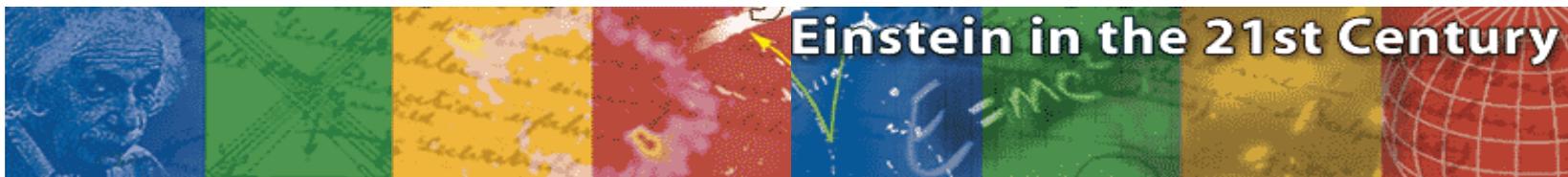




# CERN MASTER CLASS 2014



**Dr. Martin zur Nedden**  
**Dr. Ullrich Schwanke**  
Humboldt-Universität zu Berlin



# Ablauf an der HU



- 09.30 Begrüßung
- 09.45 – 11.00 Ein Universum voller Teilchen
  - Einführung in die Teilchenphysik (**Dr. M. zur Nedden**)
- 11.00 – 11.45 Das Unsichtbare sichtbar machen
  - Detektoren und Nachweismethoden (**Dr. U. Schwanke**)
- 11.45 – 12.45 Mittagspause (WISTA-Kantine)
- 12.45 – 14.30 Praktische Übung mit LHC Daten am PC
  - geleitet von **Studierenden der HU Berlin**
- 14.30 – 15.00 Pause
- 15.00 – 15.45 Neues vom Higgs-Boson
  - Vortrag (**Dr. M. zur Nedden**)
- Schüler: 15.45 – 17.00 Internationale Videokonferenz und Quiz
- Lehrer: 15.45 – 17.00 Teilchenphysik im Unterricht und das Netzwerk Teilchenwelt
  - Vorstellung durch **Adelheid Sommer / Martin zur Nedden**

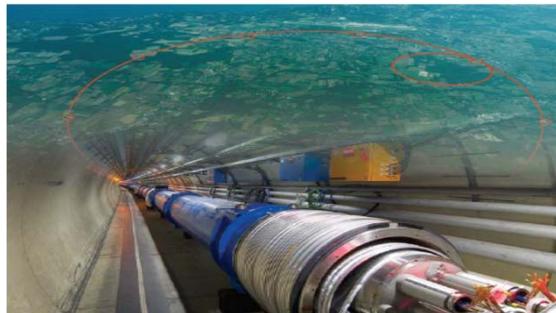
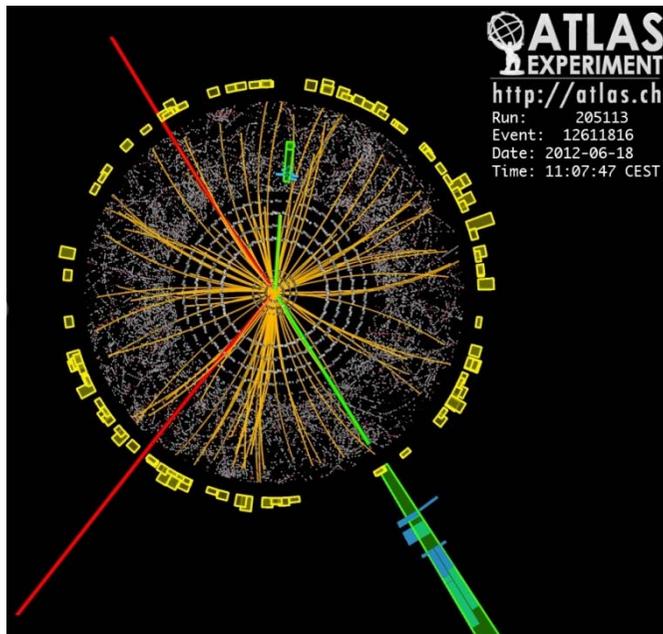
# Mitwirkende



- **HU Berlin**
  - **Dr. Martin zur Nedden**, Physik am LHC
  - **Dr. Ullrich Schwanke**, Astroteilchenphysik
  - **Christoph Schwanke**, Doktorand
  - **Aus der Didaktik: Daniel Kretschmer, Marcel Kerber**
- **DESY in Zeuthen**
  - Adelheid Sommer, Schülerprojekte und Öffentlichkeitsarbeit



# Einführung in die Teilchenphysik, den Beschleuniger LHC und die Experimente; Die Entdeckung des Higgs Bosons



CERN Masterclass  
2014

**Dr. Martin zur Nedden**

# Inhalt

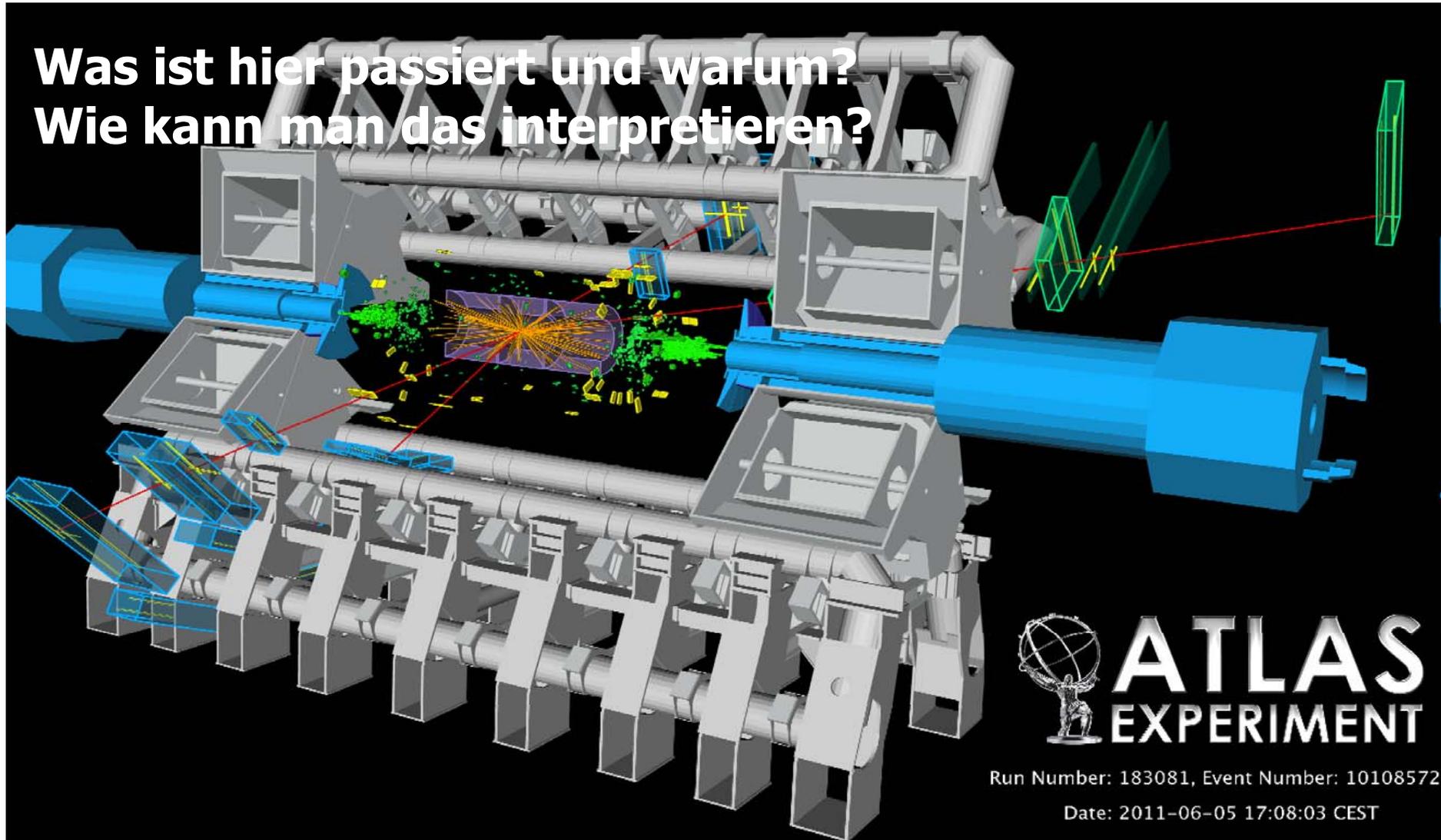


- **Einführung in die Teilchenphysik**
  - Das Standardmodell der Teilchenphysik
  - Aktuelle Resultate des LHC
- **Beschleuniger und Detektoren**
  - Der Beschleuniger LHC und das Experiment ATLAS
  - Nachweis von Teilchen und Detektoren
  - Experimentierarbeit beim ATLAS-Experiment am CERN
- **Unser Plan für Heute**
  - Suche nach W, Z- und Higgs Bosonen
- **Suche nach dem Higgs Boson**
  - Warum brauchen wir das Higgs?
  - Die schwierige Suche nach dem Higgs

# Was Wollen Wir heute verstehen?



Was ist hier passiert und warum?  
Wie kann man das interpretieren?



 **ATLAS**  
EXPERIMENT  
Run Number: 183081, Event Number: 10108572  
Date: 2011-06-05 17:08:03 CEST



# Einführung in die Elementarteilchenphysik

# Vorbemerkung: Nützliche Einheiten für Teilchen

- Größe:

1 fm = 1 Femtometer („Fermi“) =  $10^{-15}$  m  
(1  $\mu\text{m}$  = 1.000.000.000 fm)

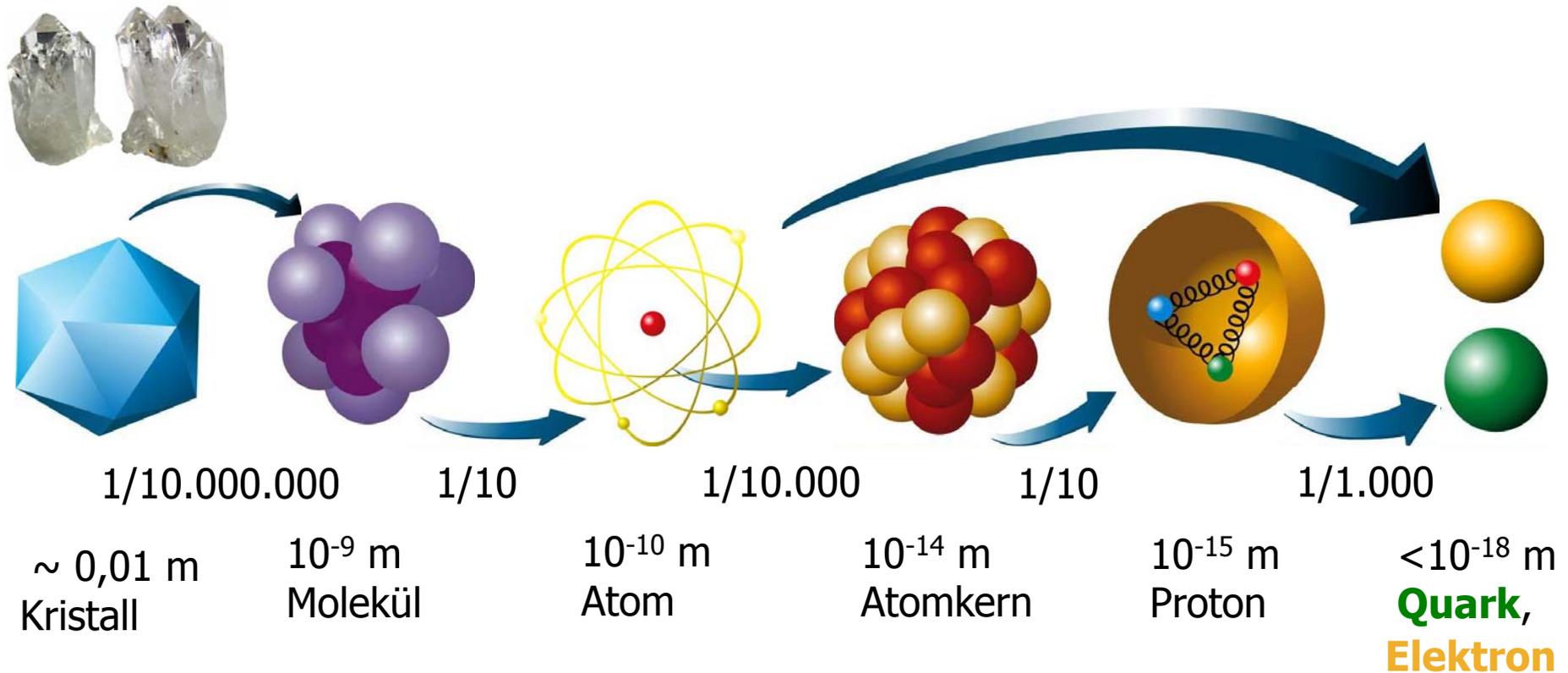
- Energie:

1 eV = 1 Elektronvolt =  $1.6 * 10^{-19}$  J  
(eine Ladung auf einem  
Meter bei 1 V Spannung)

**1 GeV: „viel“ für ein Teilchen, aber makroskopisch winzig:  
könnte Taschenlampe (1,6 Watt) für ganze  
0,000.000.0001 Sekunden zum Leuchten bringen**



# Der Aufbau der Materie



**Stecknadelkopf:**

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

**Elektron, Quark:**

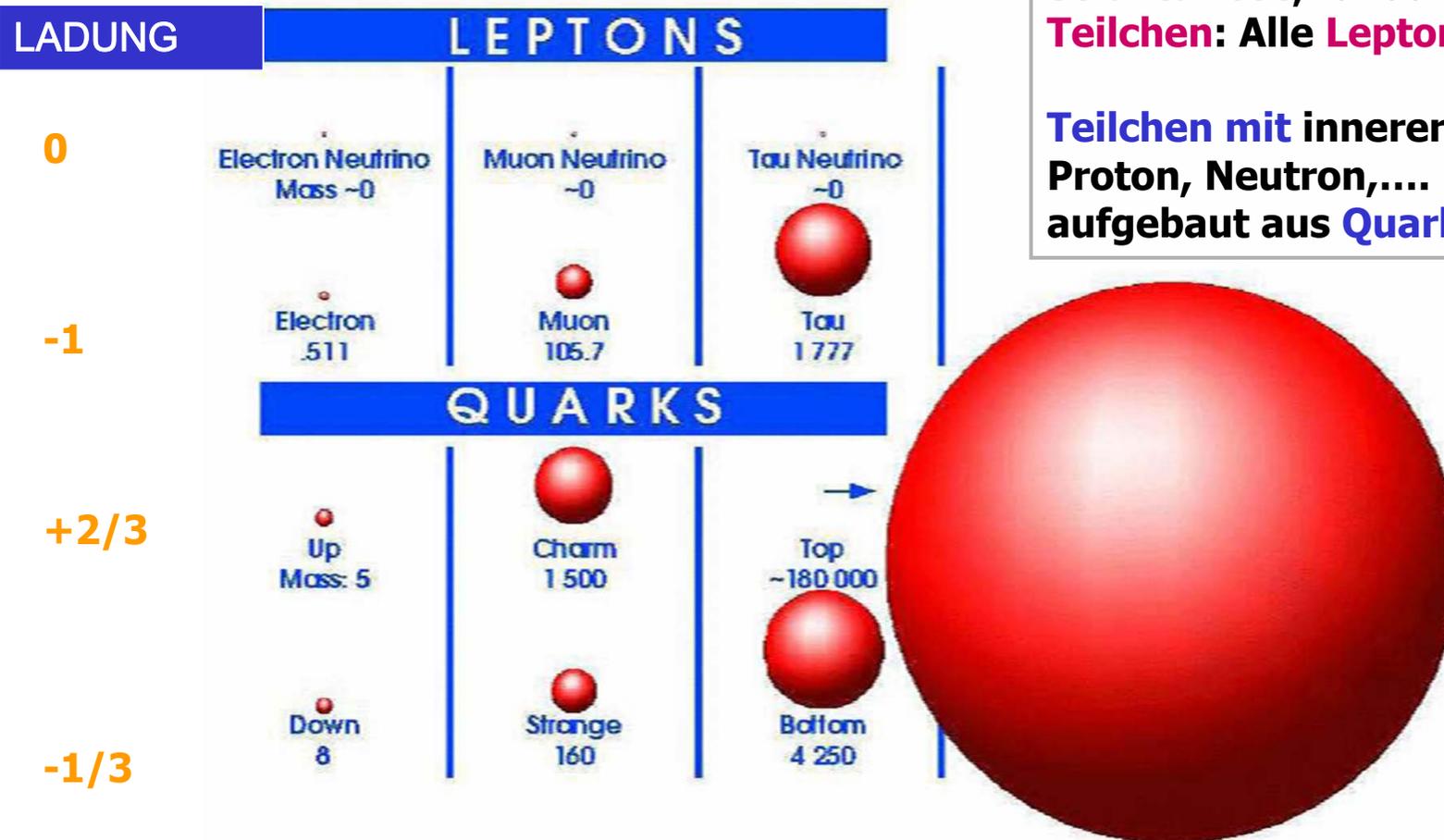
$$< 10^{-18}\text{m} = 0,0000000000000000001\text{m}$$

# Bausteine der Materie: Quarks und Leptonen

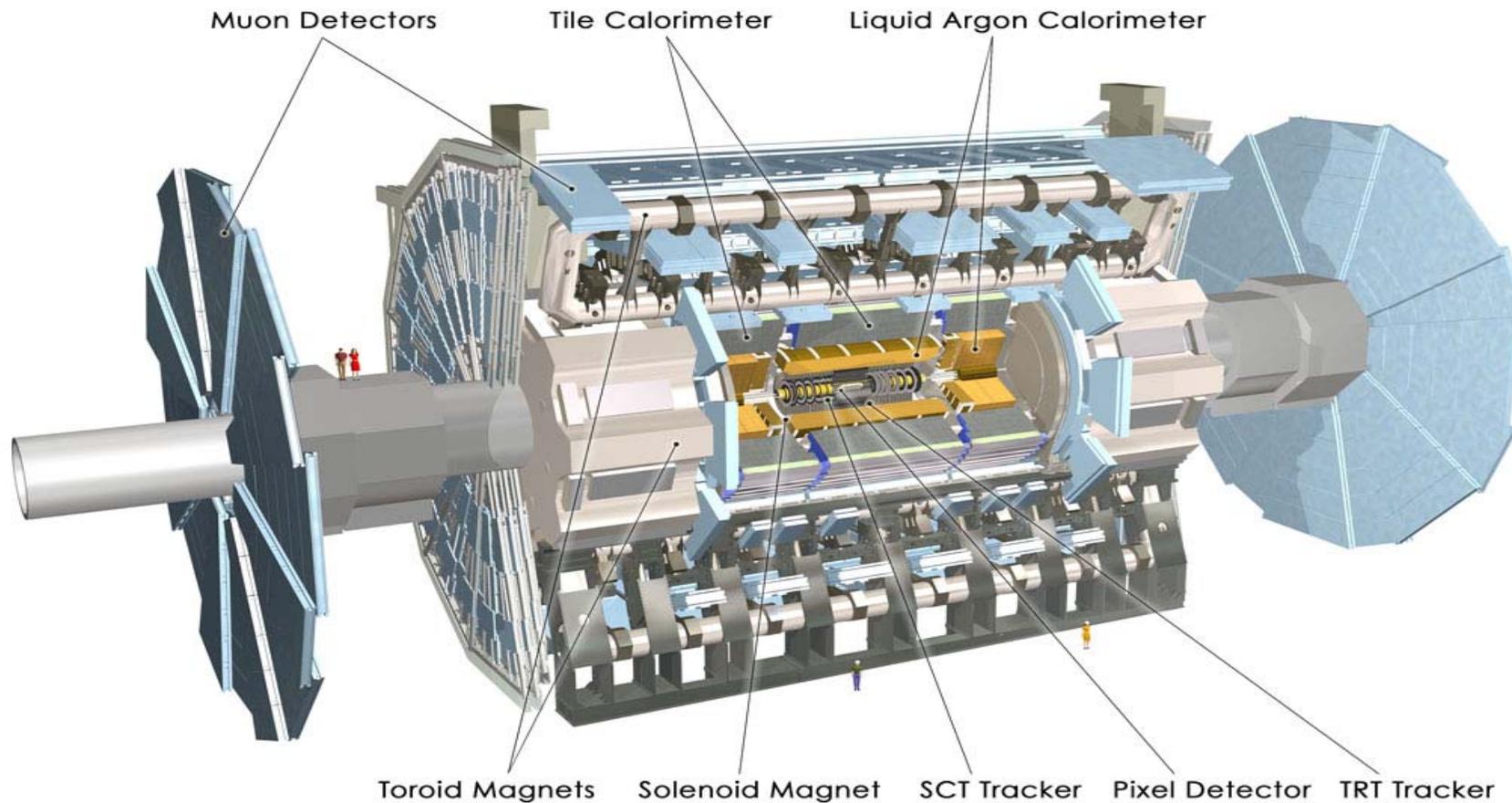
**Stabile Materie: up- und down-Quark, Elektronen**

**Strukturlose, fundamentale  
Teilchen: Alle Leptonen**

**Teilchen mit innerer Struktur:  
Proton, Neutron,....  
aufgebaut aus Quarks**

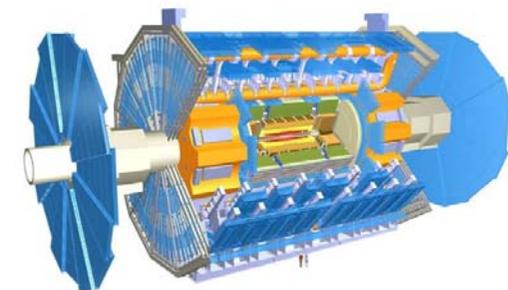
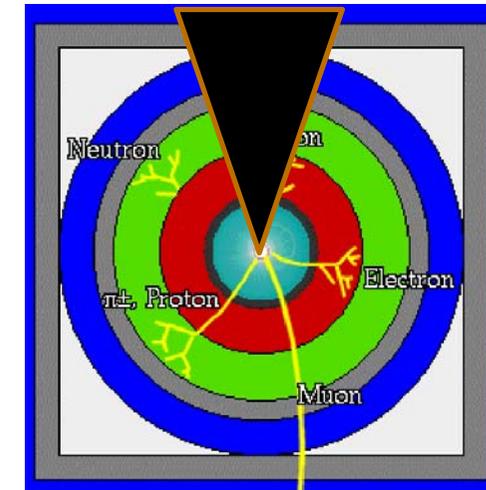
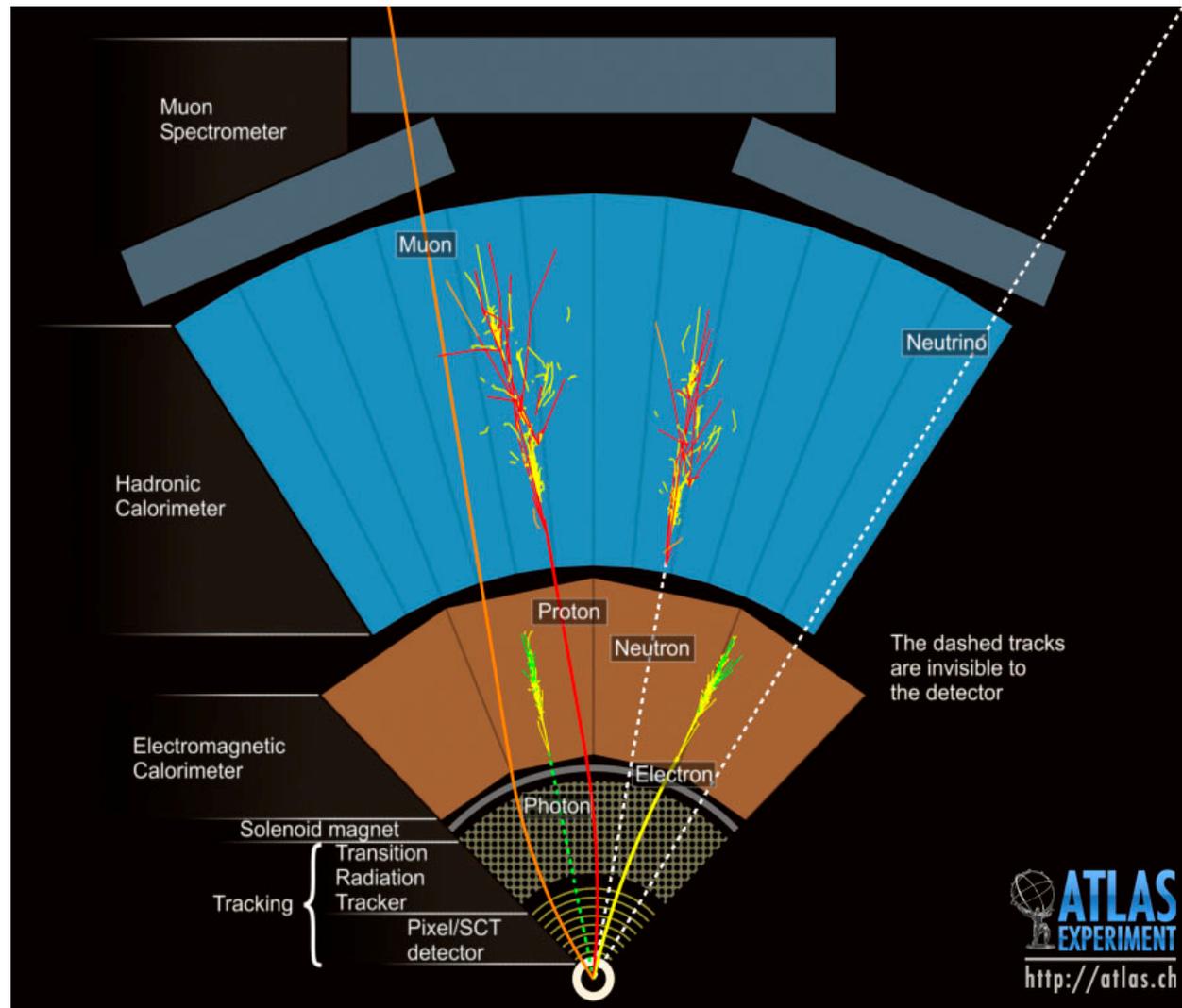


