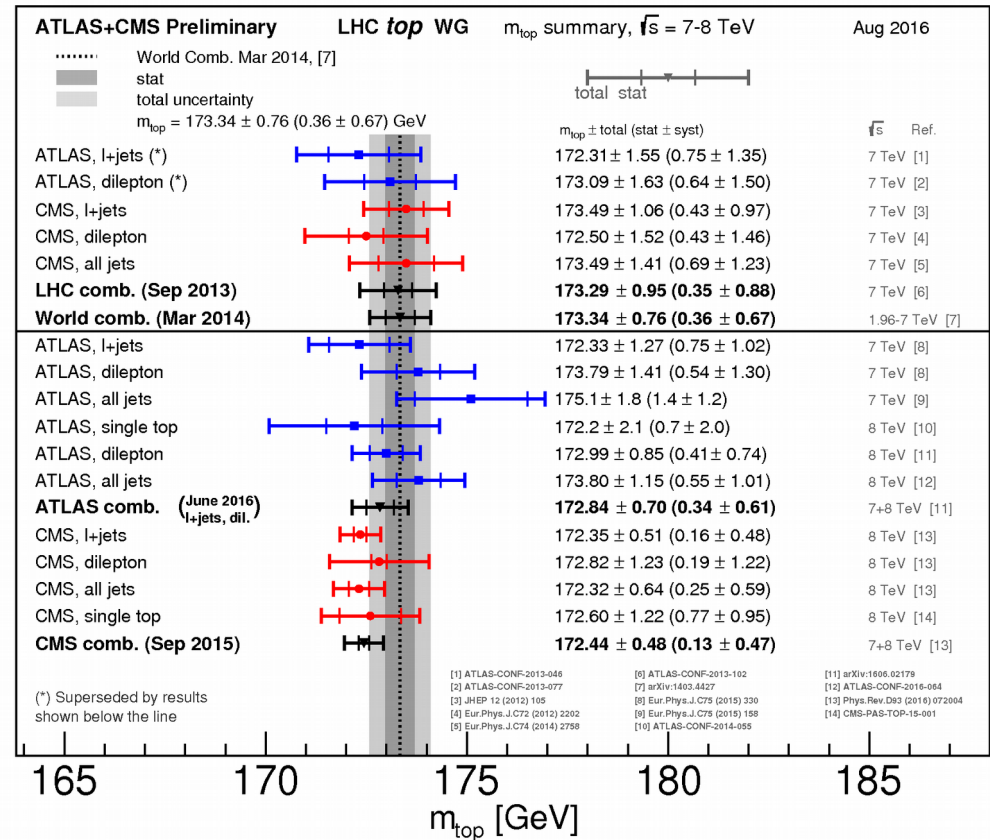
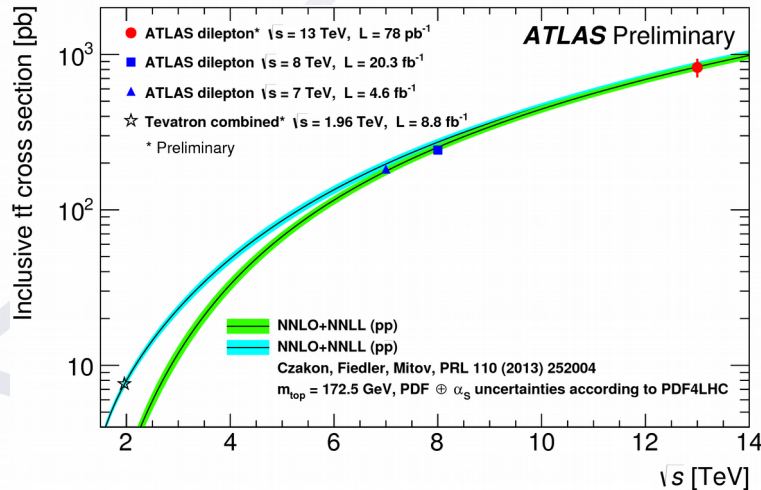
Bestätigung der theoretischen Vorhersage