# Teilchennachweis: ATLAS-Detektor



**Siehe Detektor Vortrag**

# Teilchen im ATLAS-Detektor (LHC)

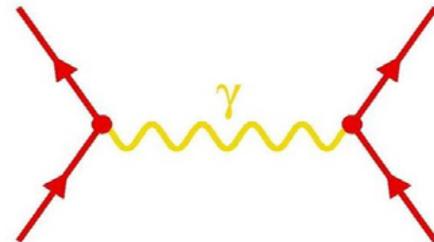
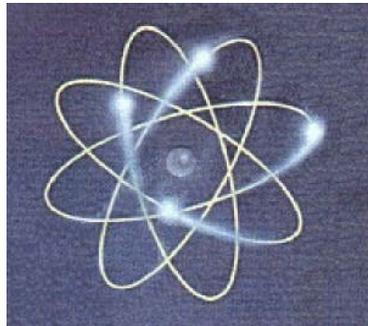


# Die vier Grundkräfte

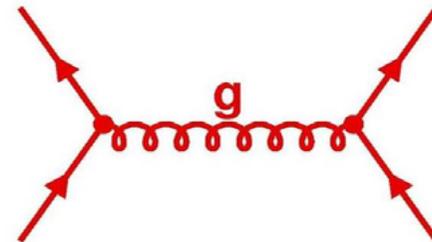


- Elektromagnetische Kraft
  - wirkt zwischen allen geladenen Teilchen
  - verantwortlich z.B. für den Zusammenhalt von Atomen
- Starke Kraft
  - wirkt zwischen den Quarks
  - verantwortlich für den Aufbau von Elementarteilchen und den Zusammenhalt der Kerne
- Schwache Kraft
  - verantwortlich für Umwandlungsprozesse von Elementarteilchen (z.B. Teilchenzerfälle)
- Gravitationskraft
  - $10^{36}$  mal schwächer als die starke Kraft
  - spielt in der Teilchenphysik keine Rolle

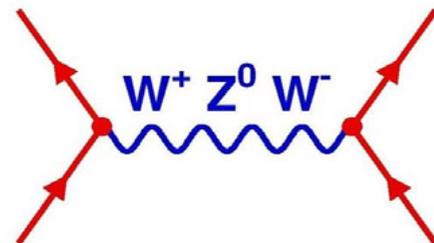
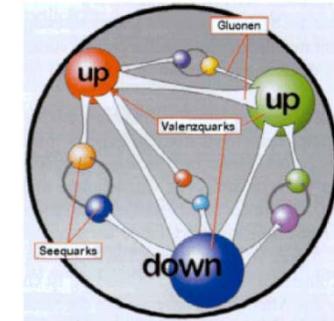
# Kraftvermittler: Austauschteilchen



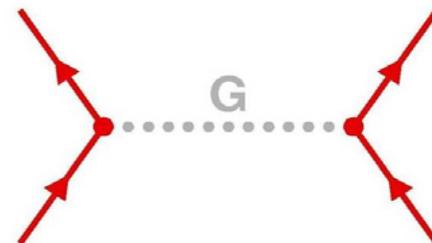
elektromagn. Kraft



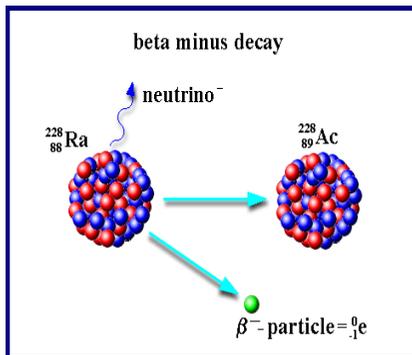
starke Kraft



schwache Kraft



Gravitation

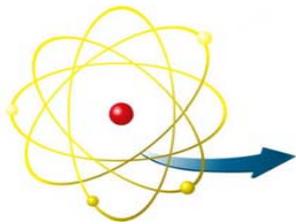


**Austauschteilchen sind die Quanten der Kraftfelder**

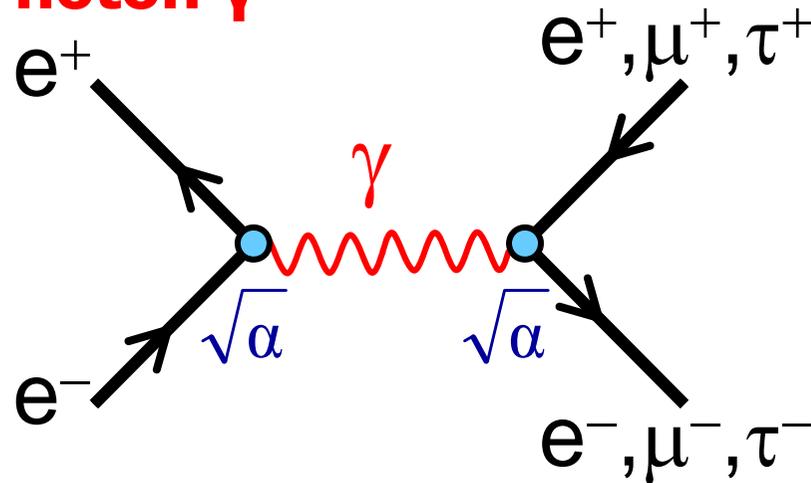
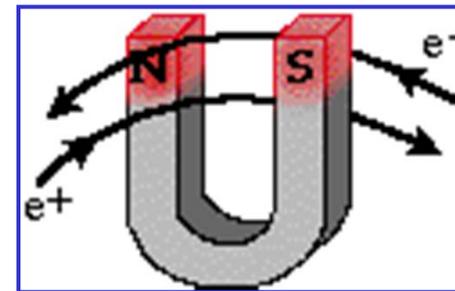
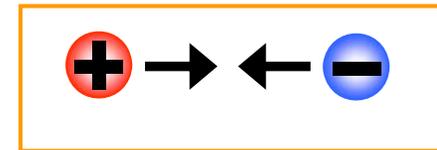
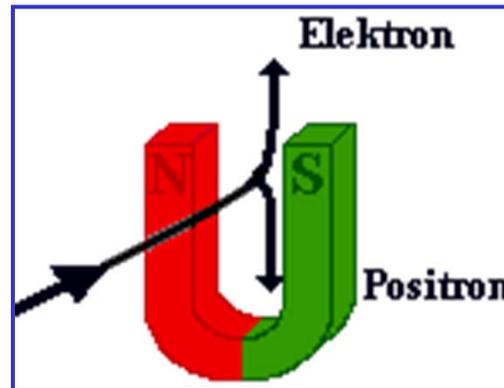
# Elektromagnetische Wechselwirkung

bekannteste aller Kräfte:

**elektrische** und **magnetische** Phänomene



Botenteilchen:  
**Photon  $\gamma$**



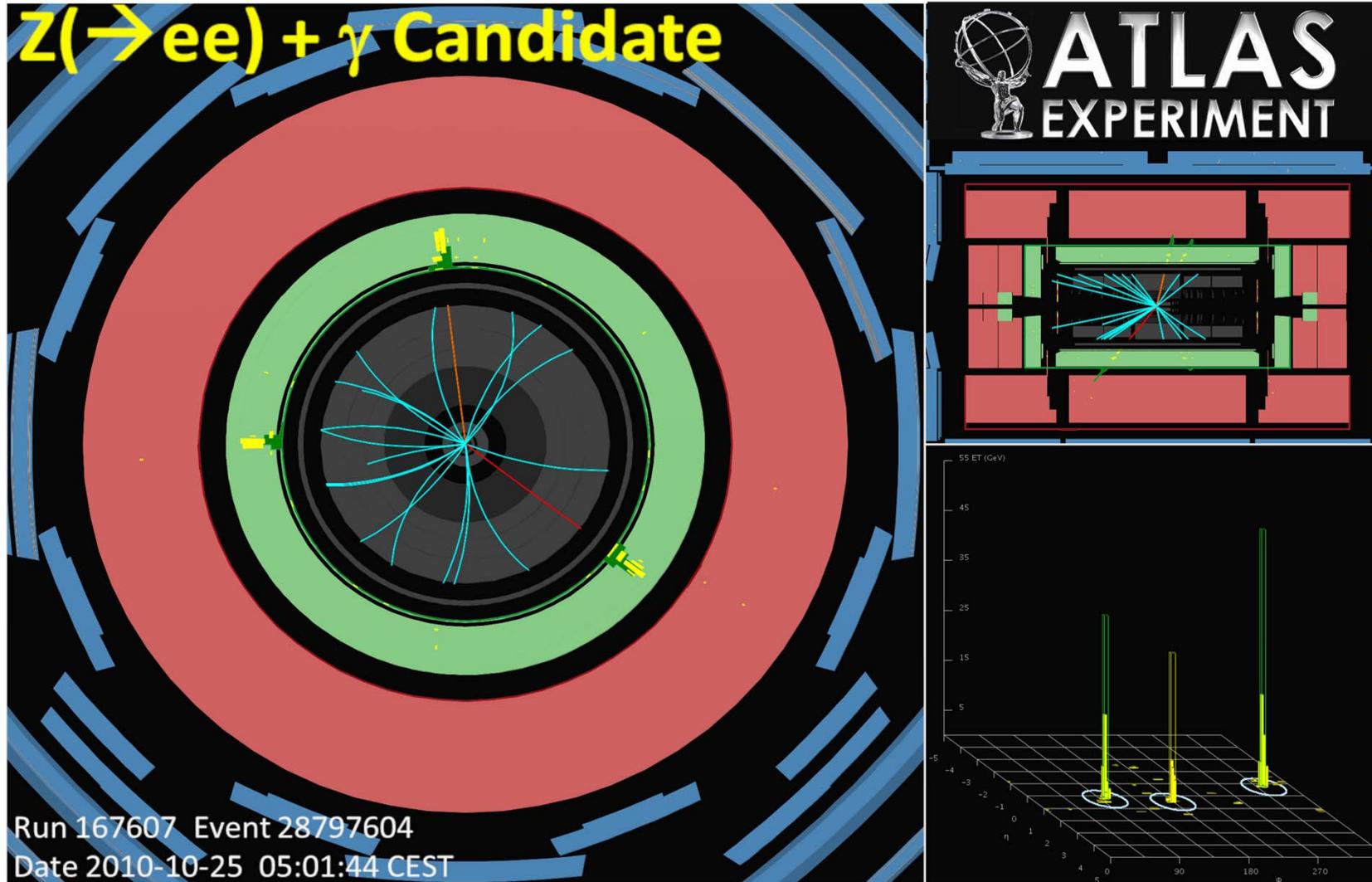
**Verantwortlich u.a. für:**

- Elektrizität
- Zusammenhalt der Atome und Moleküle
- elektromagnetische Wellen

# Elektromagnetische Wechselwirkung



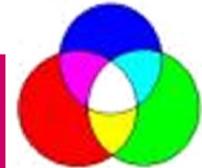
$Z(\rightarrow ee) + \gamma$  Candidate



# Die starke Kraft: „Quantenchromodynamik“

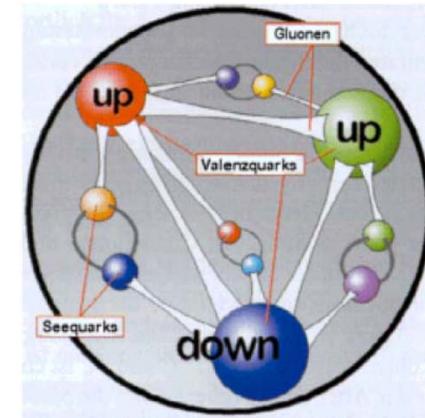
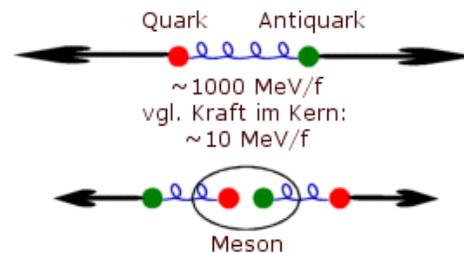
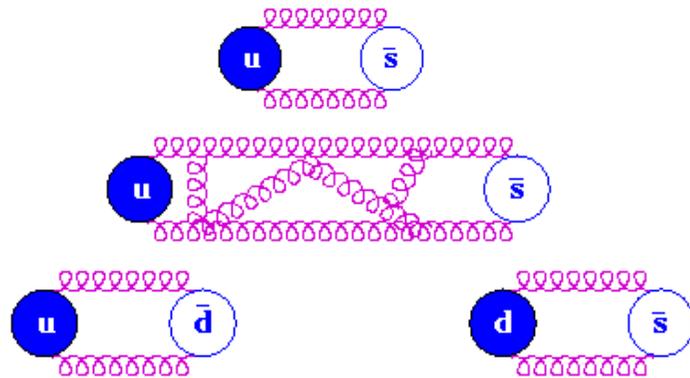
Quarks erscheinen nur im Verband (Bsp Proton =  $|uud\rangle$  , Neutron =  $|ddu\rangle$ )  
 Quarks erscheinen frei beweglich im Verband

**Grund:**  
 3 Ladungen: **rot, grün, blau**



## Eigenschaft der starken Kraft:

- die notwendige Energie zum Separieren von Quarks **wächst mit dem Abstand** (Analogie: Federkraft)
- Gluonen tragen Farbladung und **koppeln aneinander**
- **Quarks sind eingesperrt**, es gibt nur farbneutrale Objekte

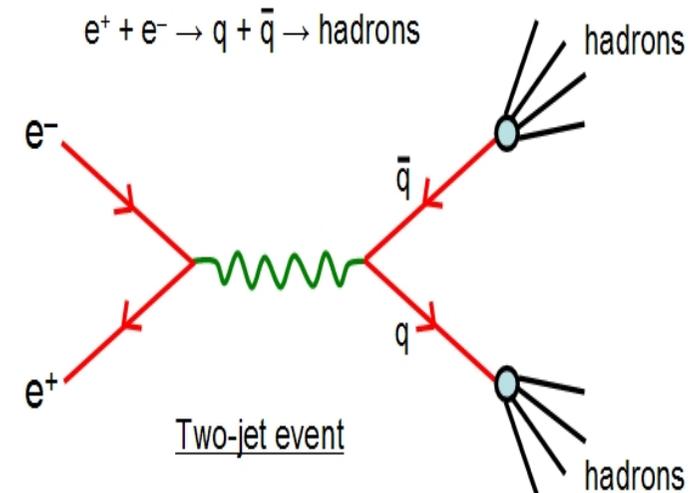
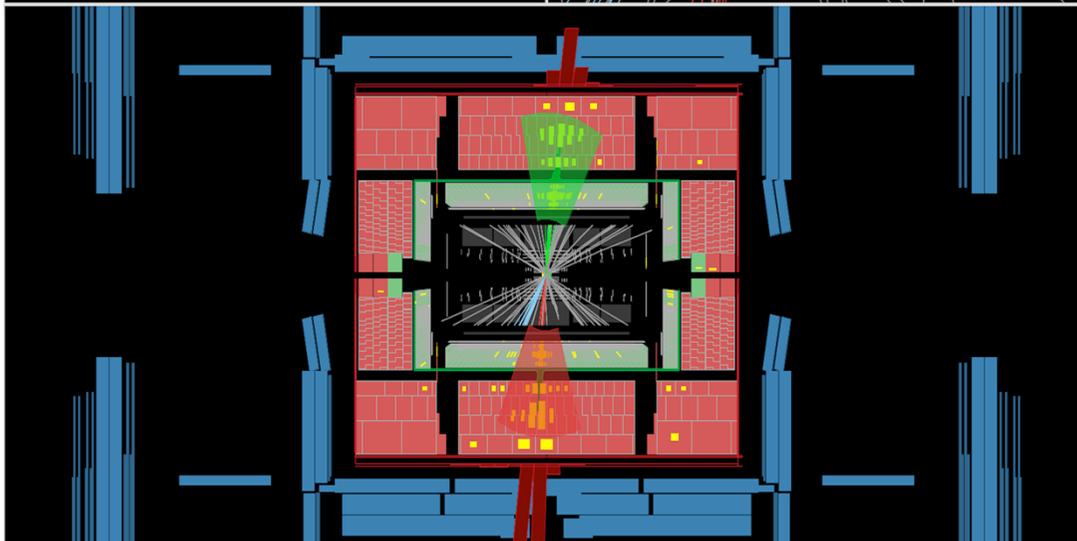
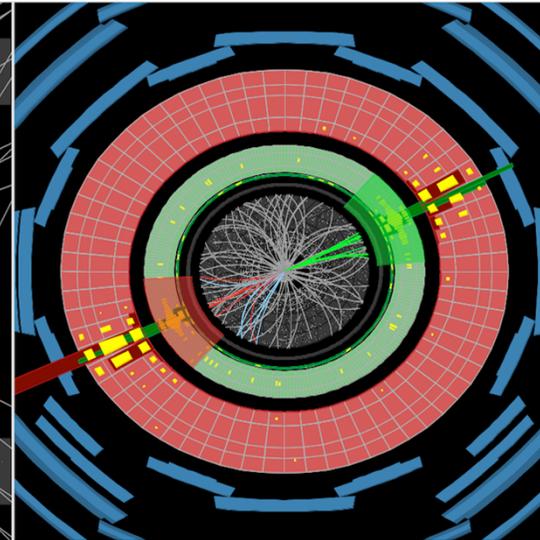
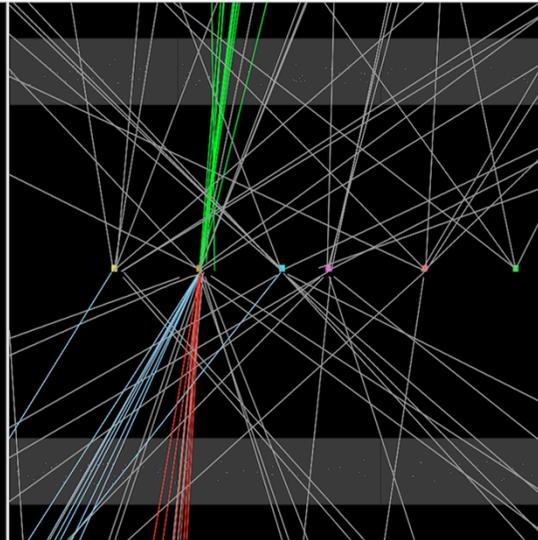


# Starke Wechselwirkung: 2 Jets



 **ATLAS**  
EXPERIMENT

Run Number: 201006, Event Number: 55422459  
Date: 2012-04-09 14:07:47 UTC

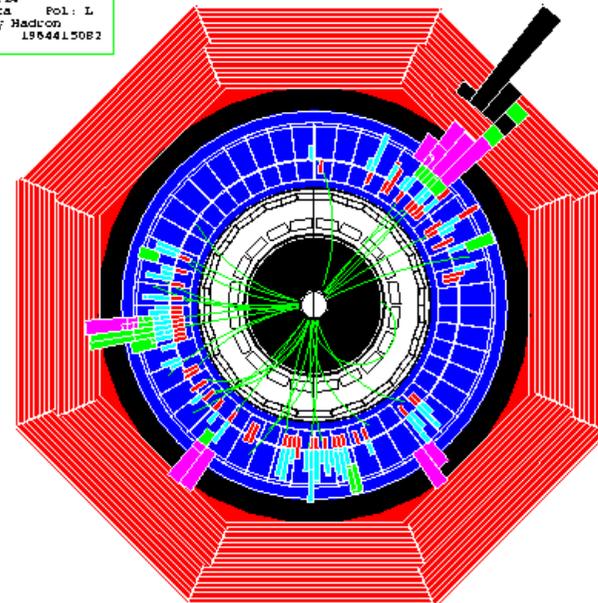
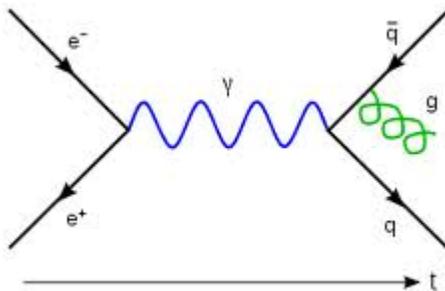


# Entdeckung des Gluons (1982, DESY)



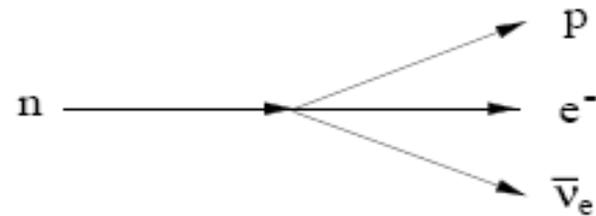
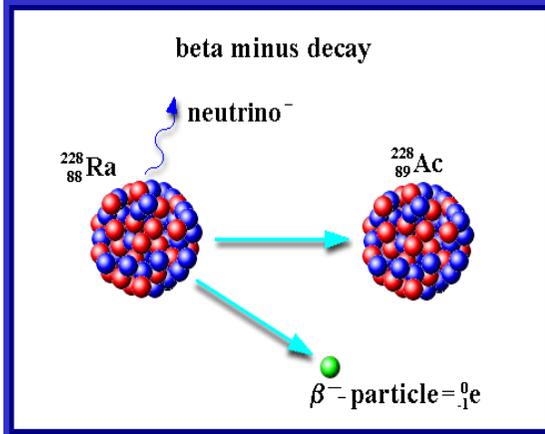
Entdeckung des Gluons:  
Ereignisse mit 3 Jets!  
Nur erklärbar, durch die  
Anwesenheit des Gluons.

```
Run 12037, EVENT 0353
8-JUL-1982 10:14
Source: Run Data Pol: L
Trigger: Energy Hadron
Beam Crossing 1904415082
```



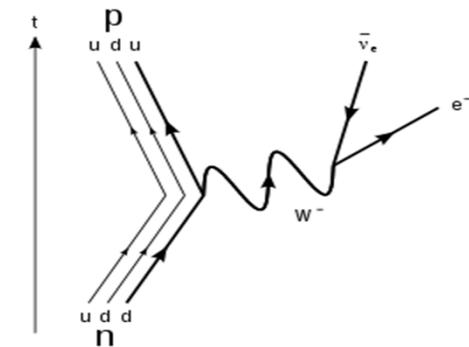
# Schwache Wechselwirkung

nuklearer  $\beta$ -Zerfall beruht auf dem Neutronenzerfall

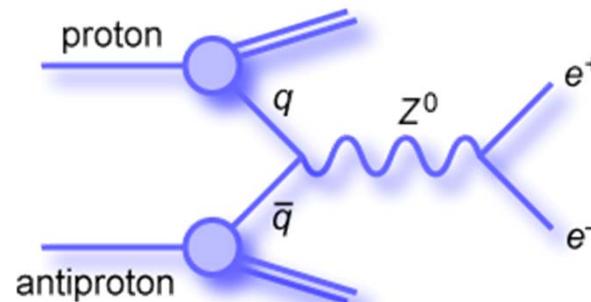
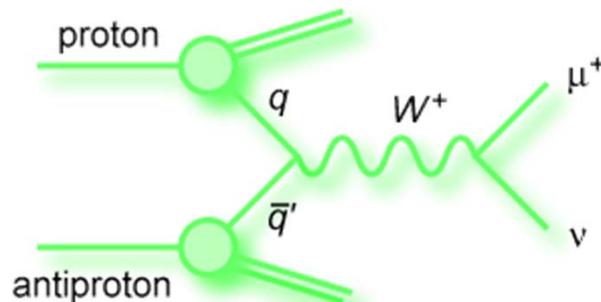


Quark-Niveau:

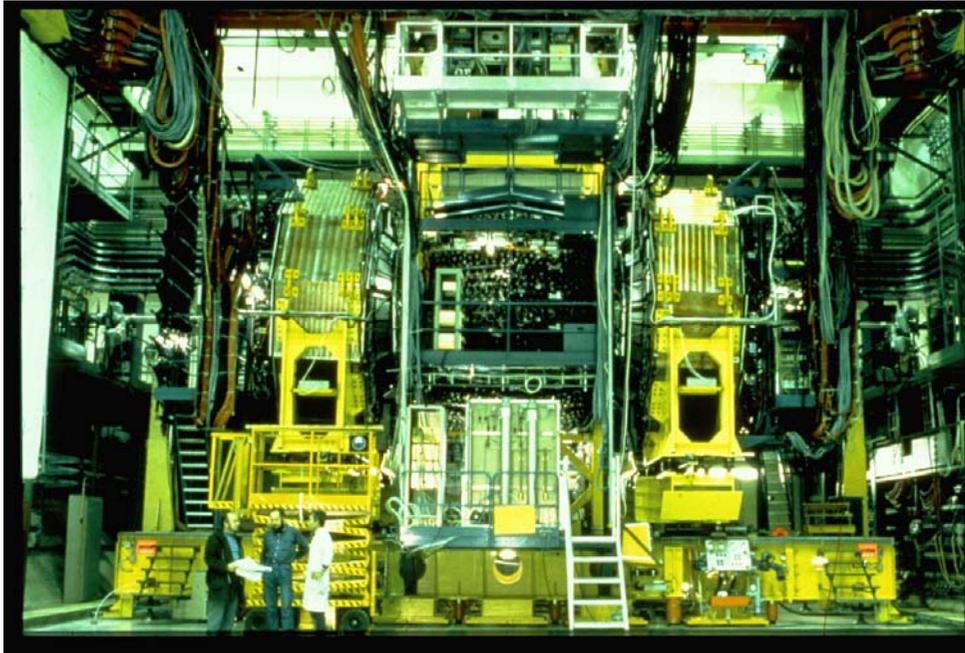
**d-Quark** zerfällt in ein **u-Quark** unter Austausch eines **virtuellen W-bosons**



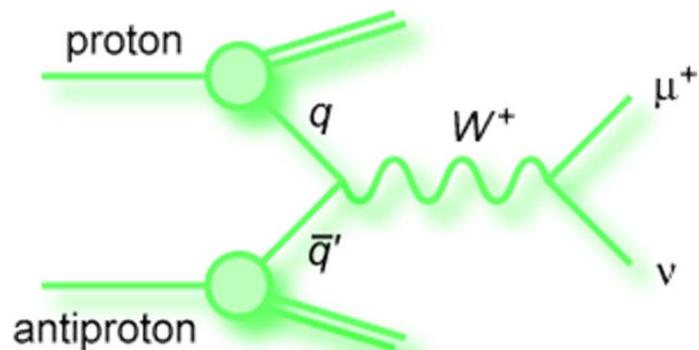
Produktion **reeller W und Z-Bosonen** in Wechselwirkungen von **Proton (Quark)** und **Antiproton (Antiquark)**



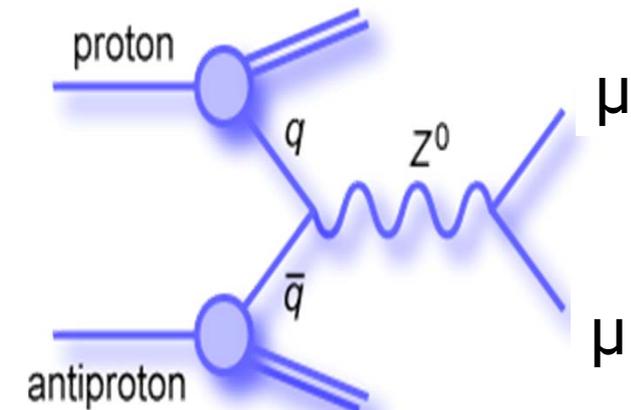
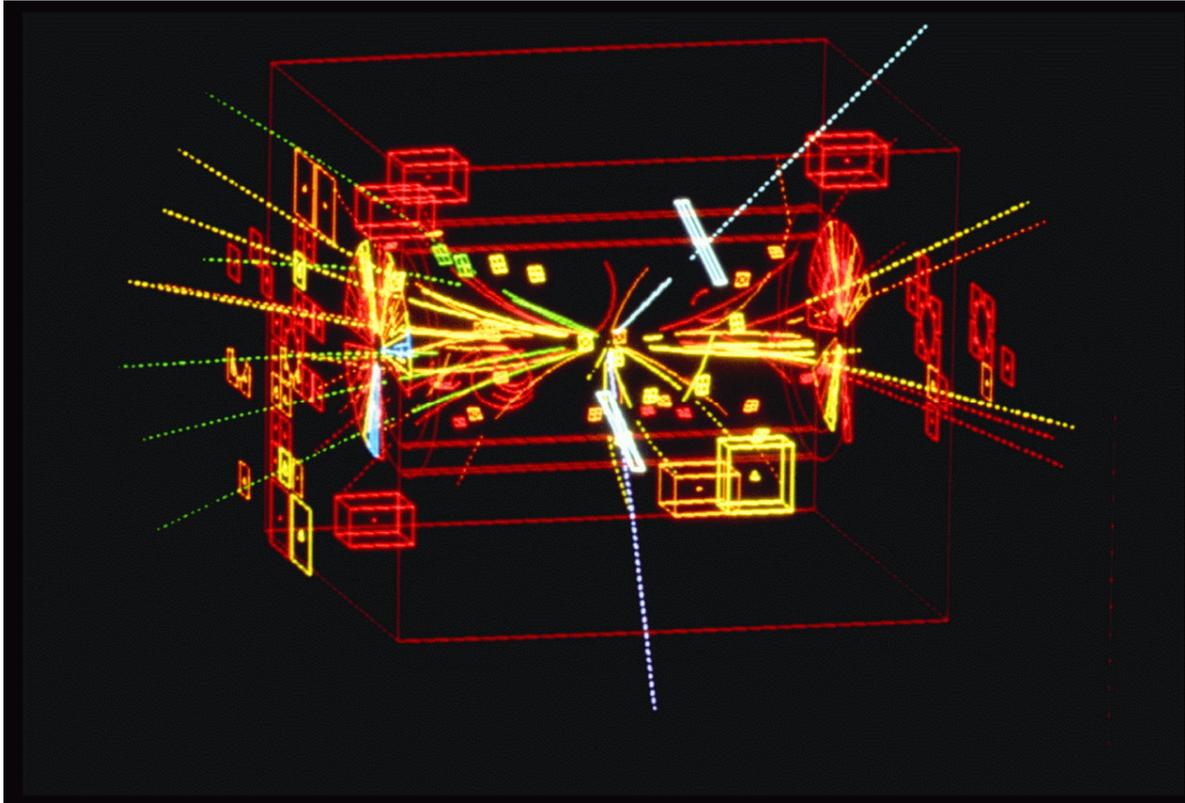
# Entdeckung des W-Bosons (1982, CERN)



An den Experiment  
UA1 und UA2  
am CERN

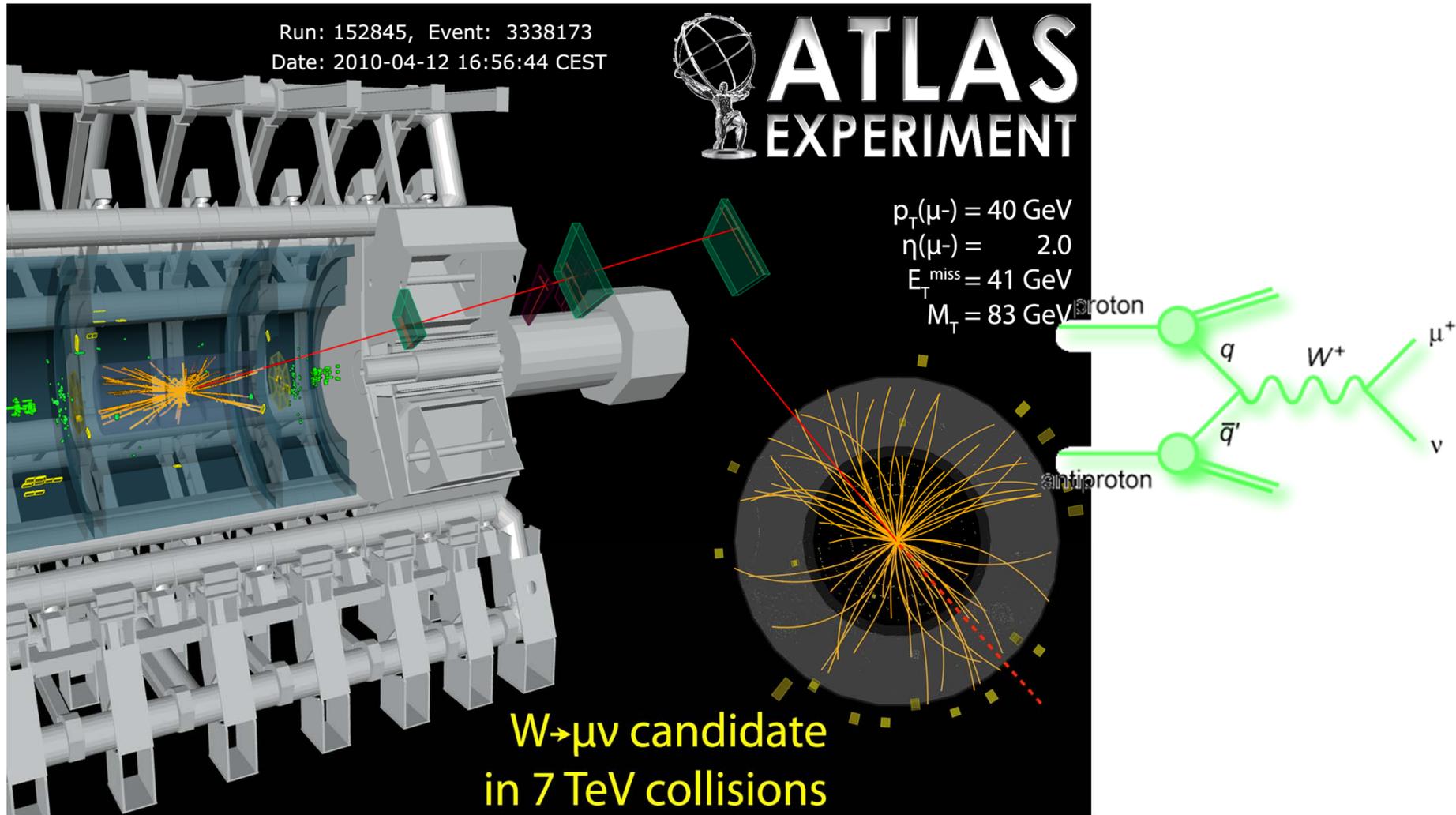


# Entdeckung des Z-Bosons

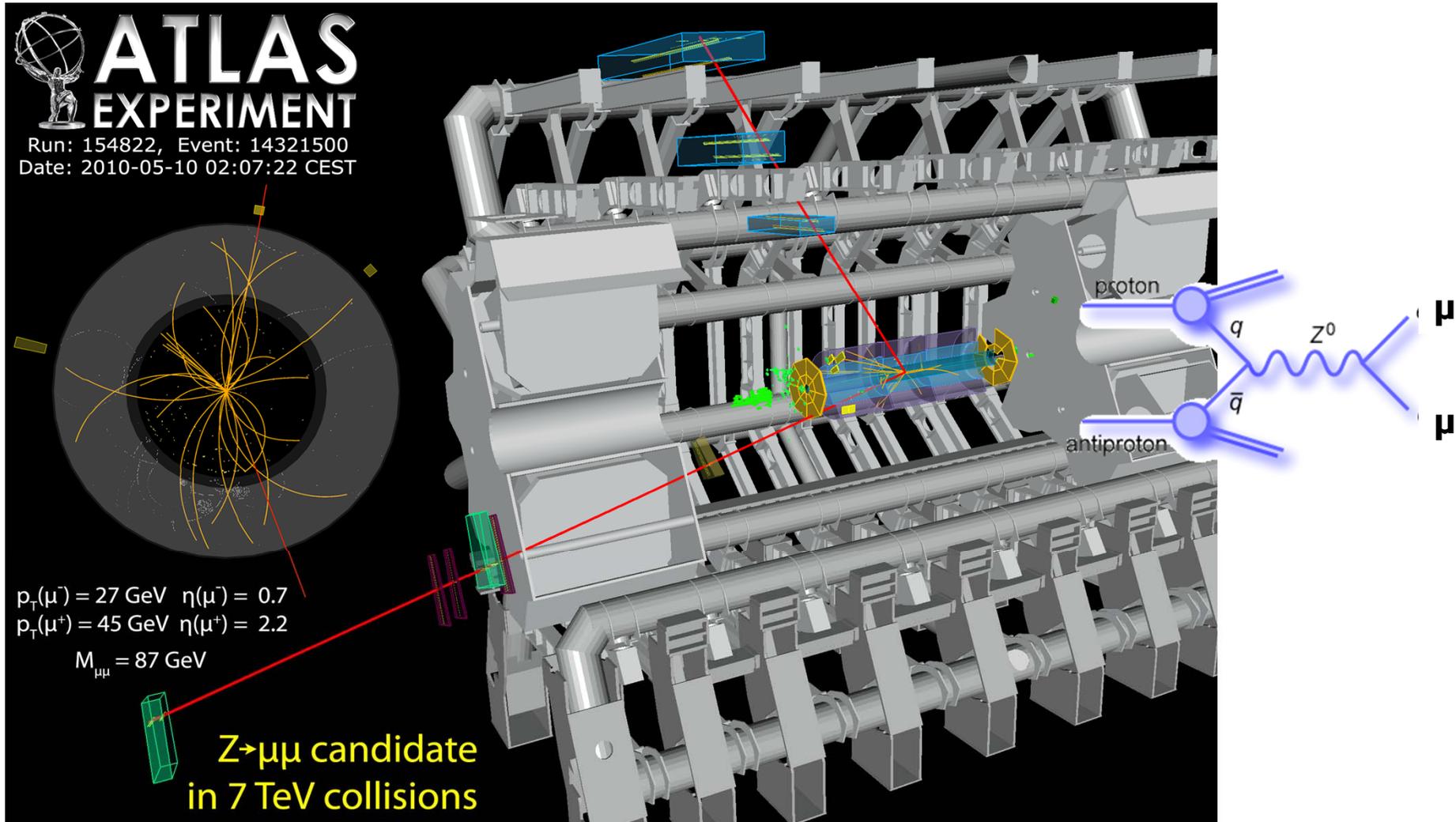


Gemeinsam mit der W-Entdeckung einer der wichtigsten Leistungen der Teilchenphysik des 20. Jahrhunderts!

# W-Boson am LHC



# Z-Boson am LHC

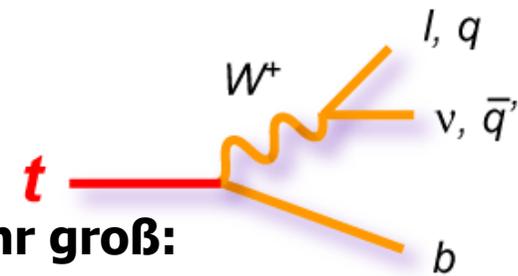
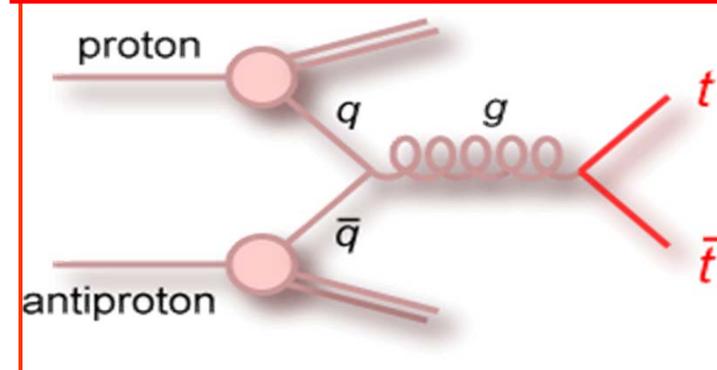
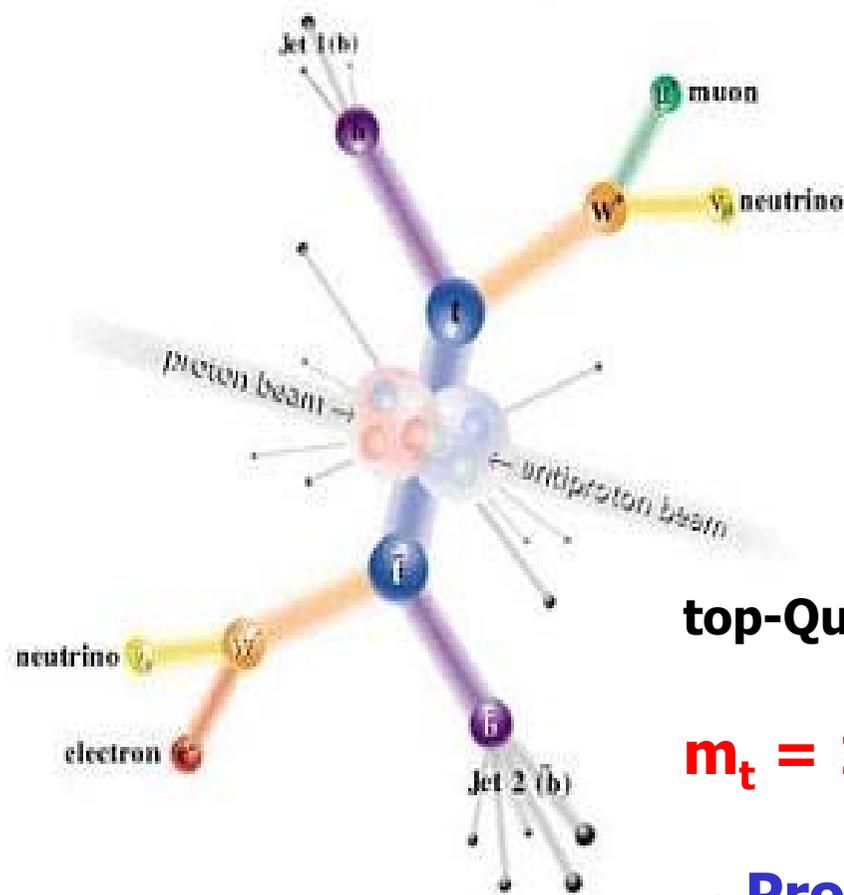


# Entdeckung des Top-Quarks



Produktion in Proton-Antiproton Kollisionen:

**1995 am TEVATRON**

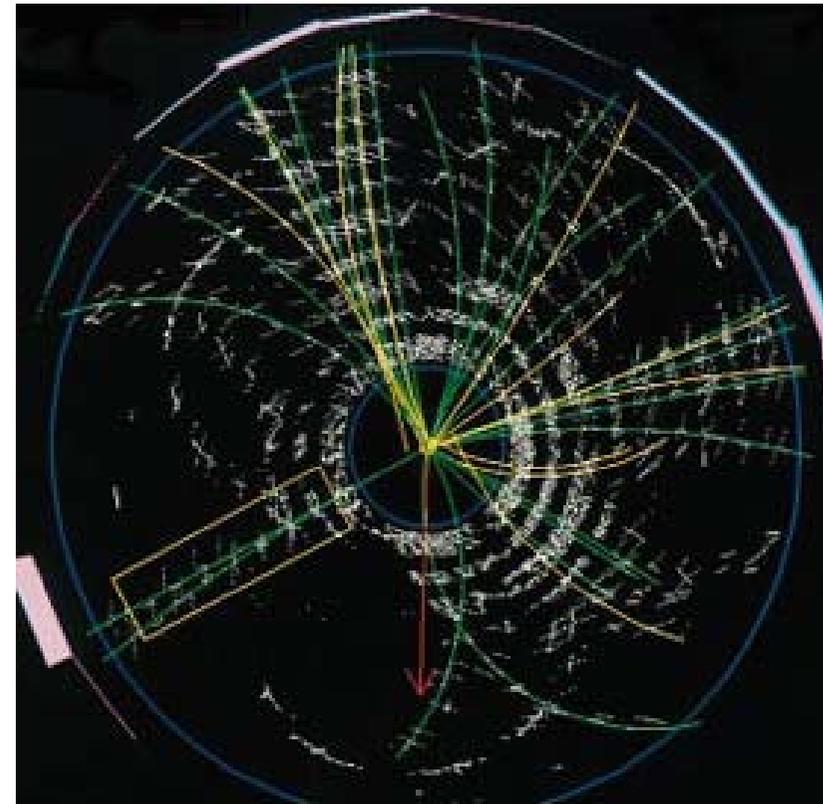
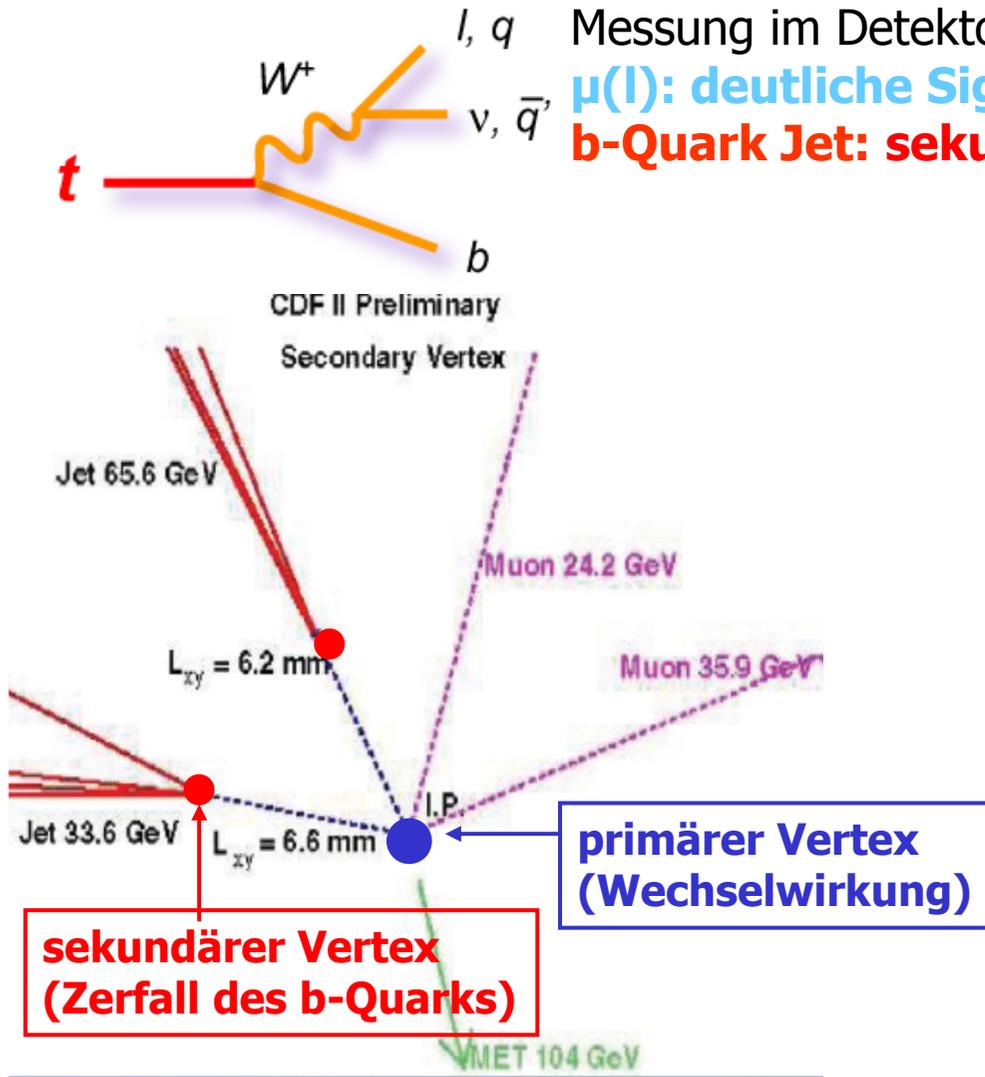


top-Quark Masse ist sehr groß:

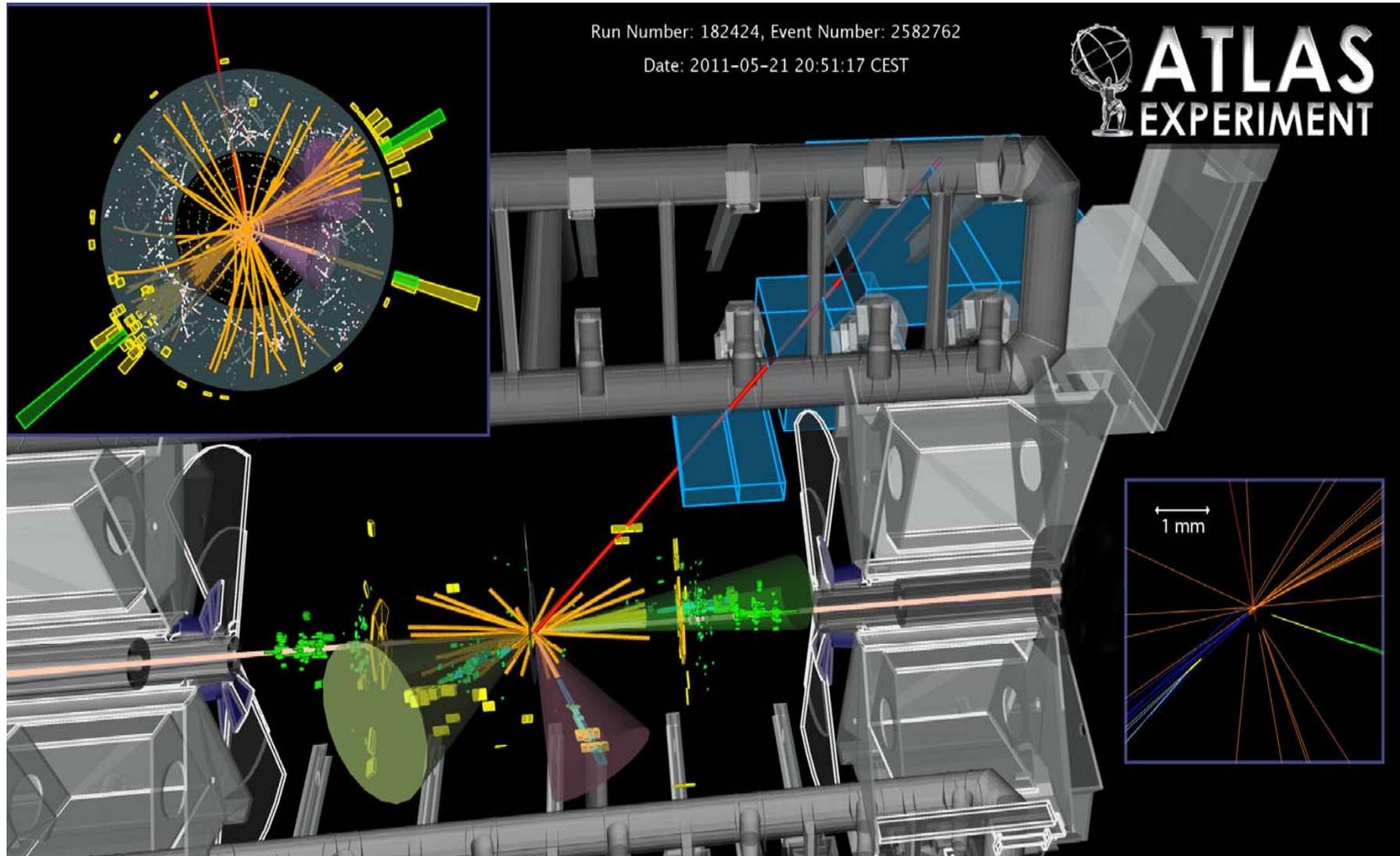
$$m_t = 173 \text{ GeV} > m_W$$

→ Produktion realer W-Bosonen

# Signatur eines Top-Quarks



# Top Ereignis im LHC



# Das Standard-Modell



## Fundamentale Teilchen:

**6 Quarks** (u, d, c, s, t, b)

**6 Leptonen** (e,  $\mu$ ,  $\tau$ ,  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\nu_\tau$ )

## Fundamentale Kräfte:

**starke Wechselwirkung** (g)  
**schwache Wechselwirkung** (W,Z)  
**elektromagnetische Wechselwirkung** ( $\gamma$ )

## Hart auf der Spur:

**Higgs-Boson**

erklärt, wie Teilchen Masse bekommen

## THE STANDARD MODEL

	Fermions			Bosons	
Quarks	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b><math>\gamma</math></b> photon	Force carriers
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom		
Leptons	<b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino		
	<b>e</b> electron	<b><math>\mu</math></b> muon	<b><math>\tau</math></b> tau	<b>g</b> gluon	

Higgs\*  
boson

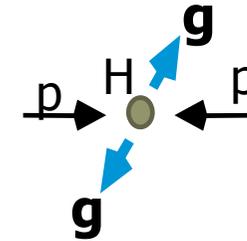
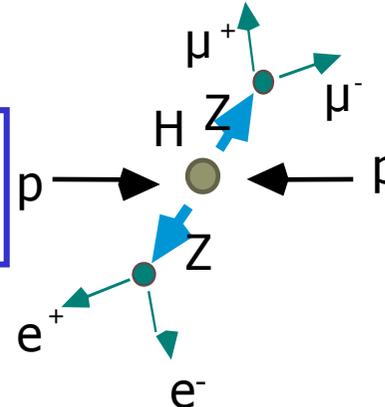
Yet to be confirmed

Source: AAAS

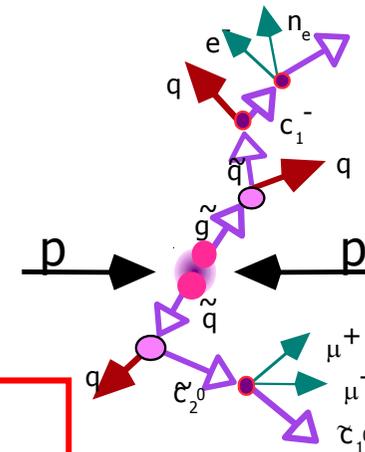
**sehr erfolgreiches Modell: bisher in allen experimentellen Tests gut bestätigt**

# Physikalische Fragestellungen am LHC

Elektroschwache Symmetriebrechung ?  
 - **Suche nach dem Higgs Boson**



Erweiterung des Standardmodelles ?  
 - **Suche nach SUSY oder anderer "BSM-Physik"**

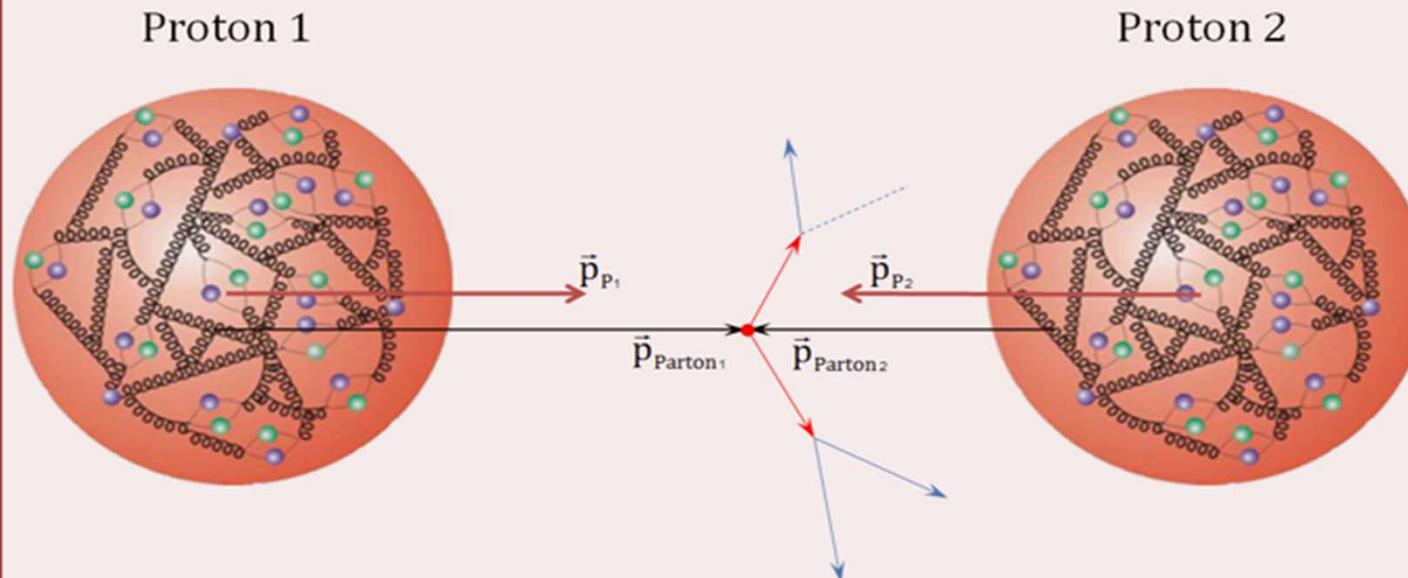


Was noch?

- **Schwere Quarks, QCD, Elektro-schwache Prozesse: Physik des Standardmodells**
- **Physik des Top-Quarks**
- **Kollisionen von Schwerionen (Pb)**

# Teilchenkollision zweier Protonen

Wechselwirkung von Teilen der beiden kollidierenden Protonen – den sog. Partonen (Quarks, Gluonen)



$\vec{p}_{P_1}$  ... Gesamtimpuls Proton 1

$\vec{p}_{P_2}$  ... Gesamtimpuls Proton 2

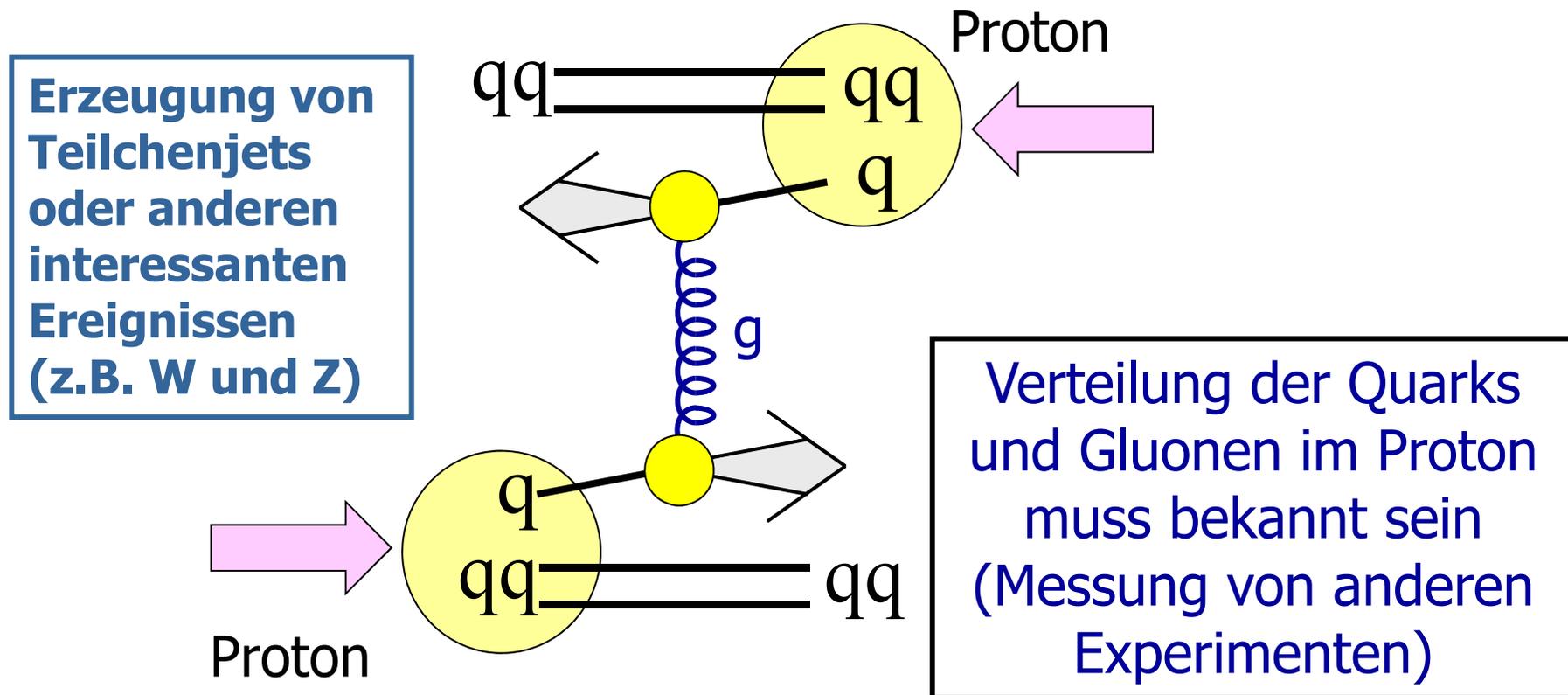
• Wechselwirkungspunkt

$\vec{p}_{\text{Parton 1}}$  ... Impuls Parton 1

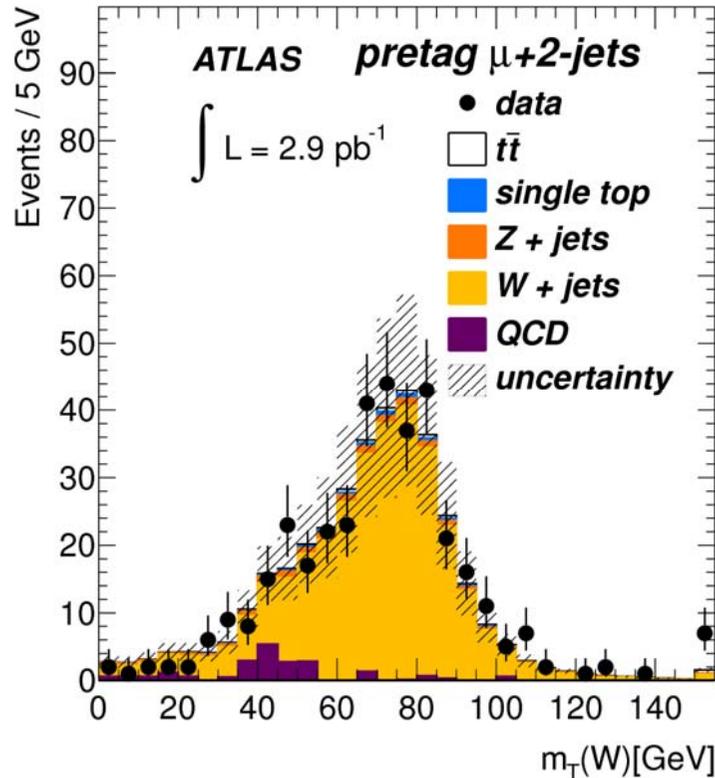
$\vec{p}_{\text{Parton 2}}$  ... Impuls Parton 2

# Harte Kollision von Protonen

LHC: Kollision **freier** Quarks und **Gluonen** im Proton

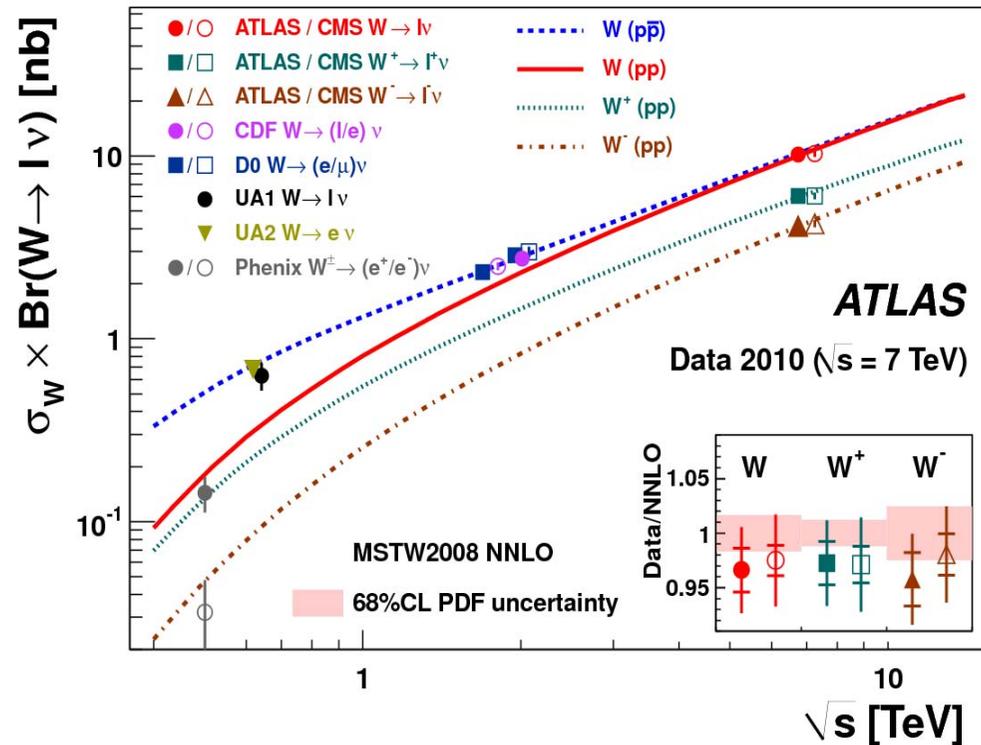


# Vermessung des W-Bosons

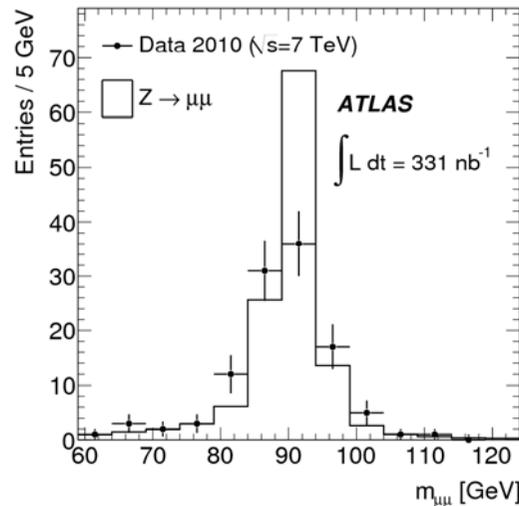
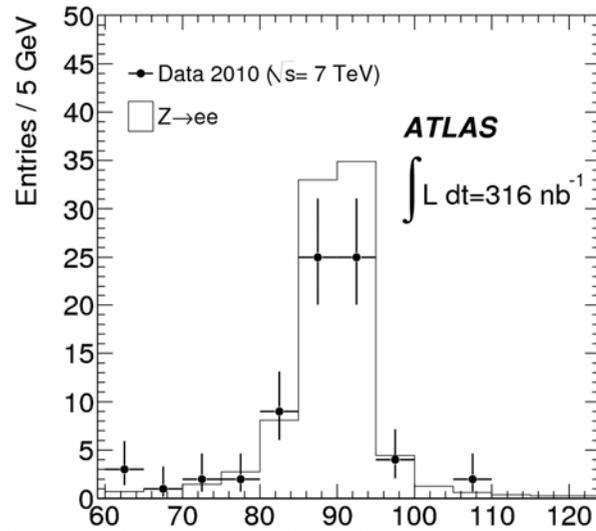