Vermessung des Top-Quarks

Bestimmung der Top-Quark Masse

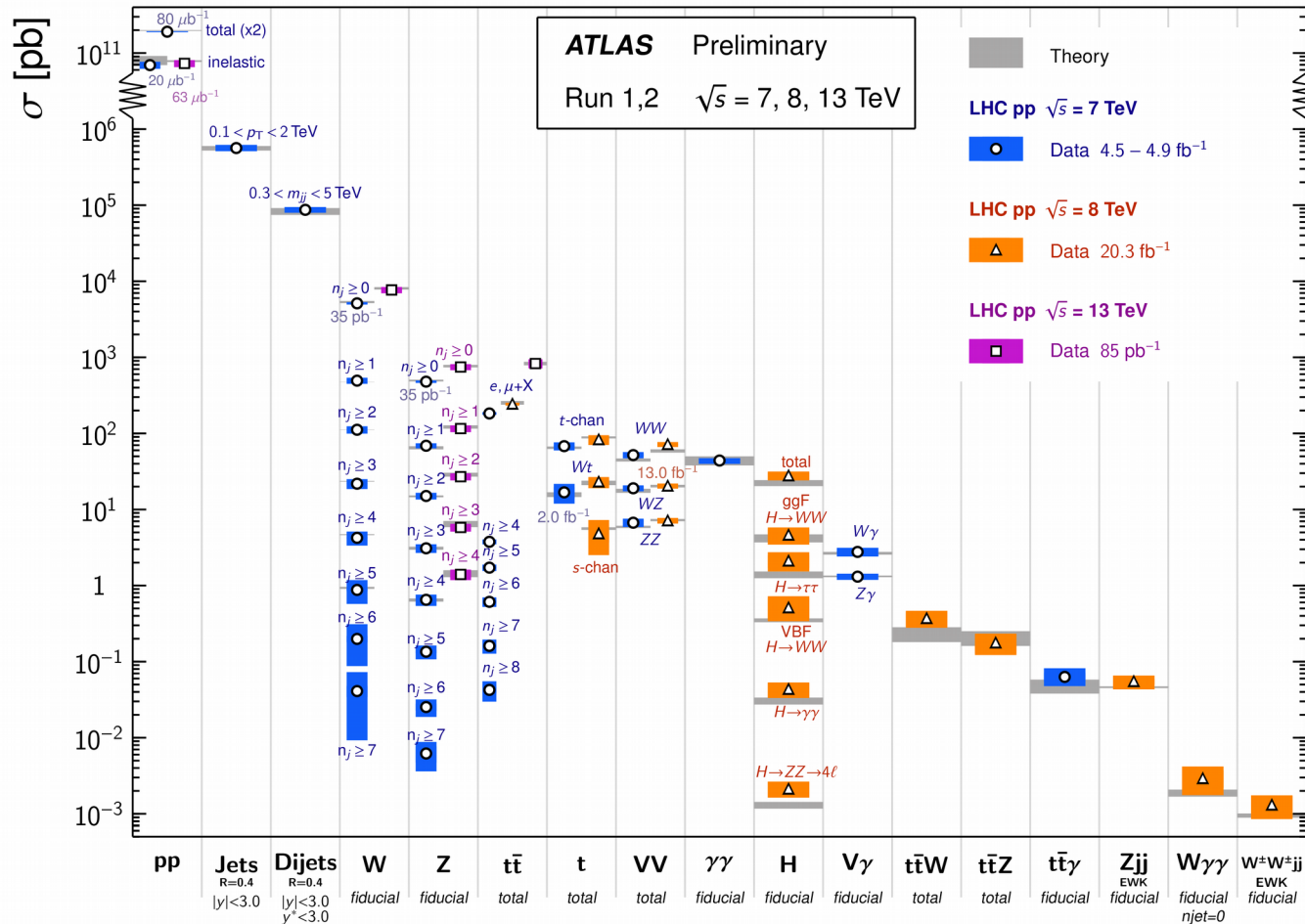
Bestätigung der theoretischen Vorhersage des Produktionswirkungsquerschnitts



Vermessung des Standardmodells

Standard Model Production Cross Section Measurements

Status: Nov 2015



Ausblick

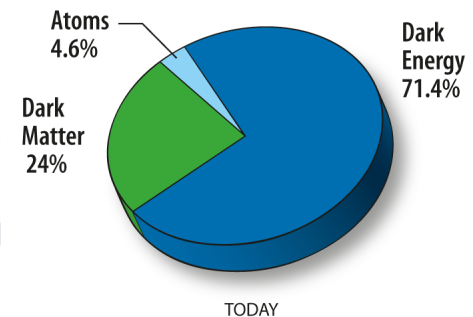
Daten von LHC von höchster Qualität, alle Erwartungen übertroffen

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