Bestimmung der W-Boson Masse

Bestätigung der theoretischen Vorhersage

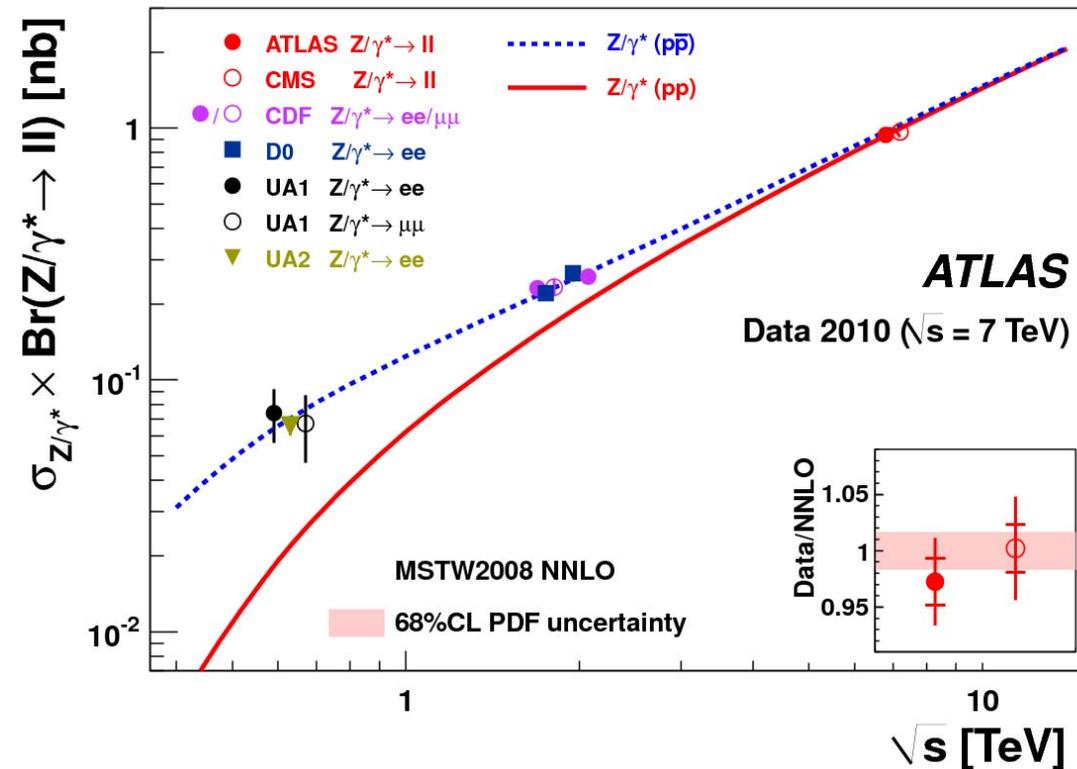


# Vermessung des Z-Bosons

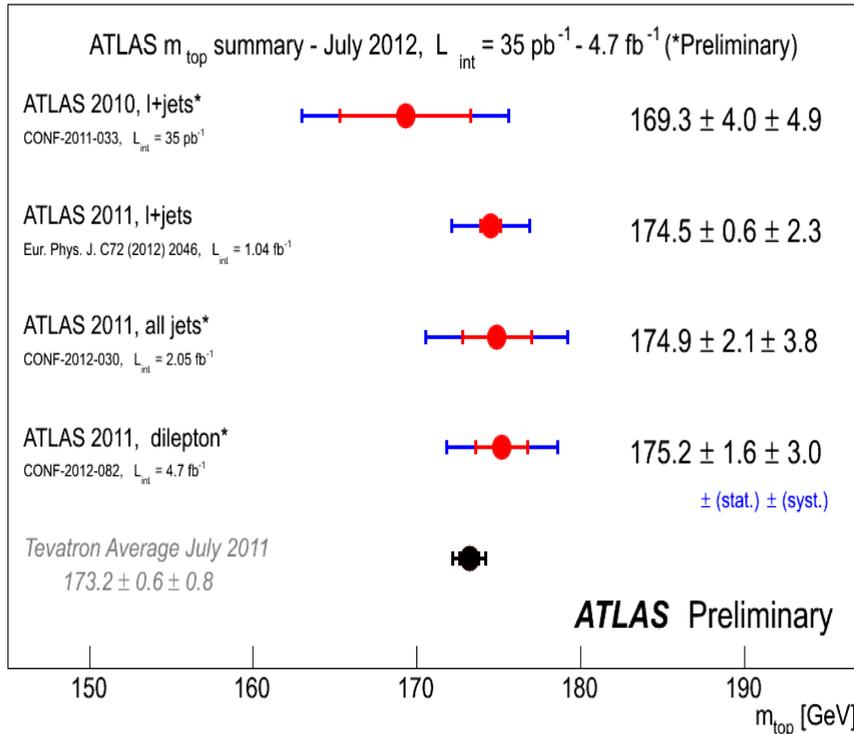


Bestimmung der Z-Boson Masse

Bestätigung der theoretischen Vorhersage

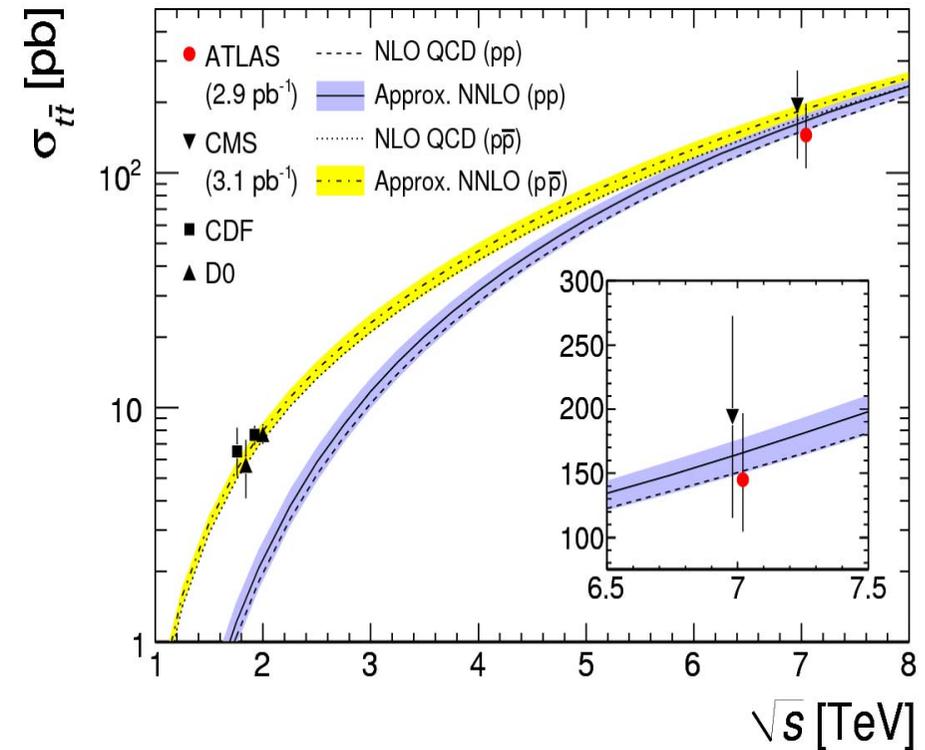


# Vermessung des Top-Quarks



## Bestimmung der Top-Quark Masse

## Bestätigung der theoretischen Vorhersage

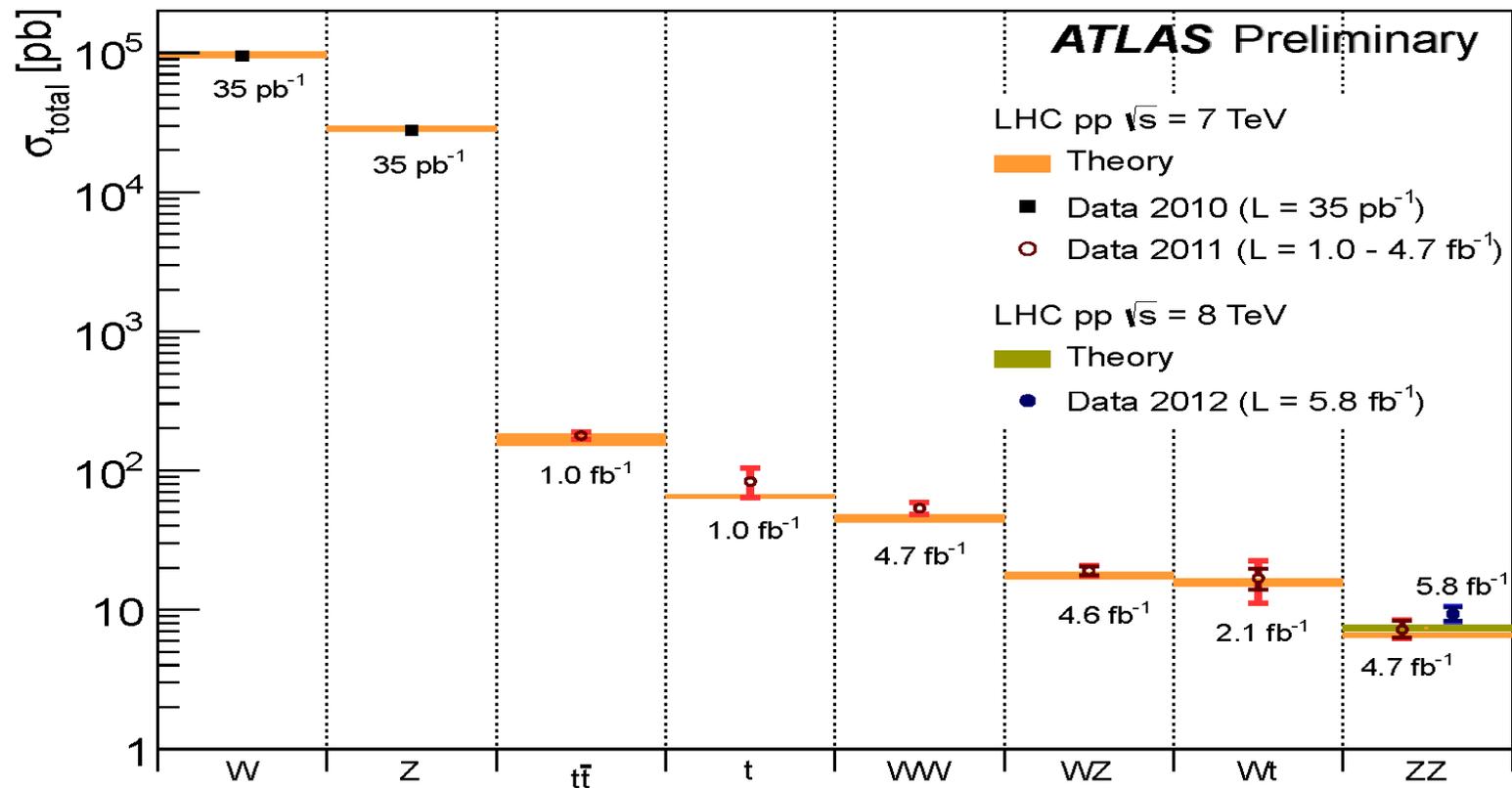


# Vermessung des Standardmodelles



Alle Messungen sind in perfekter Übereinstimmung mit dem Standardmodell

esentielle Voraussetzung für Suche nach neuer Physik



# Offene Fragen



Das Standard-Modell der Teilchenphysik hat bis jetzt allen experimentellen Tests erfolgreich standgehalten, lässt aber viele Fragen offen:

- Woher kommt die Masse (**Higgs-Teilchen**)?
- Was ist der Ursprung der Materie und wo ist die fehlende Antimaterie (**CP-Verletzung**)?
- Gibt es **eine fundamentale Kraft**?
- Welche **Symmetrie** liegt unserer Welt zugrunde?
- Gibt es **zusätzliche Dimensionen**?
- Kennen wir alle Teilchen (**Supersymmetrie, 4. Generation**)?
- Wir kennen nur einen kleinen Teil des Universums (**Dunkle Materie und dunkle Energie**)!

**Um Neues zu entdecken, muss man neue Dinge tun:**

Der **Large Hadron Collider** (Proton-Proton) mit den Experimenten **ATLAS** und **CMS** am Europäischen Forschungszentrum **CERN** in Genf



# Das Forschungszentrum CERN und der LHC

# Experimentelle Grundlagen



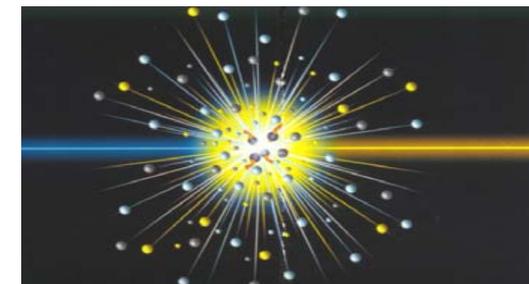
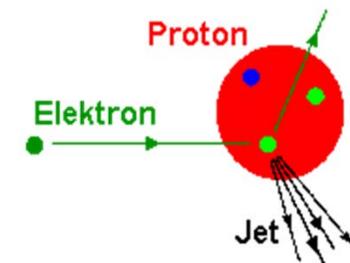
- **Experimente mit hochenergetischen Teilchen**
  - Beschleuniger
  - Detektoren (Experimente)
- Nachweis durch Wechselwirkungen mit Materie
- **Verschiede Arten von Beschleuniger**
  - Abhängig von der beschleunigten Teilchenart
  - Entdeckung oder Präzisionsmessung
  - Komplementäre Experimente

# Experimente mit Teilchenstrahlen



Teilchenstrahlen höchster Energie sind notwendig, denn mit steigender Energie  $E$  (bzw. Impuls  $p$ ) der Projektile steigt

- die Fähigkeit, **kleine Strukturen  $\Delta x$  zu erkennen**  
 $\Delta x \Delta p = \hbar$  (Heisenberg)
- die Fähigkeit, **neue schwere Teilchen zu erzeugen**  
 $E = mc^2$  (Einstein)
- **Streuexperimente:**
  - Kollision von Teilchenstrahlen mit Materie
  - Kollision von zwei Teilchenstrahlen



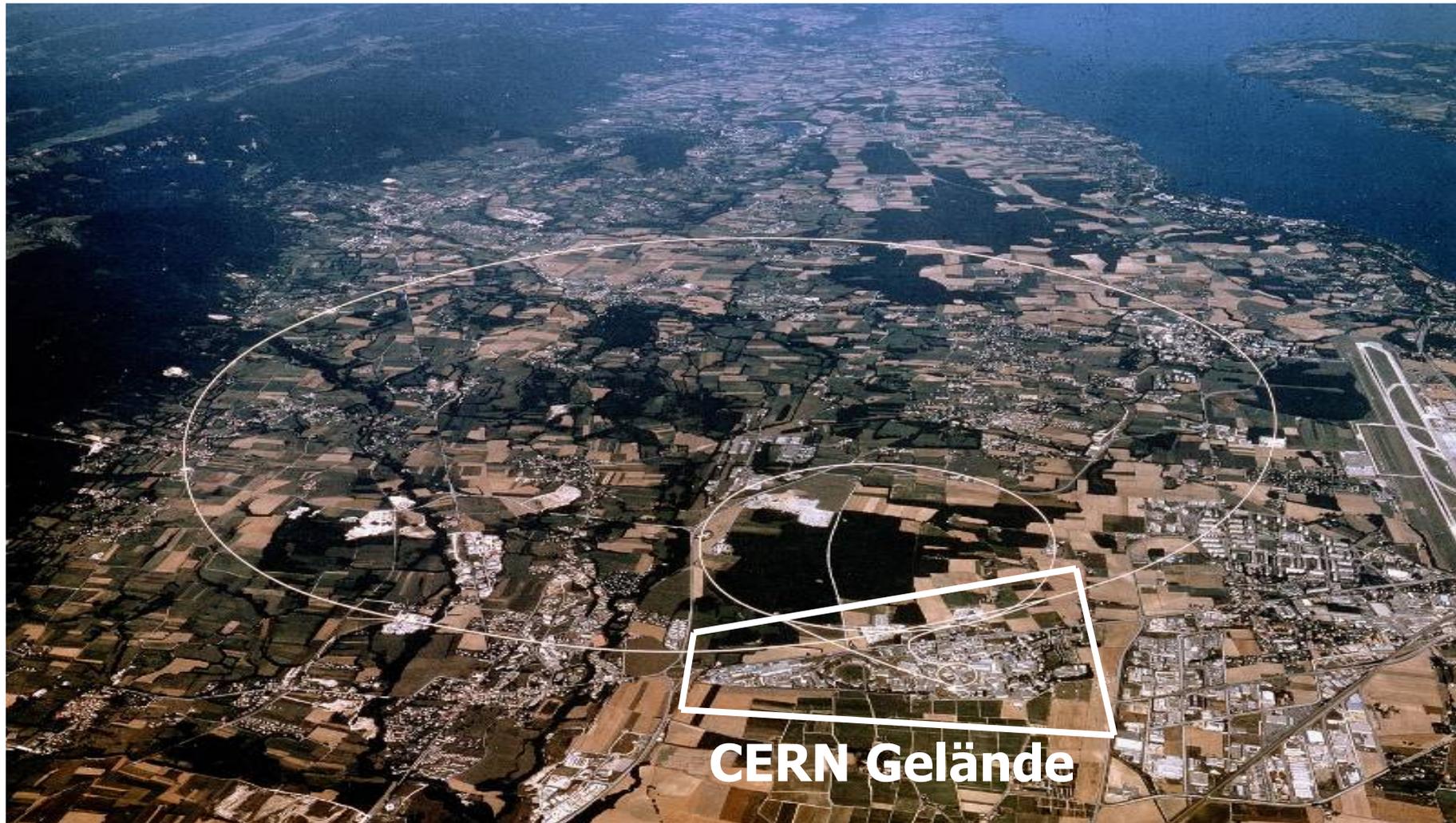
# Das CERN



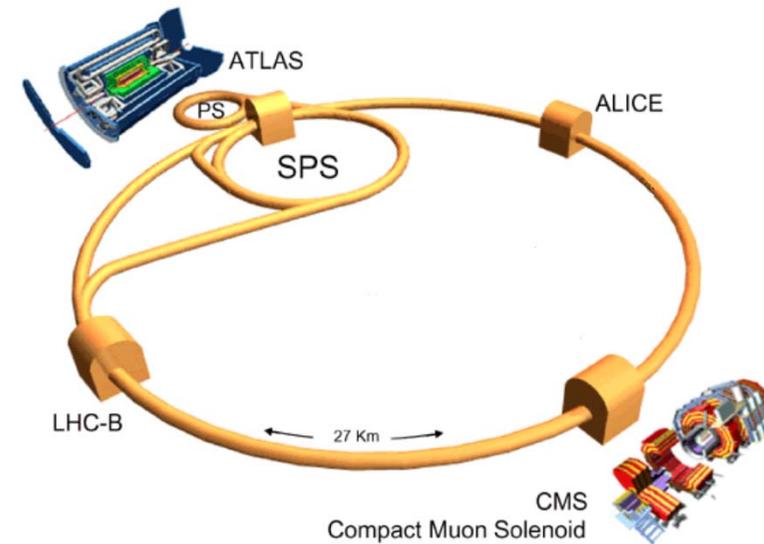
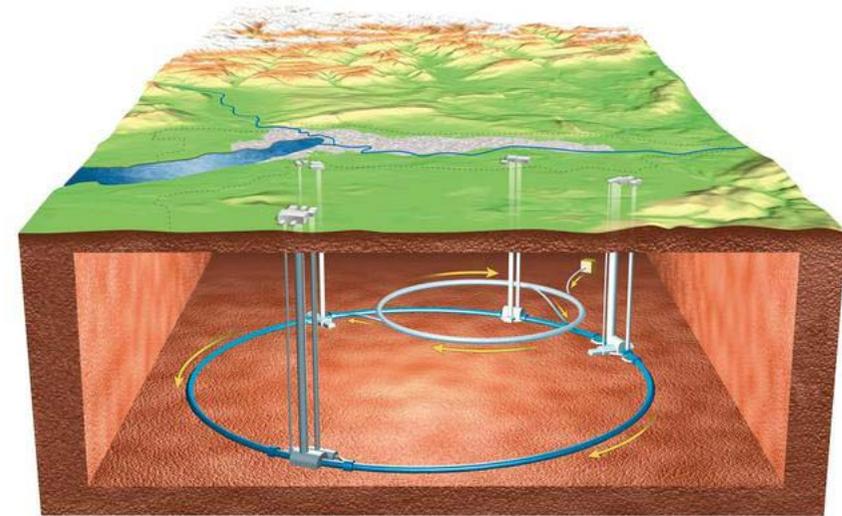
## Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire

<b>Standort</b>	Genf (Schweiz und Frankreich)
<b>Mitgliedstaaten</b>	20 Europäische Nationen
<b>Budget pro Jahr</b>	~ 700 Millionen Euro (davon 20 % aus Deutschland)
<b>Mitarbeiter vor Ort</b>	~ 3.400, weltgrößtes Forschungszentrum
<b>Beteiligte WissenschaftlerInnen</b>	~8.000 aus 85 Nationen

# Das Forschungszentrum CERN in Genf



# Der Beschleuniger LHC

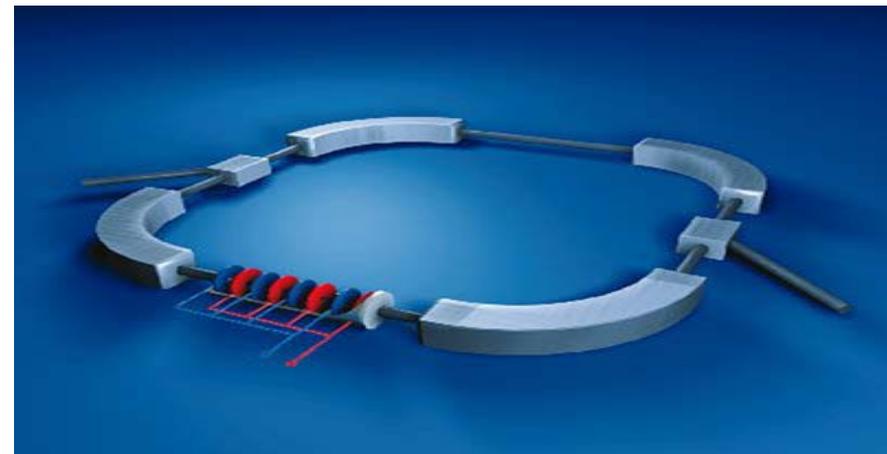
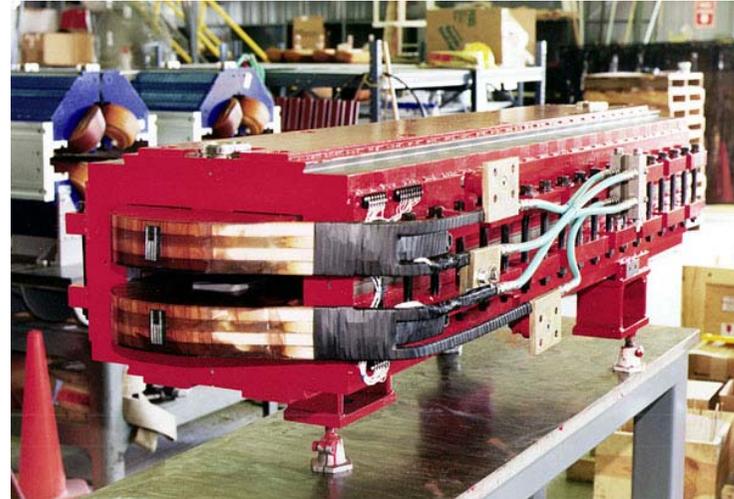


Ringtunnel mit Umfang von 27 km  
in 50 – 175 m Tiefe in Genf

# Das Synchrotron



- Höhere Energien durch wiederholten Durchlaufen derselben Beschleunigungsstrecke
  - **Ringbeschleuniger**
- Krümmung der Teilchenstrahlen durch geeignete Ablenkmagnete
  - **Dipolmagnete**
- Magnetfeldstärke muß **synchron** mit der Energie der Teilchenstrahlen ansteigen
  - **Synchrotron**



# Eigenschaften des LHC

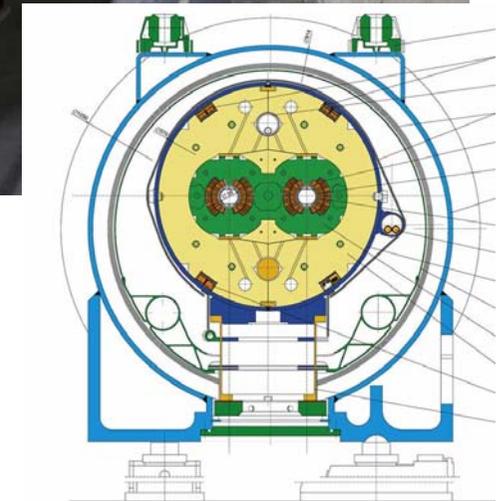
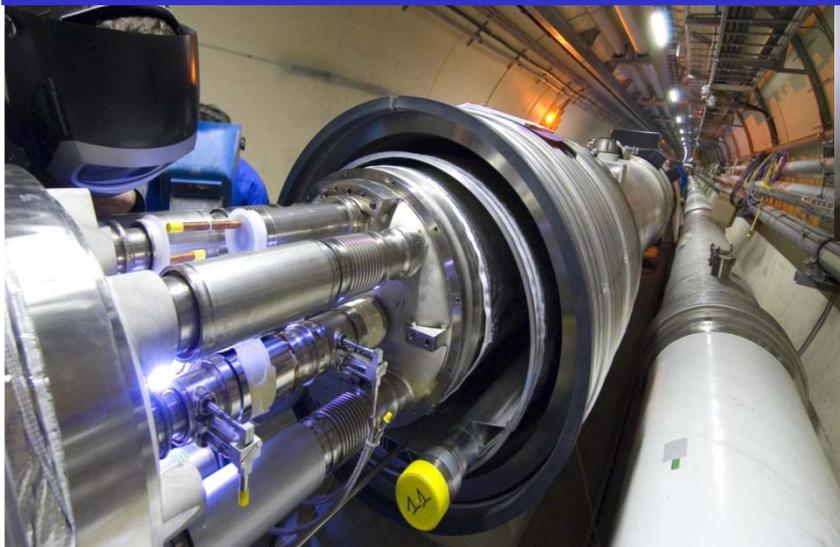


- Steigerung der **Schwerpunktenergie**  
(Energie, die zur Erzeugung neuer Teilchen zur Verfügung steht) auf **7000 GeV (2011), 8000 GeV (2012), 14000 GeV (ab 2015)**
- Erlaubt die **Entdeckung neuer Teilchen** sowie den Zugang in bislang **unerforschte Bereiche** im Standardmodell der Teilchenphysik:
  - **Higgs (Standardmodell)**
  - **Supersymmetrische Teilchen (Erweiterung des Standardmodells)**
- Enorme Steigerung der **Luminosität** (ein Maß für die **Rate der Teilchenkollisionen**) um **einen Faktor 100**

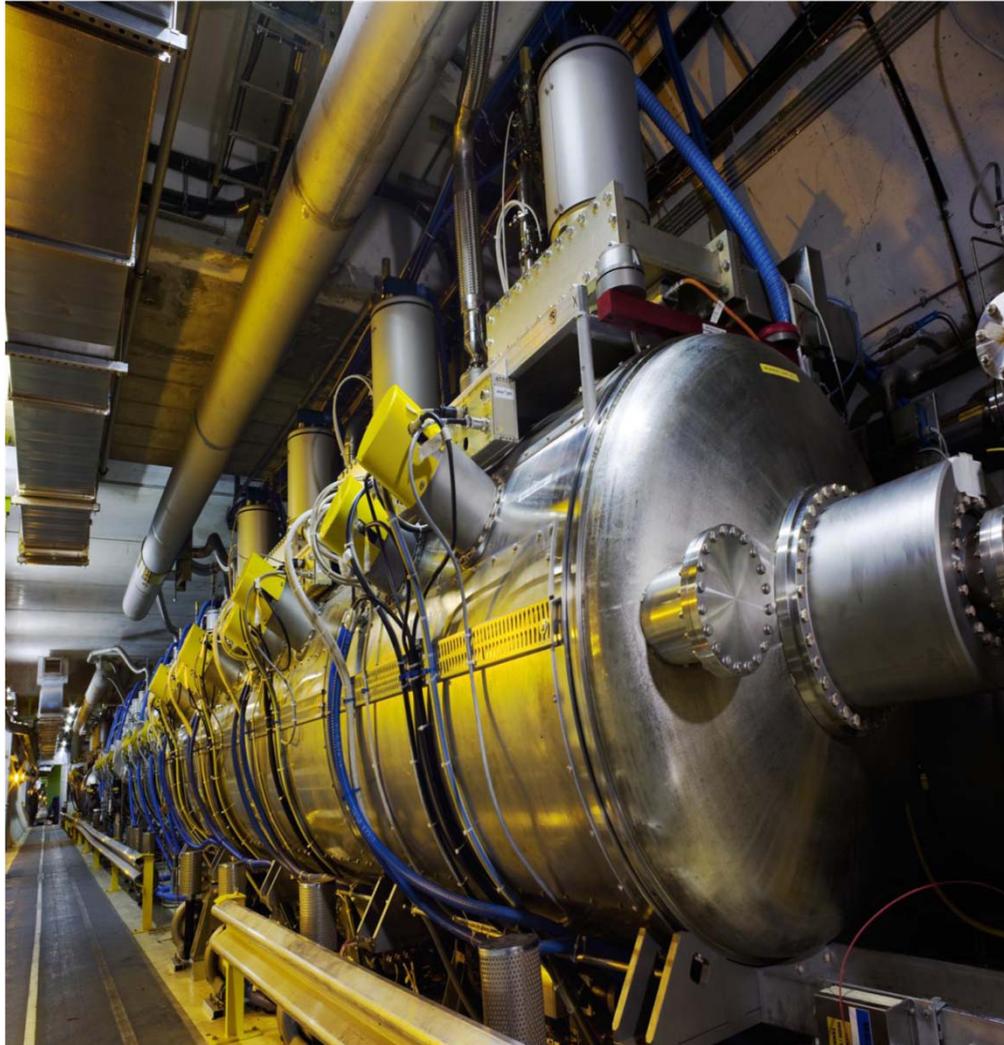
# Die LHC Magnete

## Supraleitende Magnete:

$L = 15 \text{ m}$ ,  $M = 30 \text{ t}$ ,  $B = 8.33 \text{ T}$   
Totale magnetische Energie: 10 GJ  
Temperatur: 1.9 K, Strom: 11700 A  
Kühlung: super-fluides Helium  
1232 Ablenkmagnete (Strahlführung)  
7600 weitere Magnete (kleinere)  
93 Tonnen Helium im Beschleuniger  
40.000 Tonnen kalte Masse im Tunnel



# Der "eigentliche" LHC Beschleuniger



Hochfrequenz System  
zur Beschleunigung der  
Strahlen:

Mikrowellen in **supra-  
leitenden Kavitäten**  
(16 Mio Volt)

**8** Kavitäten im LHC

Energiezufuhr: **5 MeV/m**

Magnete dienen nur  
der Strahlführung

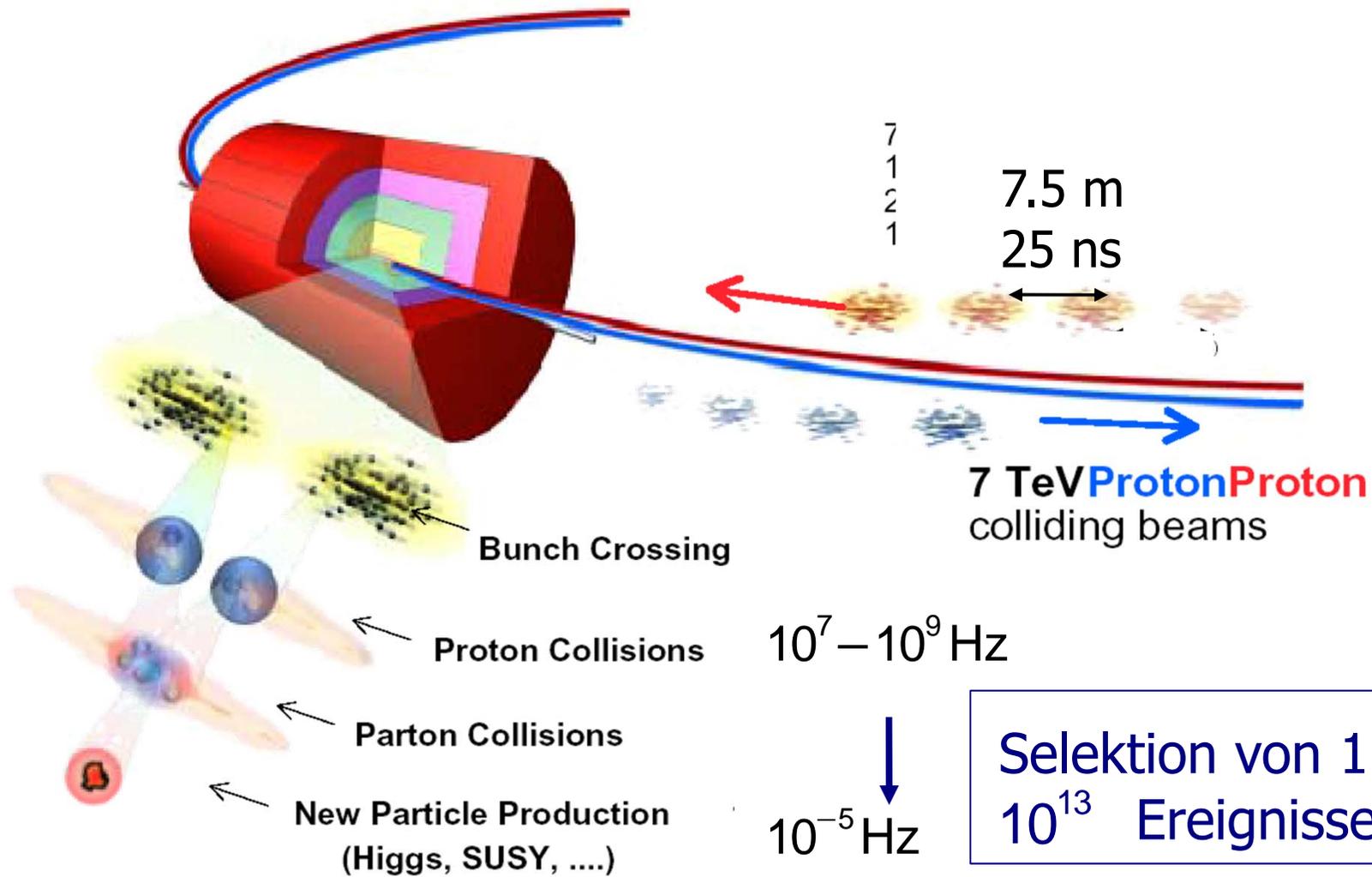
# Das CERN Control Center



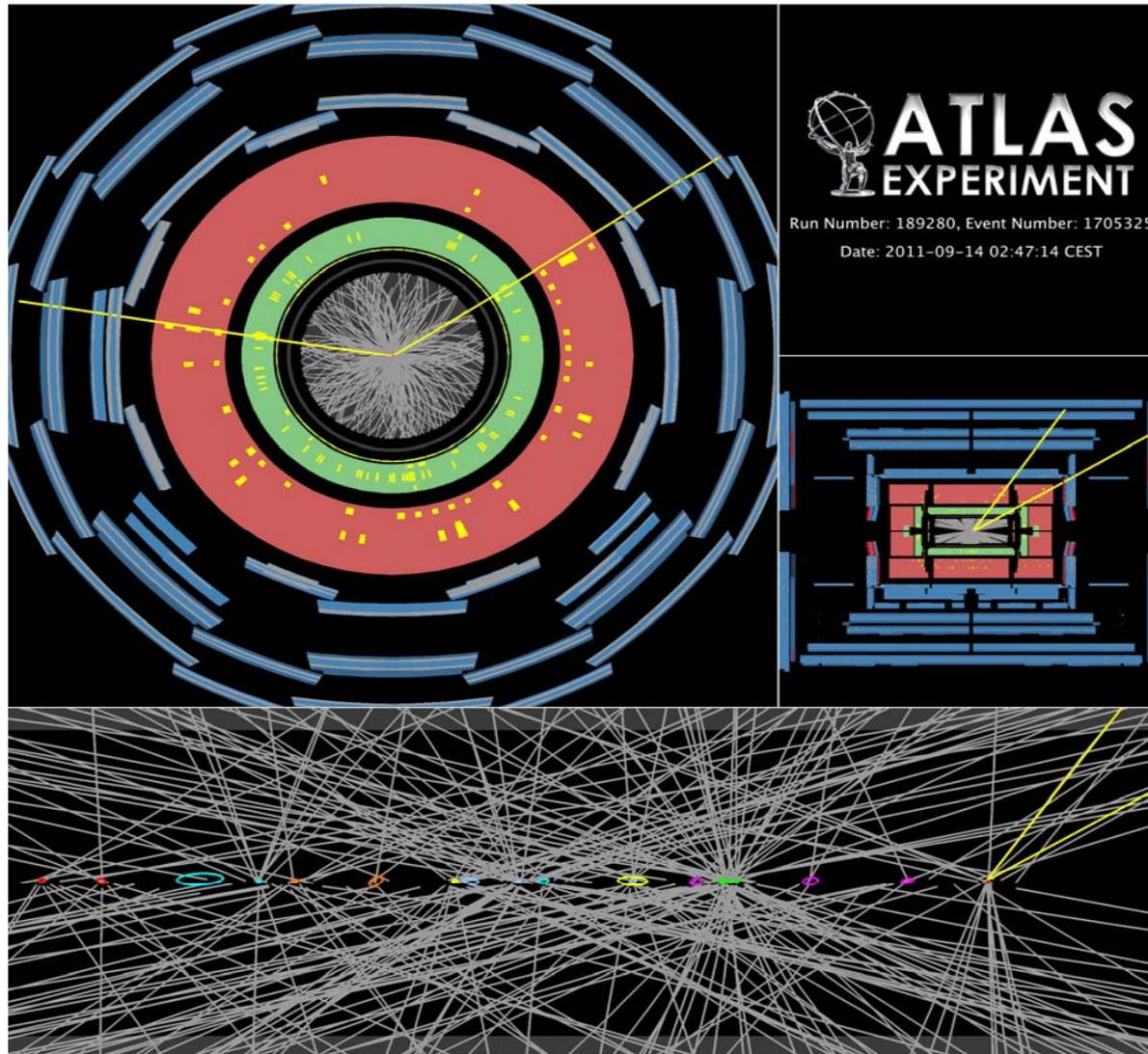
Kontrollraum aller Beschleunigeranlagen



# Teilchenkollisionen bei LHC

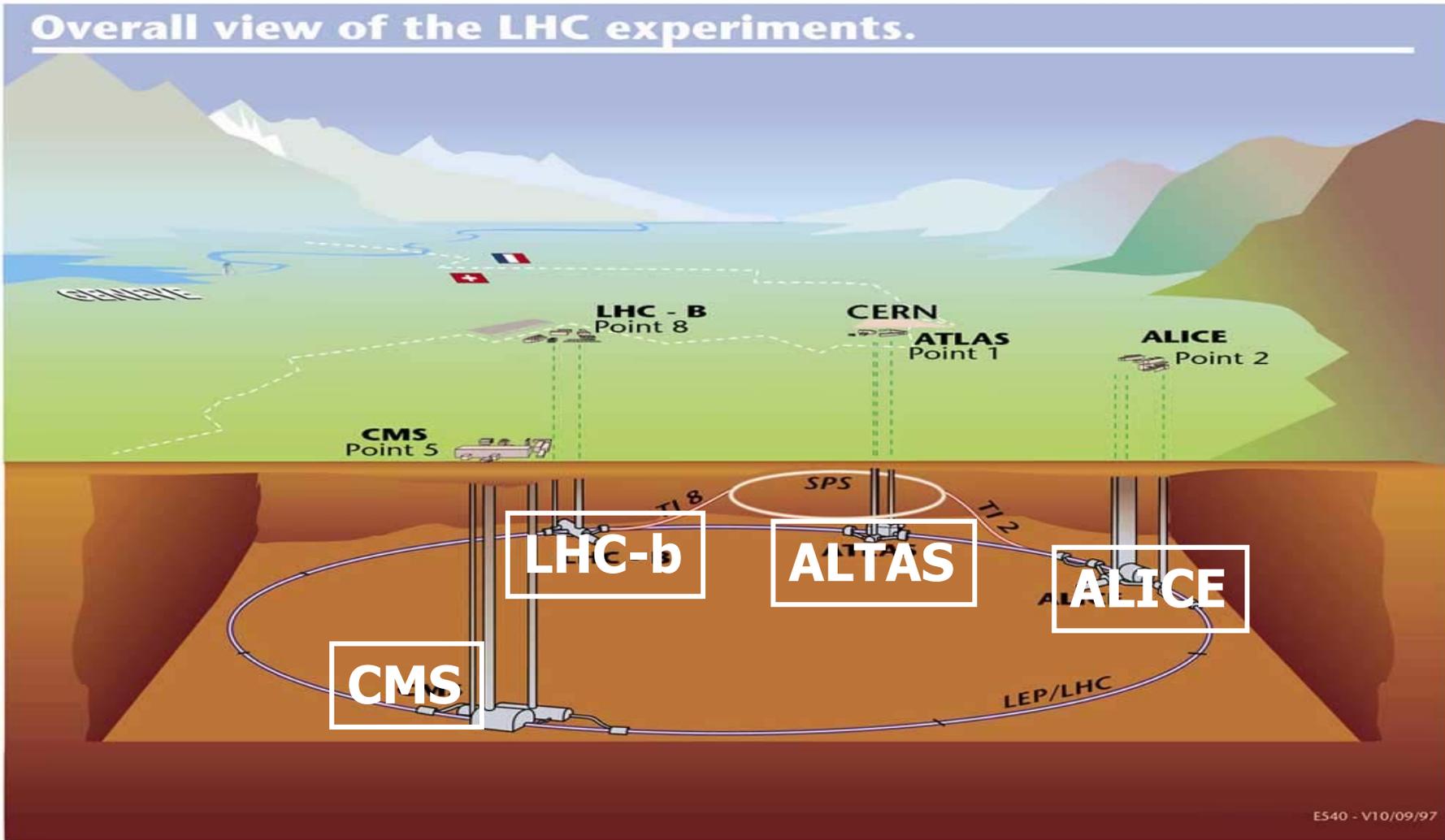


# Proton-Proton Kollision im Detektor



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

# Die 4 Experimente am LHC



# ATLAS: weltweite Kollaboration



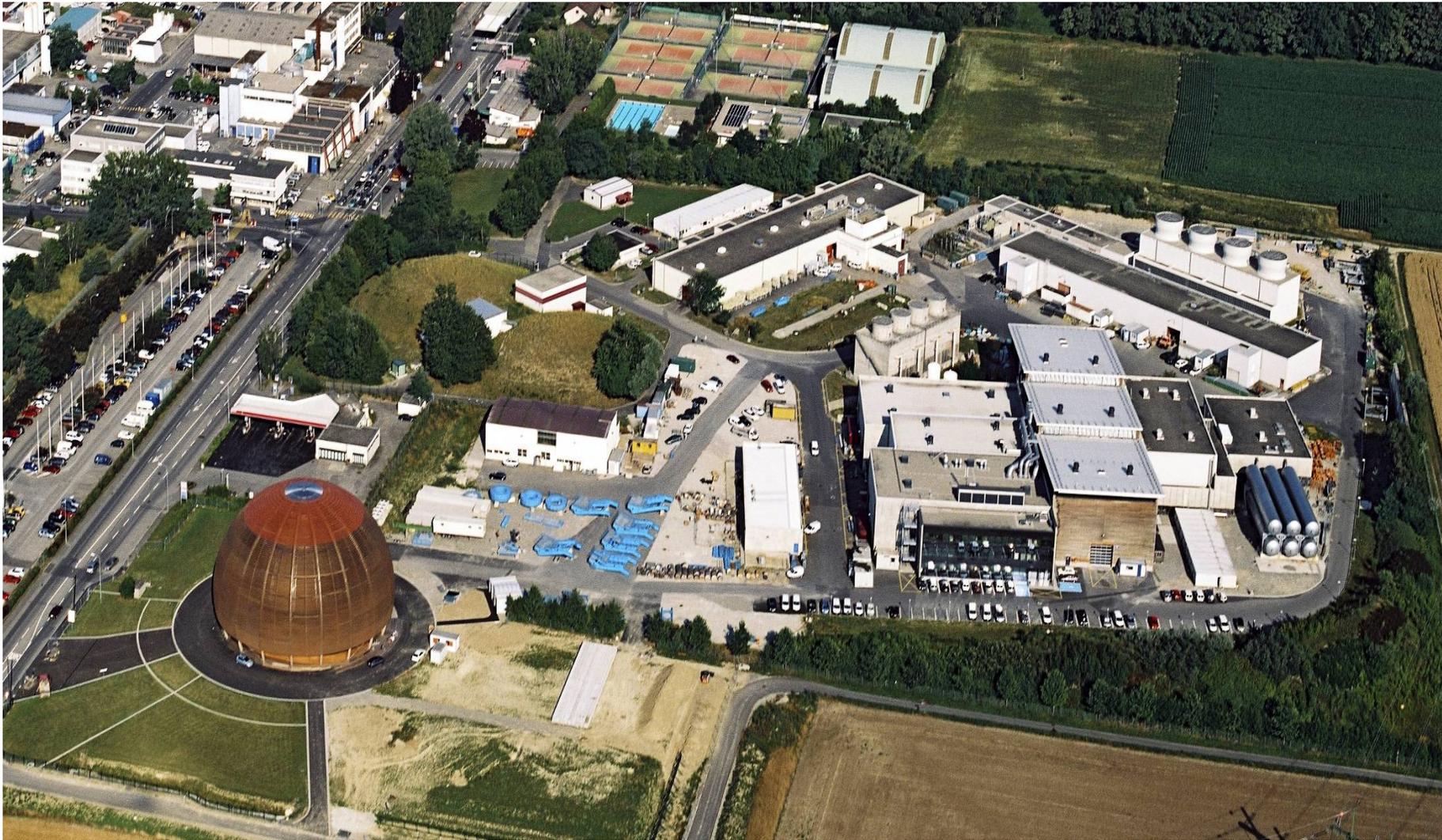
(Status 2010)

**37 Länder**  
**173 Institute**  
**3000 Wissenschaftler**

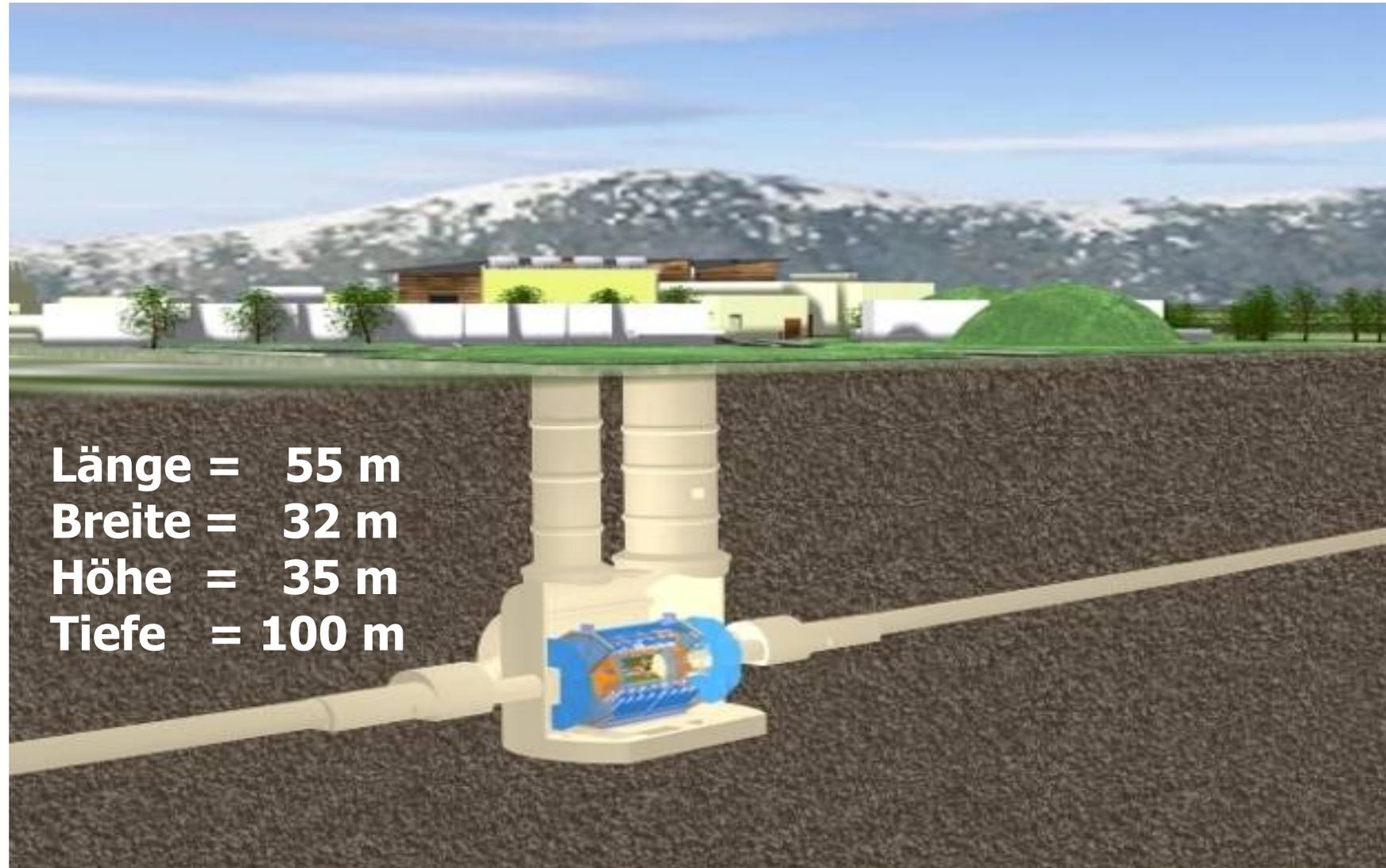


Albany, Alberta, NIKHEF Amsterdam, Ankara, LAPP Ancey, Argonne NL, Arizona, UT Arlington, Athens, NTU Athens, Baku, IFAE Barcelona, Belgrade, Bergen, Berkeley LBL and UC, Bern, Berlin (HU), Birmingham, Bologna, Bonn, Boston, Brandeis, Bratislava/SAS Kosice, Brookhaven NL, Bucharest, Cambridge, Carleton,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

# Das ATLAS-Areal überirdisch



# Die unterirdische Kaverne von ATLAS



# Datennahme bei ATLAS



24-Stunden Schichtbetrieb

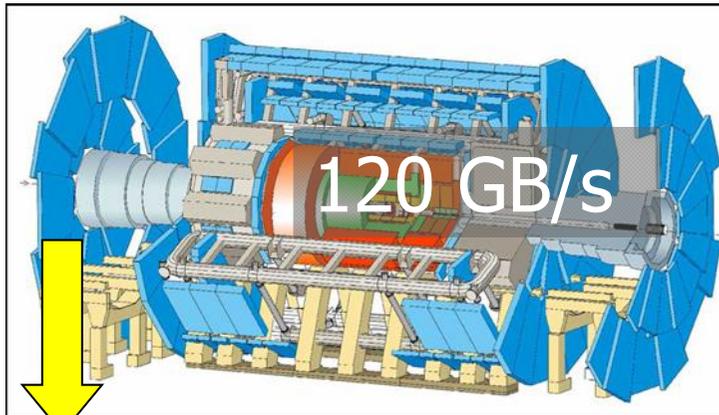
Immer 10 Leute im Kontrollraum, ca. 30 weitere Experten immer in Rufbereitschaft



**Der ATLAS Kontrollraum:**

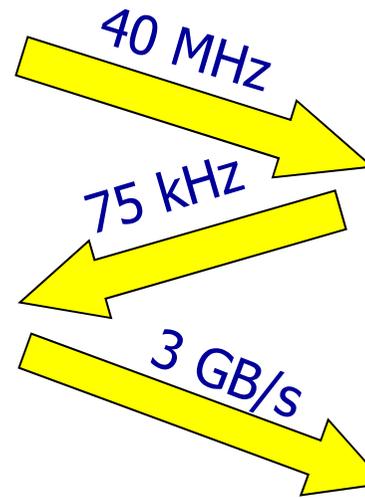
**Steuerung der Datennahme,  
Bedienen der Detektoren,  
Überwachung des Experimentes**

# Datennahme und Speicherung



120 GB/s

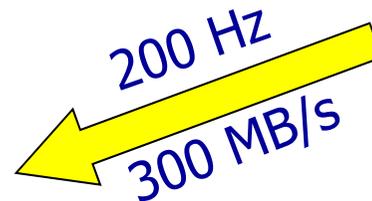
Auslesespeicher



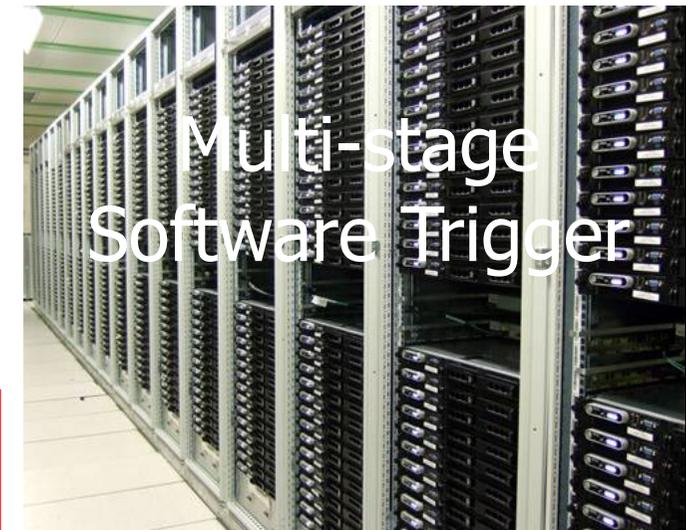
Hardware Trigger



Massenspeicher



**1 Petabyte  
pro Jahr  
( $10^6$  Gigabyte)**

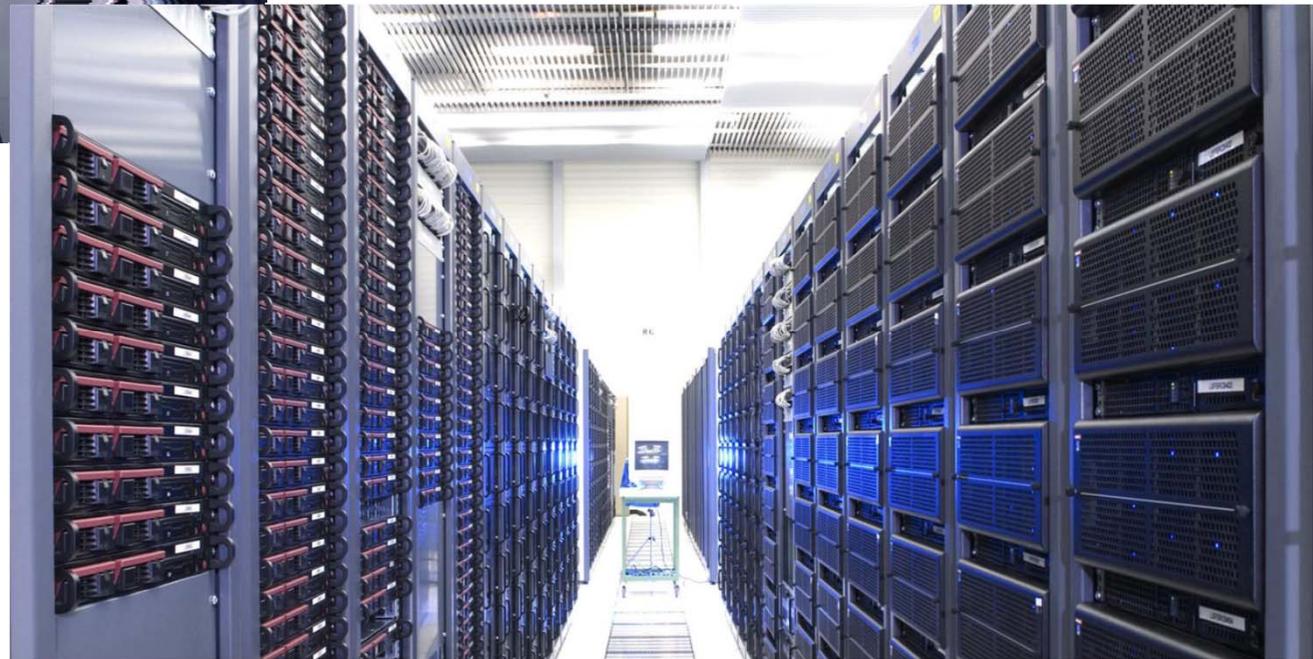


Multi-stage  
Software Trigger

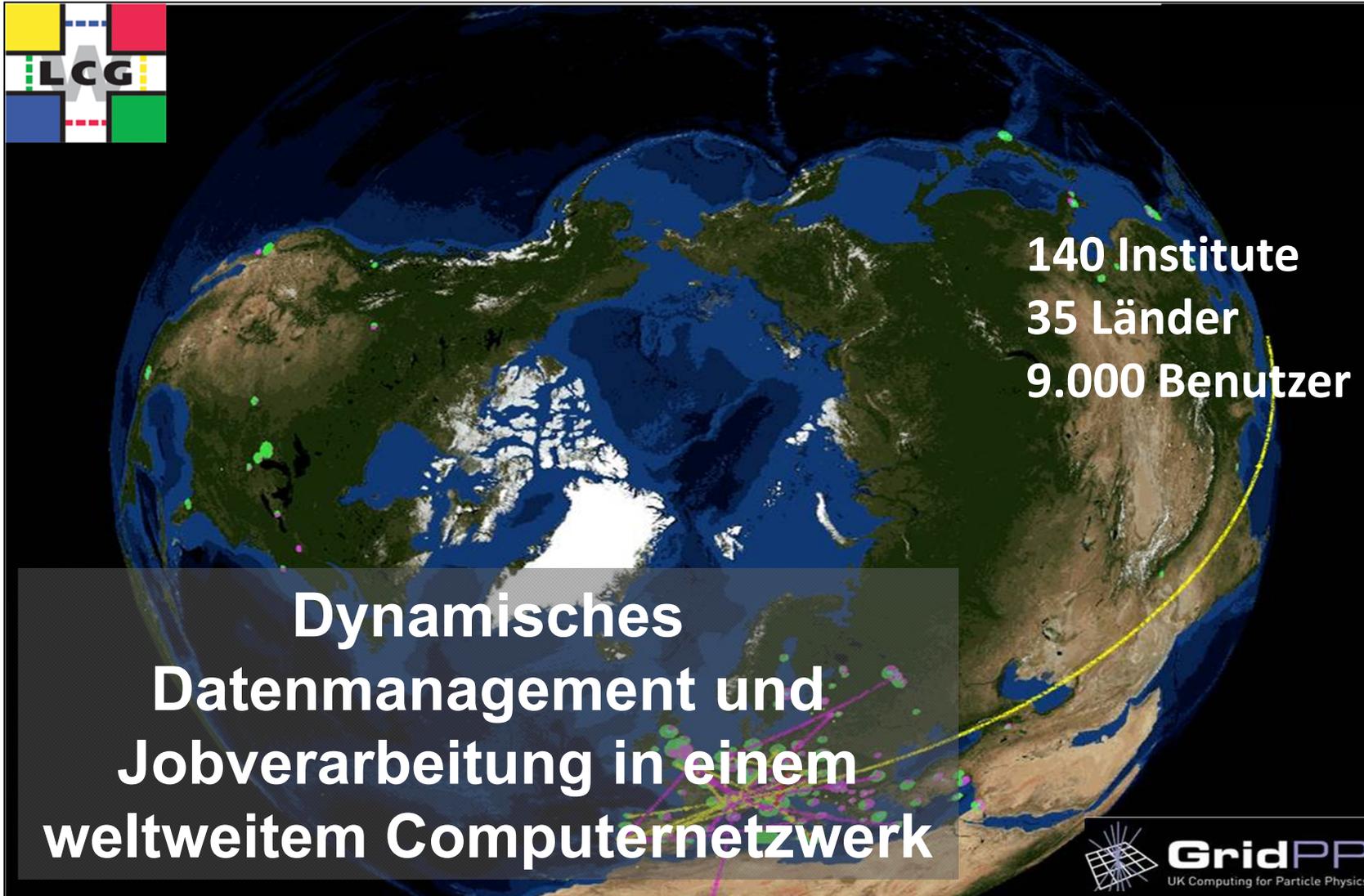
# Das CERN Rechenzentrum



Weltweit eines der  
größten Rechenzentren

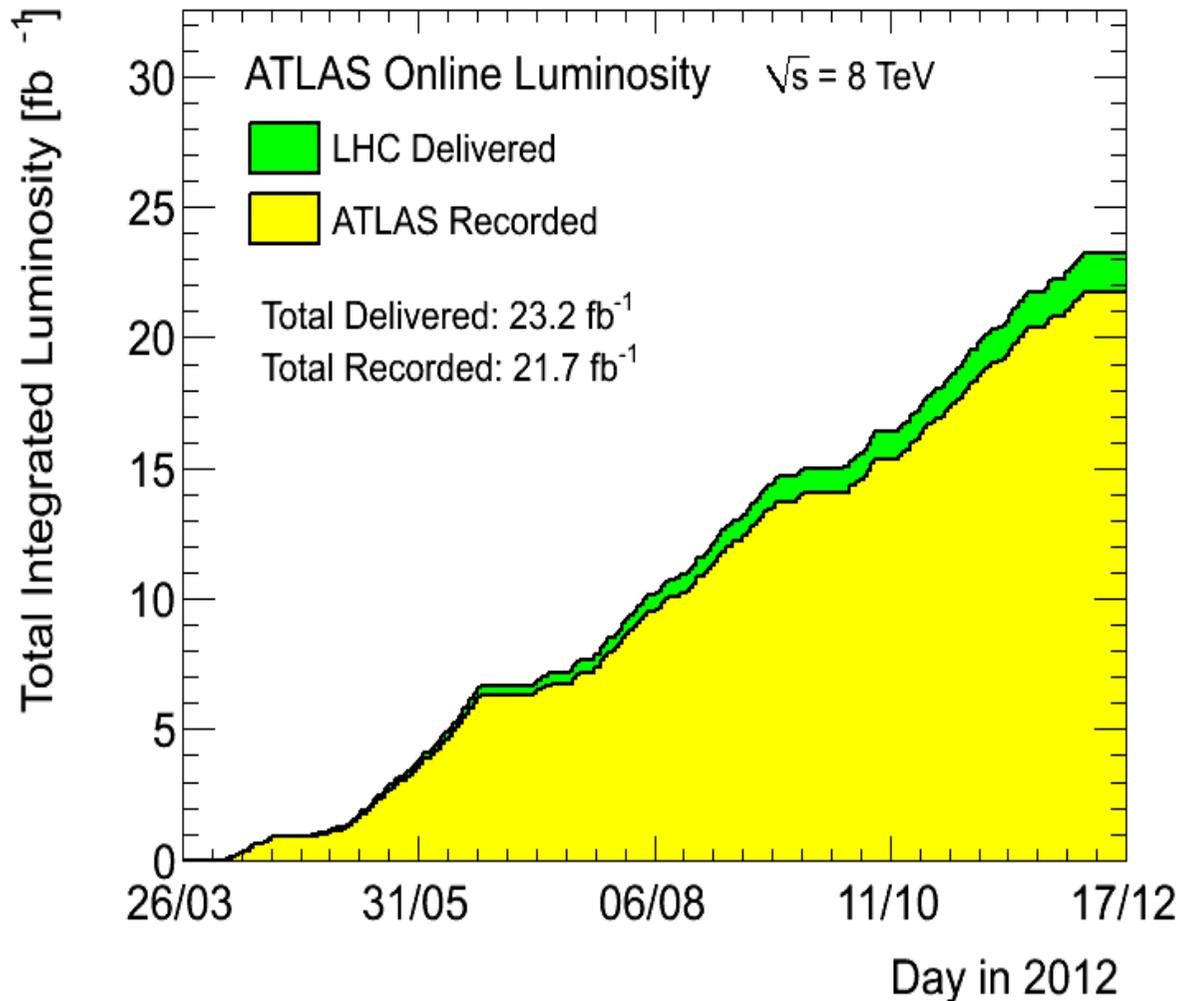


# Computing





# Datennahme 2012



aufsummierter  
Datensatz  
als Funktion  
der Zeit

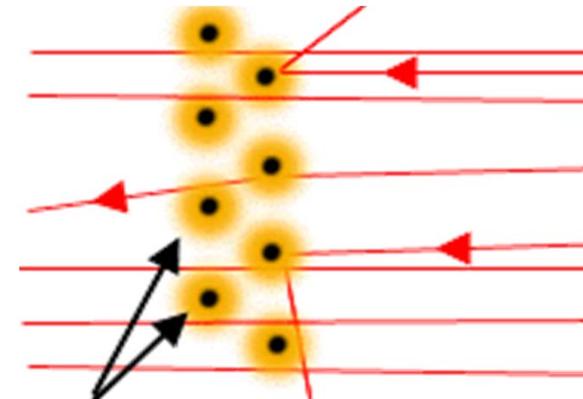
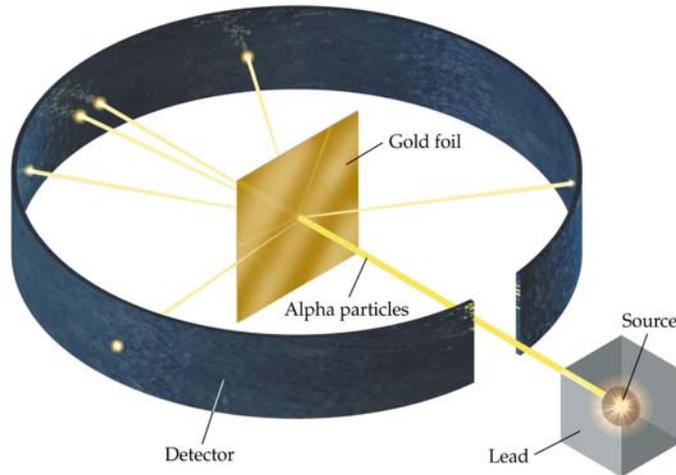
Funktionalität  
konnte eindrucks-  
voll getestet  
werden

Daten von höchster  
Qualität

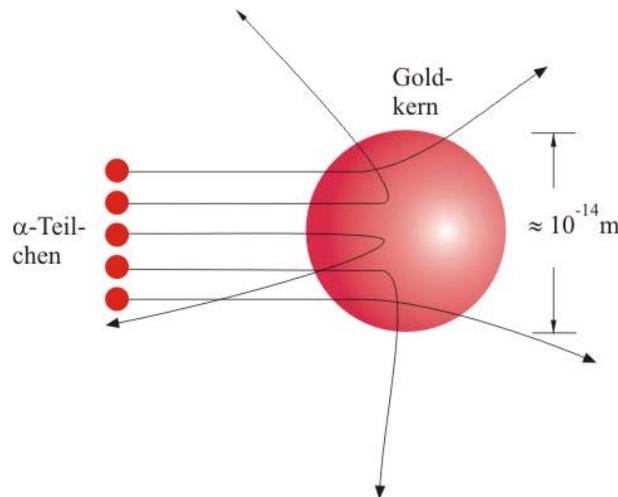
# Streuversuche: Unsichtbares sichtbar machen



## E. Rutherford: Struktur der Atome durch Streuversuche



**Goldatome in einer Folie**



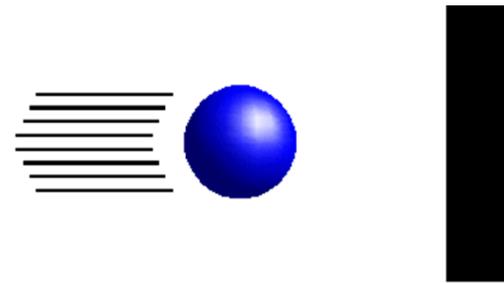
Streuwinkelverteilung hängt direkt mit der Materieverteilung im Atom zusammen:

**indirekte Messung der Substruktur**

# Vom Beschleuniger zum Collider



Ein **Beschleuniger** lenkt einen Strahl von beschleunigten Teilchen auf ein festes Ziel.



**Collider** – zwei kombinierte Beschleuniger:  
Zwei Teilchenstrahlen werden beschleunigt  
und zur Kollision gebracht:  
Größere Energien werden erreicht.



# Arten von Collidern

- **Elektron-Positron-Collider: Präzisionsmessungen**

- **LEP, CERN** in Genf bis 2000

(bis 105 GeV pro Strahl)

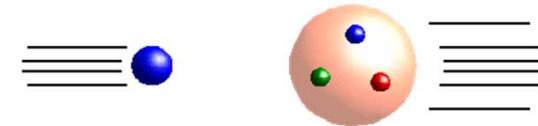
- **ILC** (International Linear Collider) ab 2020 (?)



- **Elektron-Proton-Collider: Substrukturmessungen**

- **HERA, DESY** in Hamburg, bis 2007

(e: 30 GeV, p: 920 GeV)



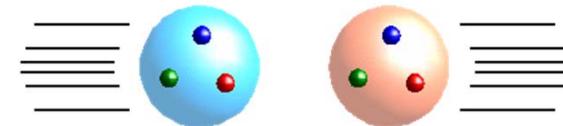
- **Hadron-Hadron-Collider: Entdeckungsmaschinen**

- **TEVATRON, FERMILAB** in Chicago, bis 2011

(980 GeV pro Strahl)

- **LHC, CERN** in Genf (Proton-Proton) seit 2009

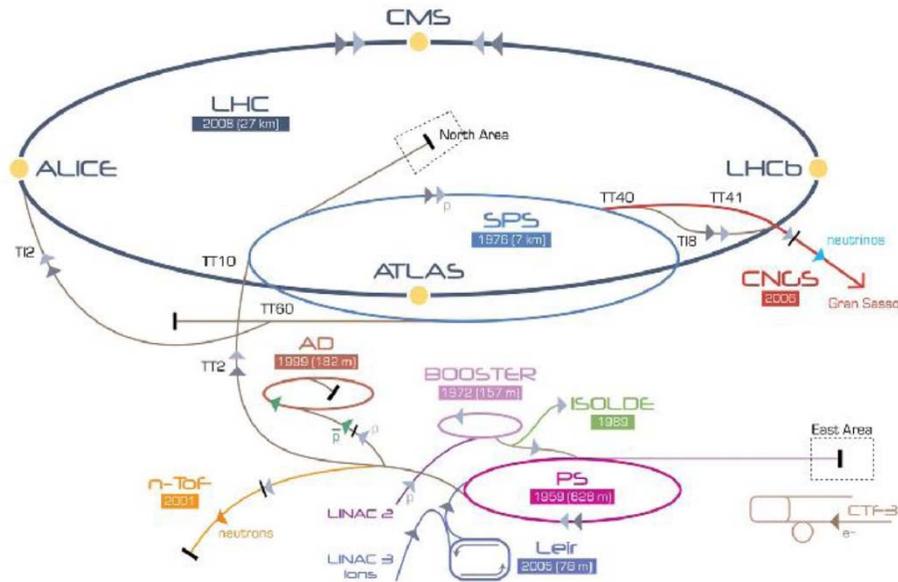
(7000 GeV pro Strahl, z.Z. 3500 TeV)



# Beschleuniger-Systeme am CERN



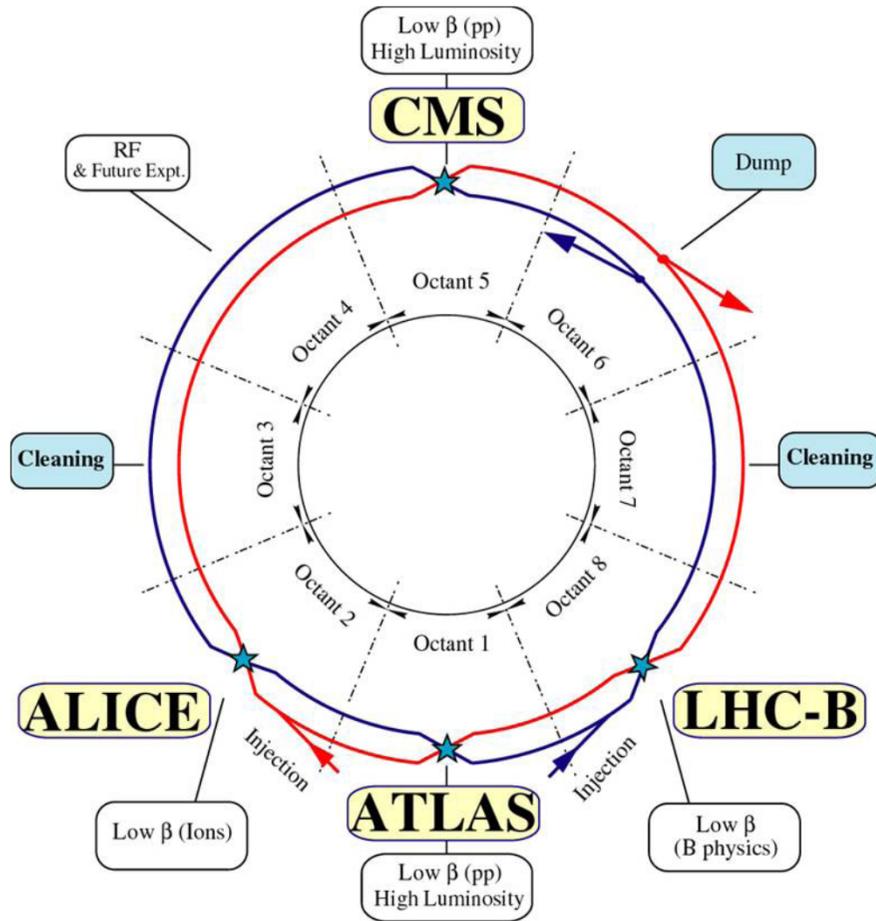
$2 \times 2800$  Strahlpakete, jedes mit  $10^{11}$  Protonen  
 $\Delta t = 25$  ns zwischen den Strahlpaketen



## Beschleunigungsabfolge:

1. Protonenquelle (Flasche),
2. LINAC2: 50 MeV,
3. PSB: 1.4 GeV,
4. PS: 28 GeV,
5. SPS: 400 GeV,
6. LHC: 3.5 TeV

# LHC: Technischer Überblick



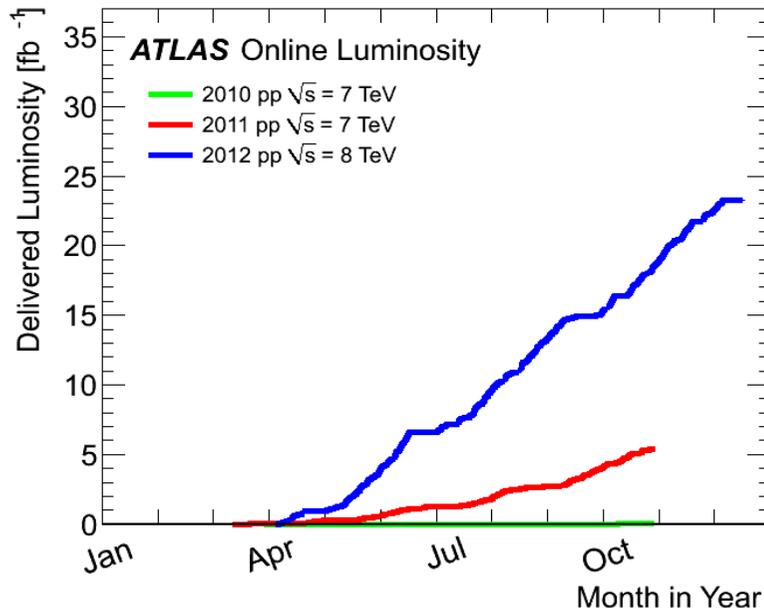
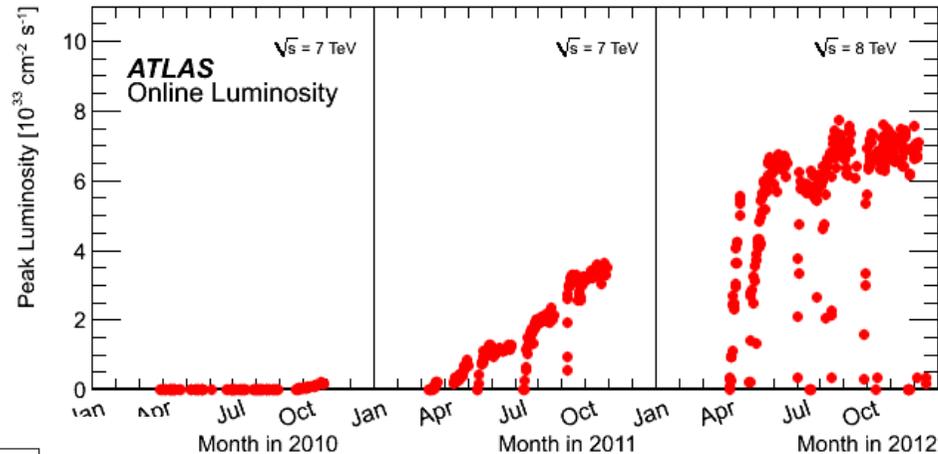
**Leistungsfähigster Beschleuniger der Welt in allen Parametern**

<b>Typ</b>	Proton-Proton/ Pb-Pb Collider
<b>Umfang</b>	26.7 km
<b>Energie</b>	7 TeV pro Strahl
<b>Luminosität</b>	$10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
<b>Strombedarf</b>	120 MWatt
<b>Planung</b>	1984 – 1994
<b>Bau</b>	1994 – 2008
<b>Laufzeit</b>	Ca. 20 Jahre
<b>Kosten</b>	3 Milliarden EURO
<b>Experimente</b>	4 (6)

# Datennahme 2010 - 2012



- Sehr erfolgreiche Steigerung der Datennahme seit 2010
- Designwert (fast) erreicht
- Strahlintensitäten von höchster Qualität

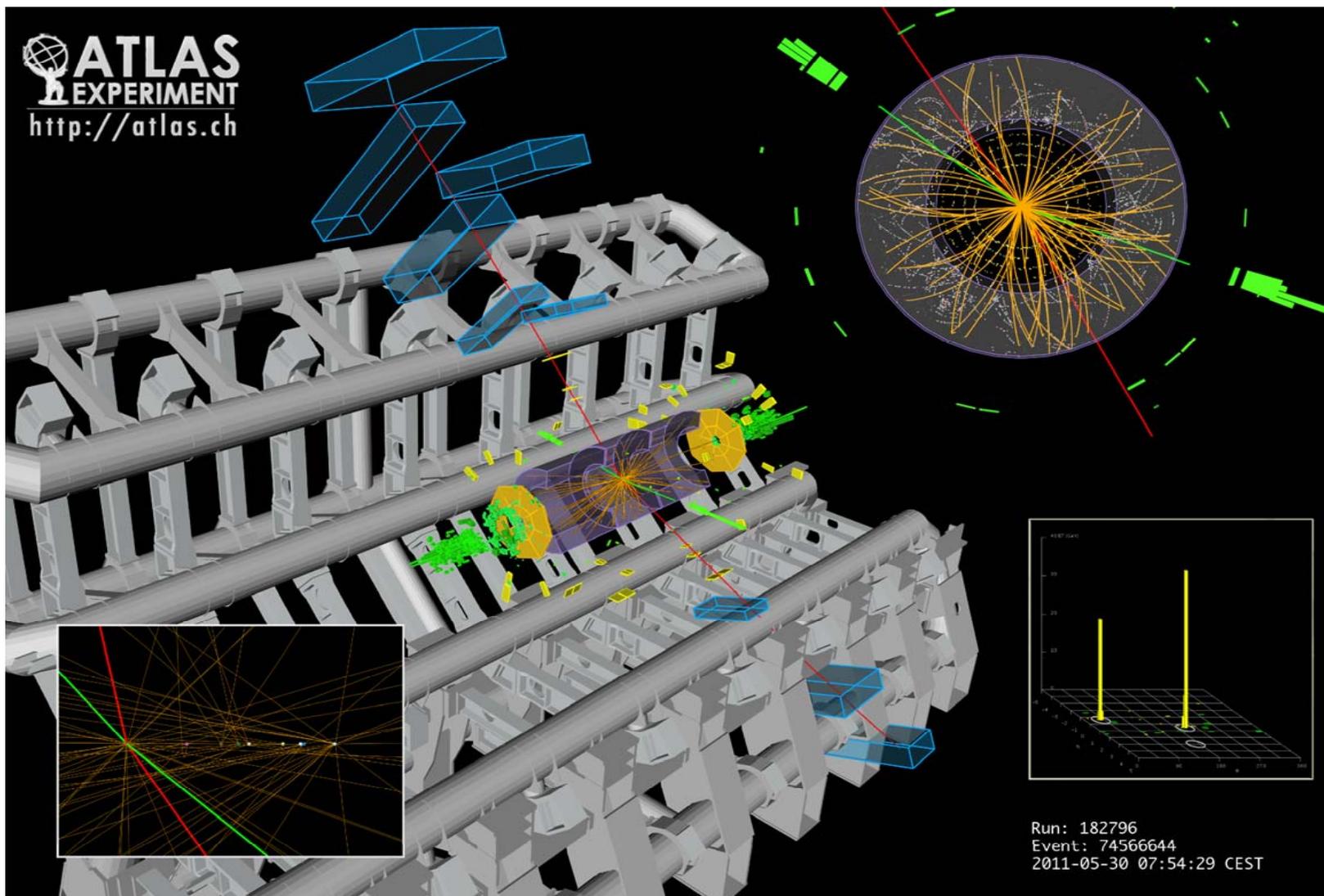


- Stetige Vergrößerung der Datenmenge sowie der Datennahme
- Wesentliche Voraussetzung für das Entdeckungspotential
- Daten von höchster Qualität
- Luminosität:
  - "Leuchtstärke" des Beschleunigers
  - Mass für die Menge der Daten

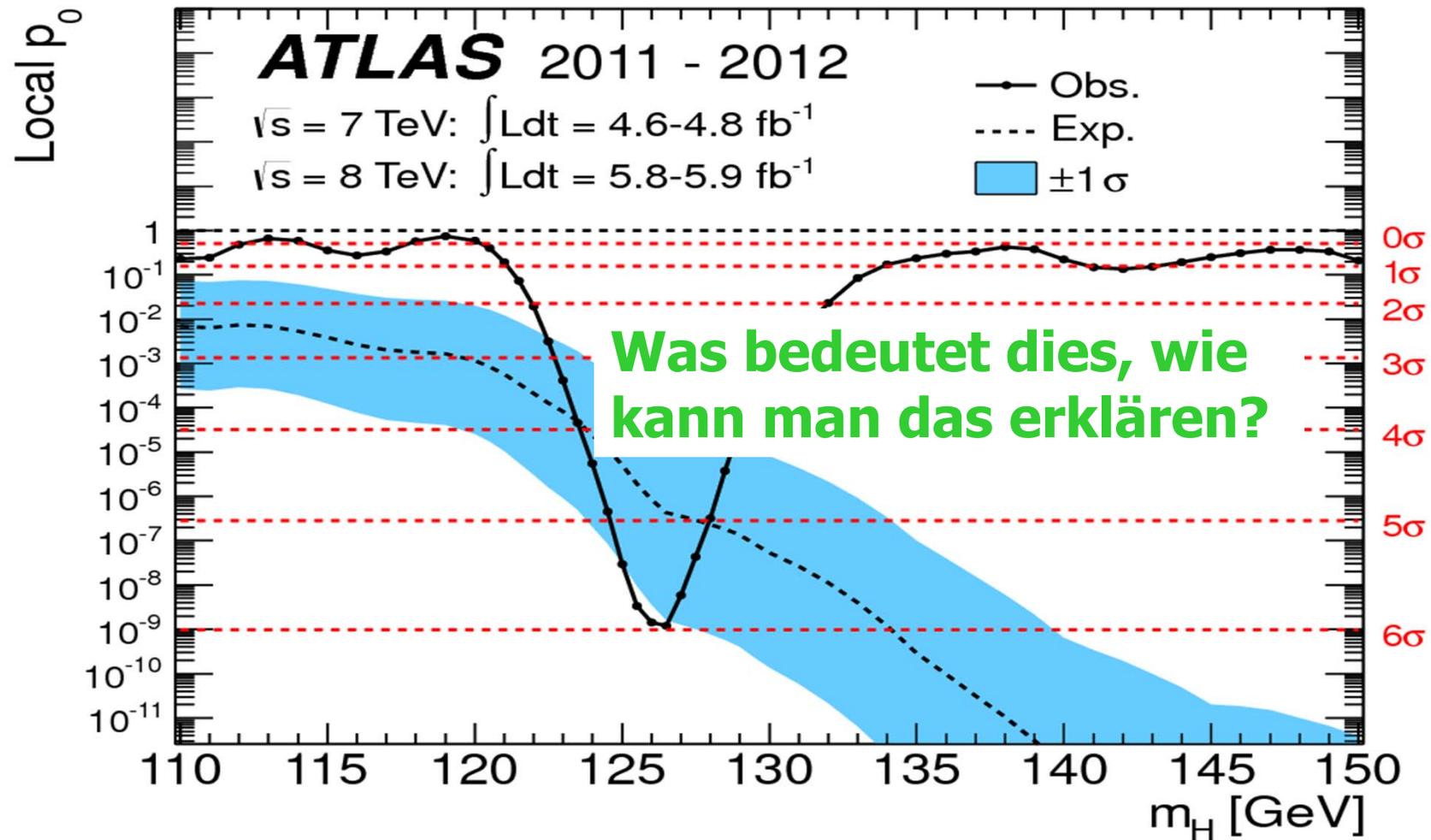


# Die Suche nach dem Higgs Boson

# Ereignis im LHC: Higgs Kandidat!



# Das Bild, das um die Welt ging



# Das Standard-Modell



## Fundamentale Teilchen:

6 Quarks (u, d, c, s, t, b)

6 Leptonen (e,  $\mu$ ,  $\tau$ ,  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\nu_\tau$ )

## Fundamentale Kräfte:

starke Wechselwirkung (g)  
schwache Wechselwirkung (W,Z)  
elektromagnetische  
Wechselwirkung ( $\gamma$ )

## Hart auf der Spur:

**Higgs-Boson**

erklärt, wie Teilchen Masse bekommen

## THE STANDARD MODEL

	Fermions			Bosons	
Quarks	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b><math>\gamma</math></b> photon	Force carriers
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom		
Leptons	<b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	<b>W</b> W boson	
	<b>e</b> electron	<b><math>\mu</math></b> muon	<b><math>\tau</math></b> tau	<b>g</b> gluon	

Higgs\*  
boson

Yet to be confirmed

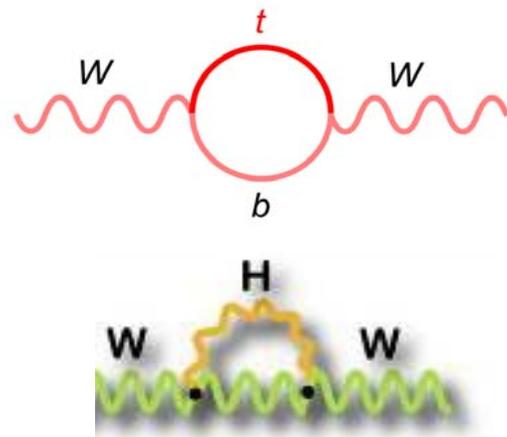
Source: AAAS

sehr erfolgreiches Modell: bisher in allen experimentellen Tests gut bestätigt

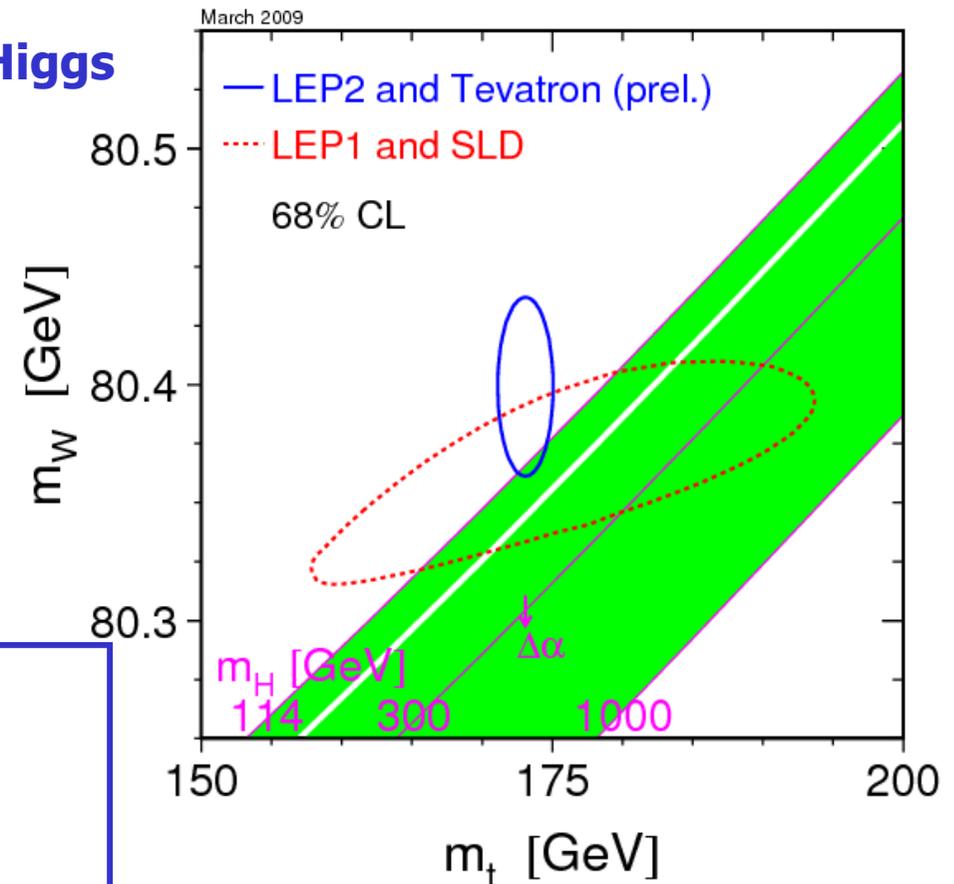
# Korrelation der W- und top-Massen

“Vakuumsfluktuationen”:

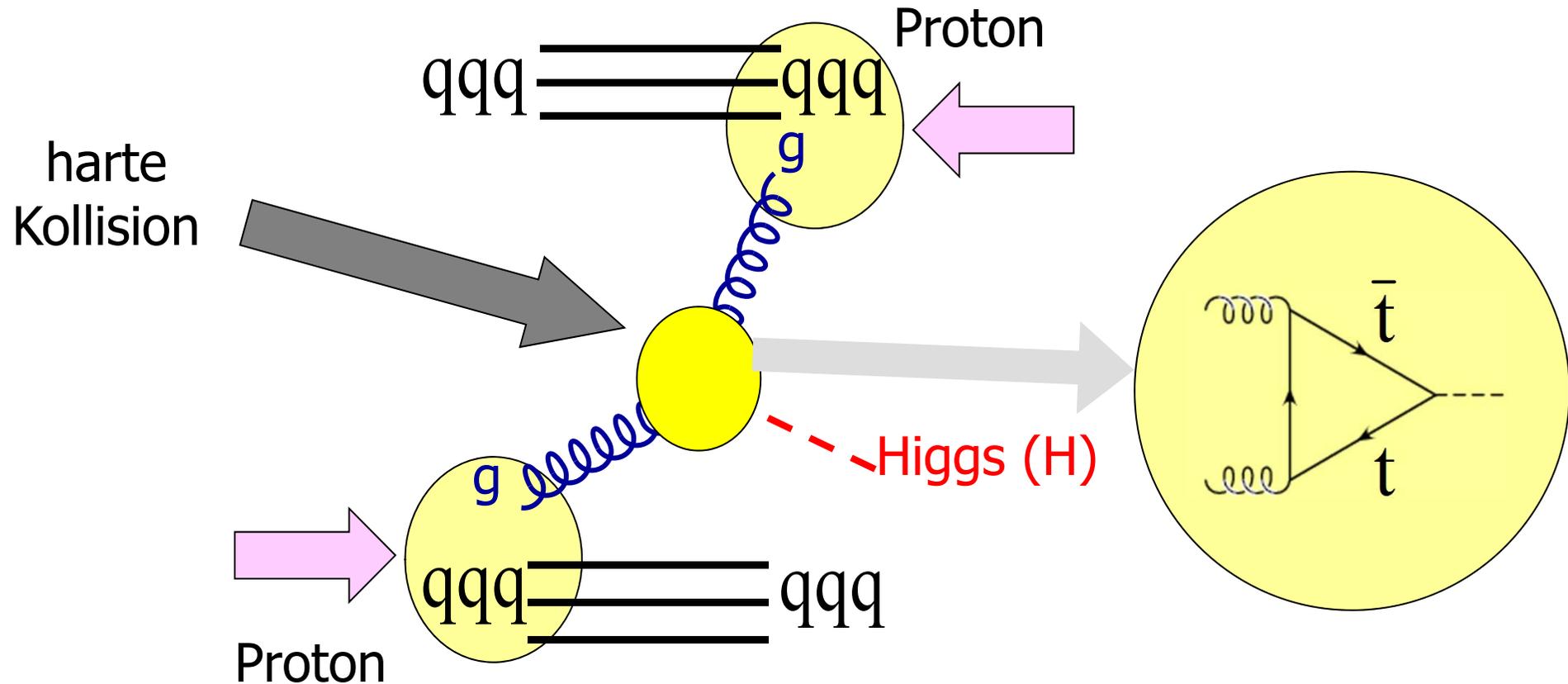
sensitiv auf die Massen von W, t und Higgs



Korrelation der **Massen** des **top-Quarks** und des **W-Bosons**:  
theoretische Vorhersagen für den **Massenbereich des Higgs-Bosons**



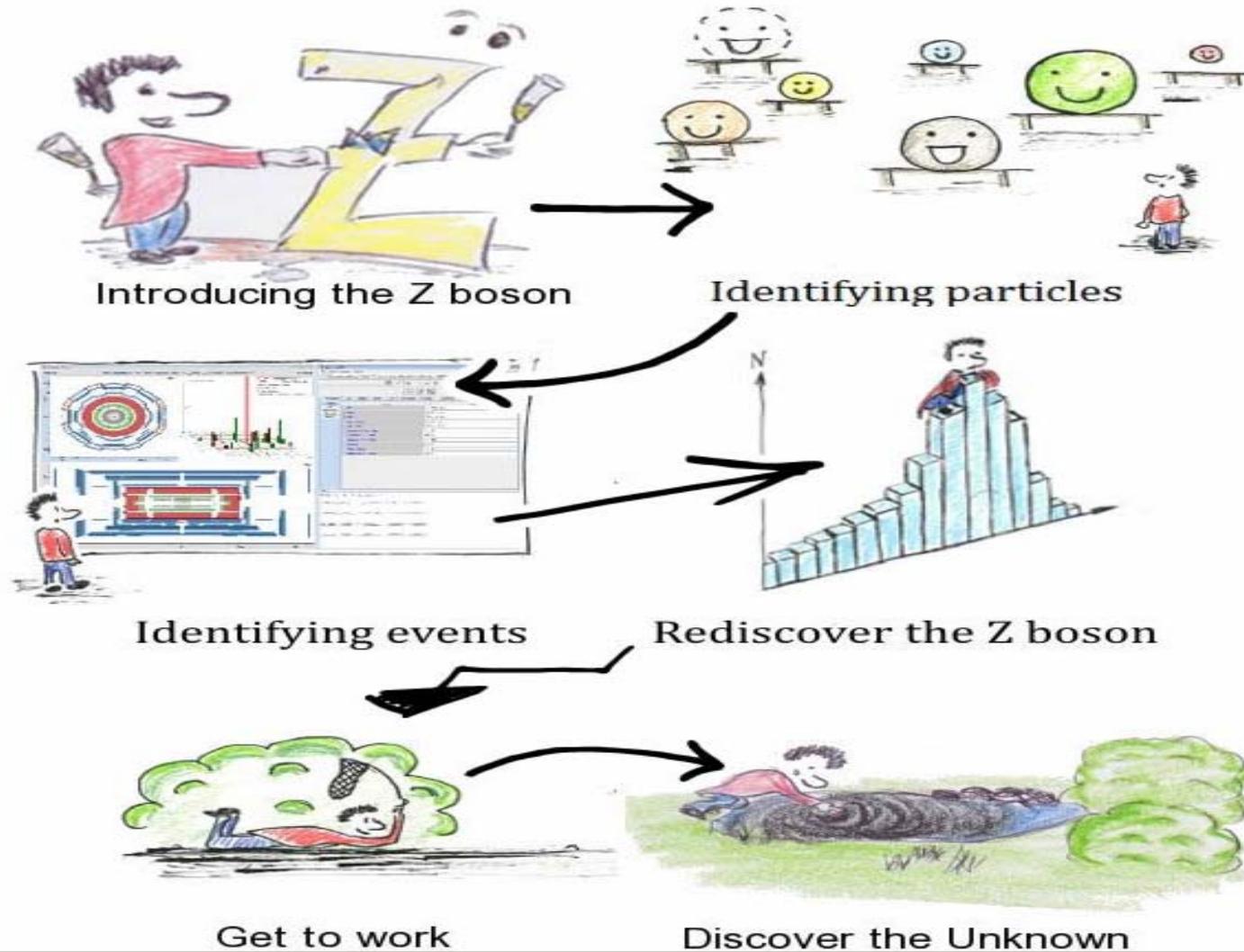
# Neue Teilchen in Proton-Proton Kollision



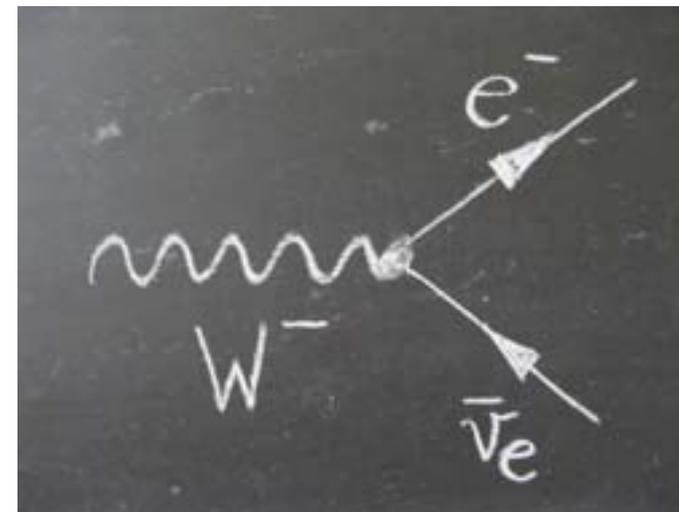
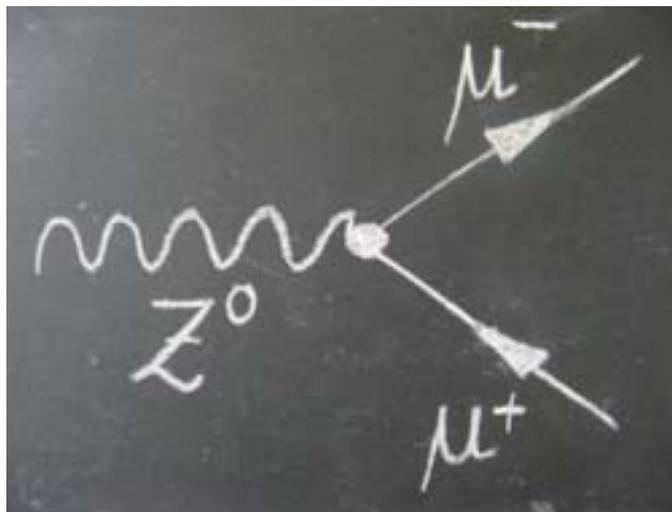
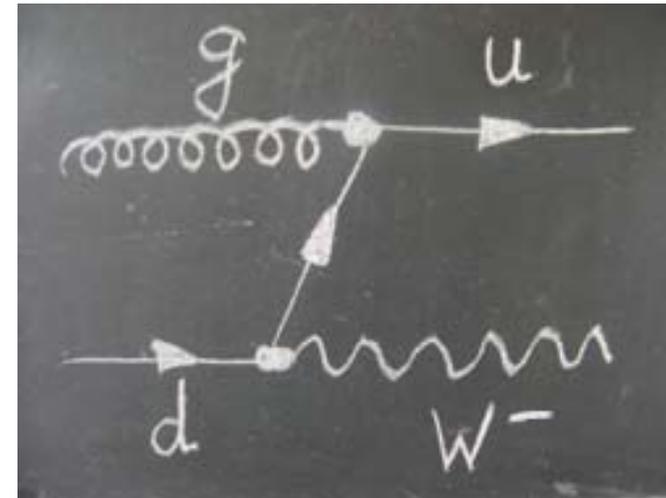
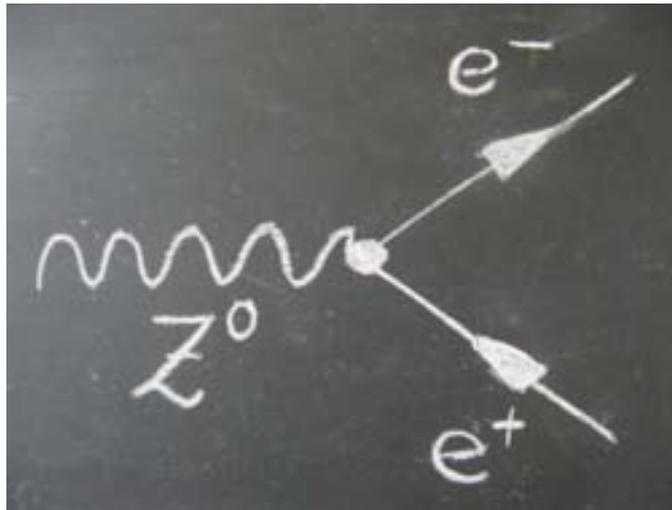


# Unser Plan für heute

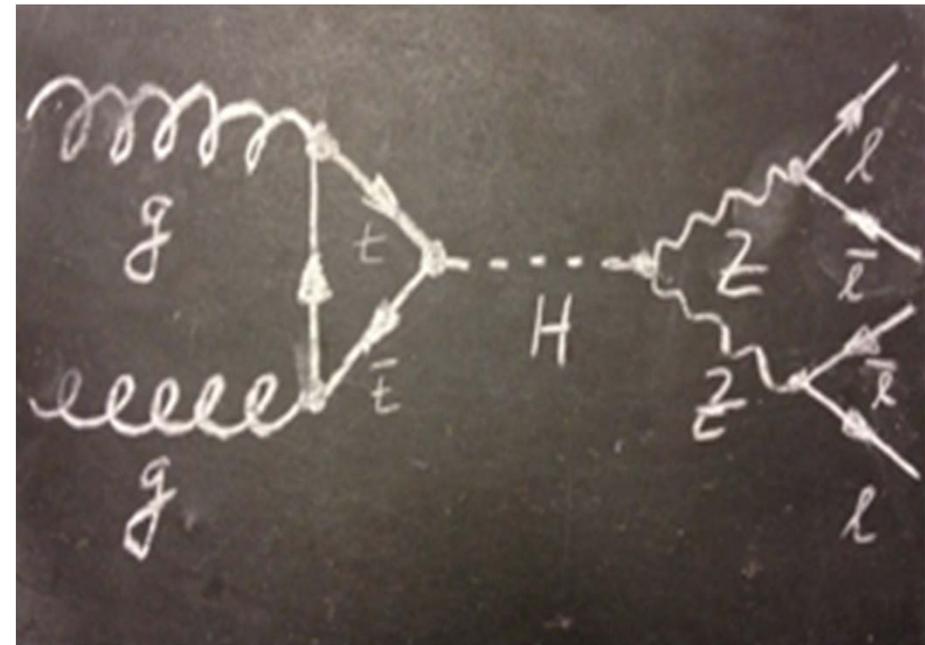
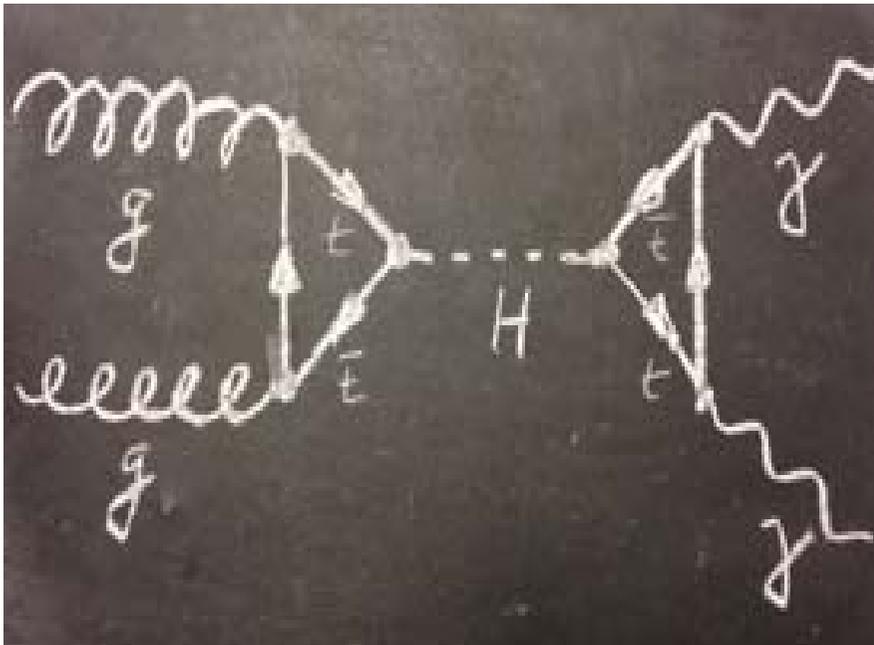
# Suche nach Z- und Higgs-Bosonen



# Z-Pfad: Ereignisse und Untergrund



# Z-Pfad: Suche nach dem Higgs



# Z-Pfad: Suche nach Neuem ( $Z'$ )

